

การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
แนวขนานโดยการจำลองแบบ

THE STUDY OF MAGNETORESISTANCE EFFECT FOR HORIZONTAL
MAGNETIC FIELD DETECTION BY SIMULATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-040-073

การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
แนวขนานโดยการจำลองแบบ

THE STUDY OF MAGNETORESISTANCE EFFECT FOR HORIZONTAL
MAGNETIC FIELD DETECTION BY SIMULATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-040-073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF MAGNETORESISTANCE EFFECT FOR HORIZONTAL
MAGNETIC FIELD DETECTION BY SIMULATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-M-040-073

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์สำหรับ การตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวขนานโดยการจำลองแบบ
นักศึกษา	นาย โยธิน แจ่มทุ่ง
รหัสประจำตัว	57601185
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสในแนวตั้งเพื่อเป็นกลไกในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวขนานหรือทิศทางแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD ในการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงเพื่อช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาวิจัยอีกด้วย ซึ่งอุปกรณ์ได้ถูกศึกษาอยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางคุณสมบัติด้านความเข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรอง ($10^{14} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) และทางมิติรูปทรง ในส่วนความกว้าง และ ระยะห่างระหว่างขั้วกระแส (5 - 50 μm) รวมทั้ง ความลึก (5 - 170 μm) ตลอดจนศึกษาถึงผลของกระแสไบอัส (0.2 - 3 mA) ที่เกิดขึ้น โดยผลการจำลองแบบทั้งหมดแสดงถึงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจากปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ด้วยการเบี่ยงเบนของกระแสภายในตัวอุปกรณ์ ซึ่งปรากฏผลตอบสนองขึ้นลักษณะที่เป็นเชิงเส้นในฐานรองความเข้มข้นสารเจือต่ำ ส่วนฐานรองความเข้มข้นสารเจือสูงมีผลตอบสนองที่น้อยอย่างมากหรือกล่าวได้ว่าไม่ตอบสนอง ด้วยความไม่สมดุลระหว่างแรงลอเรนซ์กับแรงไฟฟ้าฮอลล์เป็นเหตุที่ทำให้เกิดผลตอบสนองดังกล่าว นอกจากนี้ตัวแปรทางมิติรูปทรงส่งผลต่อการตอบสนองอีกด้วย โดยผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนทางมิติรูปทรงทำให้ทราบถึงแนวโน้มในการออกแบบตัวอุปกรณ์เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการทำงานด้วยโหมดกระแส จึงควรกำหนดให้มีความเข้มข้นของฐานรองอยู่ในช่วงที่ต่ำ ($10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) มีความกว้างที่น้อย (5 μm) มีความยาวที่มาก (50 μm) และมีความลึกของฐานรองตั้งแต่ 20 μm ขึ้นไป และค่ากระแสไบอัสที่ต่ำ (0.2 mA) ทำให้ได้ผลตอบสนองความต้านทาน ($R(B)$), ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR), และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) อยู่ที่ค่า 331.82 กิโลโอห์ม, 2.32 กิโลโอห์ม และ 0.71 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถที่จะนำข้อมูลในเบื้องต้นไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์เฉพาะทางที่อาศัยการเบี่ยงเบนกระแสในแนวตั้งสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวขนานได้เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Study of Magnetoresistance effect for Horizontal magnetic field detection by Simulation
Student	Mr. Yothin Chemthung
Student ID.	57601185
Degree	Master of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This thesis study Magnetoresistor device base on vertical deviation current mechanism for horizontal magnetic field detection or called parallel direction to the planar surface of device. In this research, Sentaurus TCAD is used to simulate electrical behavior of the device under influence of magnetic field for reducing research time and cost. The device is studied under the condition of varying parameters: substrate concentration ($10^{14} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), dimension shape at width and current contact spacing (5 - 50 μm), depth (5 - 170 μm), including bias current (0.2 - 3 mA). The overall simulation result shows resistance change of magnetoresistance effect from current deflection that occurs within the device. All magnetic response of magnetoresistance are linearity dependence with horizontal magnetic field at low concentration and little response or say that is not responding in high concentration. The unbalance between Lorentz's force and Hall electrical force creates magneto resistance. Other than, the variable aspect ratio, it can affect the response as well. The result of the change in the shape parameters makes the trend of the device design to be suitable for work. The optimal device for operation in current mode should contain substrate concentration at the low (10^{14} to 10^{15} cm^{-3}), width at little (5 μm), length at much (50 μm) and depth is 20 μm or higher, for bias current at low (0.2 mA). The result of $R[B]$, ΔR and $\%MR(B)$ is 331.82 k Ω , 2.32 k Ω and 0.71 % at magnetic field 0.5 T respectively. Therefore, the simulation result leads to possibility of development of a novel device which relies on vertical current deflection to detect a magnetic field.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้ความช่วยเหลือพร้อมด้วยคำปรึกษาแนวทางในการดำเนินงาน รวมไปถึงคำชี้แนะในการแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center:TMEC) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้งานโปรแกรมสำหรับการจำลองแบบ Sentaurus TCAD ของงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ นายชลินทร์ สุทธิเนตร นักศึกษาปริญญาเอก และนายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์ นักศึกษาปริญญาโท ที่ให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์และชี้แนะแนวทางในการออกแบบและการใช้งานเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ เพื่อน พี่ และน้อง ในภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และคนในครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

โยธิน แจ่มทุ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก.....	7
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอำนาจทางแม่เหล็ก.....	8
2.1.2 ปฏิกิริยาทางแม่เหล็กและเซ็นเซอร์แม่เหล็ก.....	10
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของเซ็นเซอร์และไมโครเซ็นเซอร์.....	12
2.2.1 การจำแนกประเภทของไมโครเซ็นเซอร์แม่เหล็ก.....	14
2.3 ปฏิกิริยาแก๊สลาโนแมกเนติก.....	16
2.3.1 ปฏิกิริยาการเปียงเบนของกระแส.....	18
2.3.2 ปฏิกิริยาแม่กนีโตรซิสแตนท์.....	23
2.3.3 ปฏิกิริยาฮอลล์.....	26
2.4 ทฤษฎีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ สภาพความต้านทาน และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	30
2.4.1 สารกึ่งตัวนำ.....	31
2.4.1.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	34
2.4.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์.....	34
2.4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ	37
2.4.2.2 ความคล่องตัวของพาหะ	41
2.4.2.3 ความหนาแน่นของพาหะ	41
2.5 ปัจจัยทางโครงสร้างสำหรับแมกนีไตรัสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิง	43
บทที่ 3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD.....	47
3.1 บทนำ Sentaurus TCAD	48
3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง	50
3.1.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	51
3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD.....	52
3.2.1 Sentaurus Workbench.....	53
3.2.2 Sentaurus Process	55
3.2.3 Sentaurus Structure Editor.....	56
3.2.3.1 Ligament	56
3.2.4 Sentaurus Device	60
3.2.5 Sentaurus Visual.....	65
3.3 การจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์ด้วย TCAD	66
3.3.1 การออกแบบ Layout ของอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์	67
3.3.2 การกำหนดลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์.....	69
3.3.3 การสร้าง Mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์ ..	75
3.3.4 การจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์ ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์.....	77
3.4 สมมติฐานในการจำลองแบบ	80
บทที่ 4 ผลการจำลองแบบ	82
4.1 ผลการจำลองแบบในด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์	82
4.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีไตรัสเตอร์	83
4.2.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโต ริสเตอร์ในกรณีพื้นฐานที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกัน	91

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่มีค่าระยะของความกว้างแตกต่างกัน ($W/L > 1$)	107
4.2.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างขั้วกระแสแตกต่างกัน ($W/L < 1$).....	116
4.2.4 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่มีอัตราส่วนขนาดรูปทรงที่แตกต่างกัน ($W/L = 1$)	125
4.2.5 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่มีค่าระยะความลึกแตกต่างกัน.....	135
4.2.6 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่ทำการไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ	145
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	154
เอกสารอ้างอิง	158
ภาคผนวก.....	163
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน.....	164
ภาคผนวก ข. คำสั่งที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD	168
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	178
ประวัติผู้เขียน.....	193

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ.....	11
3.1 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่.....	78
4.1 ค่าความต้านทาน,ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ของอุปกรณ์ ด้วยกระแสไป้อสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือ ที่แตกต่างกัน.....	94
4.2 ค่าความต้านทาน,ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนด้านขนาดความกว้างมากกว่าความยาว ด้วยกระแสไป้อส คงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง.....	112
4.3 ค่าความต้านทาน,ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนด้านความกว้างน้อยกว่าความยาว ด้วยกระแสไป้อส คงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง.....	121
4.4 ค่าความต้านทาน,ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนรูปทรงทางขนาดมีค่าแตกต่างกัน ด้วยกระแสไป้อส คงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง.....	130
4.5 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง กรณีอุปกรณ์มีระยะความลึกที่แตกต่างกัน ด้วยกระแส ไป้อสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง.....	140
4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ กรณีอุปกรณ์มีระยะความลึกที่แตกต่างกัน ด้วยกระแส ไป้อสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง.....	141
4.7 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง กรณีอุปกรณ์มีความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ด้วยการไป้อสกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำและสูง.....	149
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ กรณีอุปกรณ์มีความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ด้วยการไป้อสกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำและสูง.....	149
4.9 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์แมกนีโต ริซิสเตอร์ ที่ถูกไป้อสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นสารเจือต่ำและสูง.....	150

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ระดับของความเข้มสนามแม่เหล็กทั่วไปในตำแหน่งต่างๆ..... 8
2.2	การแบ่งประเภทการซึมซับแม่เหล็กได้ของวัสดุกับโครงสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก 10
2.3	การเปรียบเทียบของสเกลเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำกับปริมาณอื่นๆ 13
2.4	การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 15
2.5	แผนภูมิต้นไม้ของวัสดุที่ใช้เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กและผลปรากฏการณ์ต่างๆ 17
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าและเส้นความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบาง ทั้งประเภทที่มีขนาดรูปทรงยาว ($L > W$) (a) กับรูปทรงสั้น ($L < W$) (b) 19
2.7	มิติหรือรูปทรงแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีด้านยาวมีค่าน้อยกว่าด้านกว้าง ($L < W$) หรือที่เรียกว่าขนาดสั้นซึ่งมีระยะห่างระหว่างขอบด้านข้างซ้ายถึงขวาของขั้วไฟฟ้าที่น้อยกว่าระยะห่างระหว่างขอบด้านบนถึงล่างที่เป็นฉนวน 20
2.8	มิติหรือรูปทรงแผ่นคอร์บิโน เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลมที่มีขั้วหนึ่งขั้วอยู่ตรงกลางและอีกขั้วอยู่ล้อมรอบเส้นรอบวงของแผ่น ในแผ่นคอร์บิโนสนามไฟฟ้า E จะแผ่ตามรัศมีวงกลมโดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ส่วนความหนาแน่นกระแส J จะถูกทำให้เอียงตามมุมลอเรนซ์ 22
2.9	ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้น กรณีที่ถูกป้อนด้วยแรงดันคงที่ (a) และ กรณีที่ถูกป้อนด้วยกระแสคงที่ (b) เส้นประคือเส้นกระแสที่ $B=0$ ในขณะที่เส้นทึบแสดงถึงเส้นกระแสที่ $B \neq 0$ 24
2.10	การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n 28
2.11	ลักษณะช่องว่างและแถบพลังงานของสารที่เป็นตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน 32
2.12	สารกึ่งตัวนำและการจำแนกประเภทของสารสารกึ่งตัวนำ 33
2.13	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 35
2.14	แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี 36
2.15	ลักษณะรูปร่างและขนาดของแท่งสารกึ่งตัวนำเมื่อทำเป็นตัวต้านทานแบบง่าย 37
2.16	แพคเตอร์โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสแตนซ์สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เป็นฟังก์ชันมาจากผลของ $u_H B$ ซึ่งลาเบลได้แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนในด้านความยาวต่อความกว้าง L/w 45
3.1	ชุดเครื่องมือของ Sentaurus TCAD 49
3.2	โครงสร้างการจำลองแบบกระบวนการสร้างของซิลิคอน 50
3.3	การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์ด้วย TCAD..... 51
3.4	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำ 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ภาพรวมของการจำลองแบบโดยซอฟต์แวร์ Sentaurus TCAD	53
3.6 หน้าต่างการจำลองแบบการทำงานของ Sentaurus Workbench และส่วนอื่นๆ.....	54
3.7 กระบวนการยิงฝังประจุใน Sentaurus Process.....	55
3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor	57
3.9 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor.....	58
3.10 หน้าสัมผัสทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน.....	59
3.11 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้าง Mesh.....	60
3.12 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตของ Sentaurus Device.....	61
3.13 หน้าต่างของ Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .plt	65
3.14 หน้าต่างของ Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .tdr	66
3.15 Layout ของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่สร้างด้วย Ligament Layout Editor.....	68
3.16 Substrate ที่ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองอุปกรณ์	70
3.17 Pattern สำหรับกำหนดพื้นที่บริเวณที่จะถูกเจือสารลงไป	71
3.18 Insert ที่ใช้สำหรับเพื่อระบุการยิงฝังประจุ	72
3.19 Etch สำหรับเป็นส่วนที่กำหนดการกัดชั้นน้ำยาไวแสงและสร้างชั้นโลหะ	72
3.20 Deposit ที่ใช้สำหรับเพื่อเป็นการสร้างชั้นโลหะ	73
3.21 Pattern สำหรับเป็นการสร้างขั้วไฟฟ้า.....	73
3.22 Etch ที่ใช้สำหรับกัดชั้นของโลหะ.....	74
3.23 Etch ในขั้นตอนสุดท้ายสำหรับกัดชั้นน้ำยาไวแสงที่บริเวณพื้นผิวออกทั้งหมด	74
3.24 การขึ้นรูปโครงสร้างอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ด้วย Ligament Flow Editor	75
3.25 โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจากกำหนดโครงตาข่ายและหน้าสัมผัสไฟฟ้าแล้ว	76
3.26 โครงสร้างของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์และภาคตัดขวางที่แสดงบริเวณที่ถูกเจือสาร	76
3.27 โครงสร้างของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา.....	81
4.1 ลักษณะเฉพาะทางด้านกระแส-แรงดันของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์.....	83
4.2 การวัดค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์	84
4.3 ตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่มีความหนาแน่นของพาหะประจุภายในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	85
4.4 แผนภาพแบบจำลองกลไกการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนทีในตัวอุปกรณ์ แมกนีโตรีซิสเตอร์	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	ผลตอบสนองต่อความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	88
4.6	แผนภาพแสดงการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ฐานรองมีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือแตกต่างกัน	91
4.7	ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงกรณีฐานรองมีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือ 10^{14} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์..	92
4.8	ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์กรณีฐานรองมีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ 10^{14} และ 10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	93
4.9	ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์กรณีฐานรองมีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับสูง 10^{16} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	93
4.10	ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ในฐานรองที่มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือ 10^{14} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	96
4.11	ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ในฐานรองที่มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ 10^{14} และ 10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	97
4.12	ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ในฐานรองที่มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับสูง 10^{16} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	98
4.13	การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	99
4.14	การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	100
4.15	การกระจายศักย์ไฟฟ้าที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือในระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	101
4.16	การกระจายศักย์ไฟฟ้าที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือในระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	102
4.17	แผนภาพแบบจำลองกลไกการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแทนท์ ในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีฐานรองมีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับที่สูง.....	104

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	106
4.19 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่ตัวอุปกรณ์มีค่าระยะของความกว้างแตกต่างกัน	107
4.20 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	108
4.21 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	109
4.22 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	110
4.23 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	111
4.24 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตร และความยาว 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	113
4.25 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตร และความยาว 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	114
4.26 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่มีติรูปทรงด้านกว้างมีค่าแตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	115
4.27 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์.....	118
4.29 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	119
4.30 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่สูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	120
4.31 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่สูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	121
4.32 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 5 ไมโครเมตร และความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	122
4.33 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 5 ไมโครเมตร และความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	123
4.34 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ ที่มีติรูปทรงด้านยาวมีค่าแตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	124
4.35 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีที่อุปกรณ์มีค่าอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงแตกต่างกัน	125
4.36 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนรูปทรงทางขนาดแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับที่ต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	127
4.37 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนรูปทรงทางขนาดแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับที่ต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์.....	129
4.39 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับที่สูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	130
4.40 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตร และความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	131
4.41 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตร และความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	132
4.42 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เกิดขึ้นภายใน อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดมีค่าแตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์.....	133
4.43 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีฐานรองอุปกรณ์มีค่าระยะความลึกที่แตกต่างกัน	136
4.44 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีระยะความลึกแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	137
4.45 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ กรณีระยะความลึกแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	138
4.46 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีระยะความลึกแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะความลึกแตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับที่สูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์.....	140
4.48 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่วนระยะความลึกเท่ากับ 15 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	142
4.49 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่วนระยะความลึกเท่ากับ 15 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$	143
4.50 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีที่ระยะความลึกแตกต่างกัน ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์	144
4.51 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าแตกต่างกัน	145
4.52 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ.....	146
4.53 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ.....	146
4.54 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ.....	147
4.55 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ.....	148
4.56 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา	151
4.57 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา.....	152

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58	
ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา	153



บทที่ 1

บทนำ

เซ็นเซอร์ คืออุปกรณ์ที่มีจุดประสงค์สำหรับเพื่อตรวจจับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางกายภาพหรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ เสียง แสง การสัมผัส และสัญญาณในรูปแบบอื่นๆ โดยเซ็นเซอร์หรืออุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณนั้นนับได้ว่ามีบทบาทที่สำคัญเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากว่าในการวัดค่าบางอย่างนั้นไม่สามารถที่จะทำได้ด้วยการสังเกตทางกายภาพหรือมองด้วยตาเปล่าได้ ดังตัวอย่างเช่น สนามแม่เหล็ก แต่ในปัจจุบันนี้เราสามารถที่จะวัดสนามแม่เหล็กได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกกันว่า เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) ได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงทำให้เซ็นเซอร์ประเภทนี้ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญอีกชนิดหนึ่งในเซ็นเซอร์อีกหลายประเภท ตัวอย่างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก เช่น เซ็นเซอร์ฮอลล์, แมกนีโตไดโอด, แมกนีโตทรานซิสเตอร์ และแมกนีโตริซิสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเซ็นเซอร์ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในเบื้องต้นนี้ก็อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งสิ้น โดยปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นมีผลอันเกิดมาจากการที่มีแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กมากระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าซึ่งกำลังเคลื่อนที่อยู่ในวัสดุตัวกลางนั้นเกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวปกติทำให้เกิดการสะสมของพาหะประจุภายในอุปกรณ์ ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กขึ้นนั่นเอง โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มากระทำและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอุปกรณ์อีกด้วย ซึ่งตลอดหลายปีที่ผ่านมา ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้นำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษารียนรู้ รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่างๆอีกมากมาย

นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในการสร้างเป็นตัวเซ็นเซอร์แม่เหล็กได้แล้วนั้นยังมีปรากฏการณ์อีกประเภทหนึ่งที่สามารถจะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นตัวเซ็นเซอร์แม่เหล็กได้เช่นเดียวกัน นั่นก็คือปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ดังกล่าวนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำ จากหลักการดังกล่าวนี้เซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยหลักการจากปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์นี้จะต้องได้รับการออกแบบให้รูปทรงของเซ็นเซอร์มีความยาวที่สั้นกว่าความกว้างหรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่ามีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ เพื่อต้องการให้แรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กนั้นมีค่าที่มากกว่าแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ ส่งผลทำให้พาหะประจุซึ่งกำลังเคลื่อนที่อยู่ในวัสดุตัวกลางนั้นเกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวปกติเดิม ซึ่งในอีกความหมายก็คือเส้นทางการไหลของกระแสเกิดการเบี่ยงเบน โดยการเบี่ยงเบนของเส้นทางการไหลกระแสนี้เองทำให้เกิดผลต่อแมกนีโตริซิสแตนซ์ที่มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยการทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงกับความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำ หรืออาจเรียกกันอีกชื่อว่า ตัวแมกนีโตรีซิสเตอร์นั้น สามารถที่จะทำการแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆตามวัสดุที่นำมาใช้สร้างตัวอุปกรณ์ ได้แก่ ประเภทที่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กกับประเภทที่ไม่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็ก โดยในประเภทแรกที่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กนั้นจะเป็นการอาศัยหลักการทิศทางของโดเมนแม่เหล็กที่มีอยู่ในสารแม่เหล็ก ซึ่งทิศทางของโดเมนแม่เหล็กนั้นเองจะมีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของกระแส เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกพุ่งเข้ามากระทำกับวัสดุก็จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นตามไปด้วย สำหรับในส่วนของประเภทที่สองเป็นประเภทที่ไม่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กนั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวัสดุที่ถูกสร้างด้วยสารกึ่งตัวนำจะเป็นการอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ในโหมดกระแส ซึ่งเป็นการทำงานให้เส้นทางการไหลกระแสขึ้นเกิดการเบี่ยงเบนตามความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำกับวัสดุและส่งผลทำให้ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยความแตกต่างของทั้ง 2 ประเภทนี้ก็คือ ประเภทที่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กนั้นจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าประเภทที่ไม่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กเป็นอย่างมากเลยทีเดียว จึงทำให้ประเภทที่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กดังกล่าวนี้มีการนำไปวิจัยกันอย่างกว้างขวางรวมถึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามประเภทที่ไม่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กซึ่งถูกสร้างจากสารกึ่งตัวนำนั้นก็ยังมีข้อดีในด้านความทนทาน รวมถึงความง่ายต่อการนำไปสร้างลงในวงจรรวมได้ซึ่งต่างไปจากในกรณีของประเภทที่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กดังกล่าวซึ่งไม่สามารถทำได้ จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำถูกเลือกนำมาศึกษาค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดจนถึงปัจจุบัน รูปร่างโดยทั่วไปของแมกนีโตรีซิสเตอร์นั้นจะมีการออกแบบทางมิติหรือรูปทรงเรขาคณิตของตัวอุปกรณ์ในลักษณะรูปทรงที่มีความหลากหลายเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น รูปทรงที่เป็นลักษณะวงกลมที่เรียกว่าคอร์บิโนดิสก์ และรูปทรงที่เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมบางซึ่งรู้จักในชื่อฮอลล์เพลทเดิม โดยรูปทรงดังที่ได้กล่าวมานี้จะต้องได้รับการออกแบบให้มีความยาวที่สั้นกว่าความกว้างเสมอ รูปทรงในลักษณะเช่นนี้มันจึงถูกเรียกว่ารูปทรงแมกนีโตรีซิสแตนท์เพื่อนำไปใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวดิ่ง ซึ่งในการตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ก็ถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการใช้งานเช่นเดียวกัน หรือแม้แต่อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในประเภทอื่นๆก็พบว่ามีรูปทรงตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้งในทิศทางแนวดิ่งและทิศทางแนวนอนอีกด้วย แต่สำหรับในกรณีของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ประเภทที่ไม่ใช้วัสดุที่เป็นสารแม่เหล็กดังกล่าวนี้เองได้มีการศึกษาวิจัยแต่เฉพาะในทิศทางแนวดิ่งเท่านั้น ยังไม่มีการศึกษาวิจัยการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนดังกล่าวปรากฏขึ้นมา จึงเป็นสาเหตุทำให้ผู้วิจัยเองเกิดความสนใจต้องการที่จะศึกษาการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางนอน นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเป็นการนำเสนอการศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนหรือในทิศทางแนวขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ด้วยการออกแบบทางมิติรูปทรงหรือโครงสร้างของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ให้มีความเหมาะสมจากตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ดังกล่าว เช่น ความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรอง, มิติหรือรูปทรงของตัวอุปกรณ์ และกระแสไบอัสคงที่ค่าต่างๆ ตลอดจนเพื่อให้ได้ทราบถึงแนวโน้มและความเป็นไปได้ต่อการพัฒนาและออกแบบตัวอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้นเพื่อการใช้งานแมกนีโตริซิสเตอร์ในรูปแบบดังกล่าว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาหลักการการทำงานและกระบวนการจำลองแบบของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์
2. ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กแนวนอนที่มีต่อปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนอุปกรณ์
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีโตริซิสแดนท์และความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองค่าต่างๆที่เกิดขึ้นบนตัวอุปกรณ์
4. ศึกษาความสัมพันธ์ของผลแมกนีโตริซิสแดนท์ที่มีต่อมิติรูปทรงหรือโครงสร้างบนตัวอุปกรณ์ทางด้านกว้างและด้านยาวที่ค่าต่างๆ
5. ศึกษาความสัมพันธ์ของผลแมกนีโตริซิสแดนท์ที่มีต่อมิติรูปทรงทางด้านลึกหรือด้านของความสูงบนตัวอุปกรณ์ที่ค่าต่างๆ
6. ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของกระแสไบอัสคงที่ค่าต่างๆที่มีต่อแมกนีโตริซิสแดนท์บนความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองค่าต่างๆของตัวอุปกรณ์
7. ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาและปรับปรุงแมกนีโตริซิสแดนท์ด้วยพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยส่งเสริมและสนับสนุนต่างๆ เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ผลการตอบสนองของแมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนที่พุ่งผ่านเข้ากระทำต่อระนาบพื้นผิวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในงานวิจัยดังกล่าวนี้จะต้องพบการตอบสนองที่แตกต่างไปจากในกรณีของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ทั่วไปที่สนามแม่เหล็กพุ่งผ่านเข้ามากระทำในทิศทางแนวตั้งกับระนาบพื้นผิวอุปกรณ์
2. ในแต่ละความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองที่ค่าต่างๆนั้นก็จะมีส่งผลทำให้เกิดค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์ที่มีลักษณะผลตอบสนองที่แตกต่างกันออกไปด้วย
3. ในส่วนของการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรทางโครงสร้าง (geometrical factor) ของตัวอุปกรณ์โดยจะต้องทำการปรับเปลี่ยนมิติด้านความกว้าง ความยาวและความลึกนั้น ย่อมจะต้องมีผลโดยตรงต่อค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์อย่างแน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การปรับเปลี่ยนในด้านของกระแสไอศคังที่ค่าต่าง ๆ นั้นย่อมจะส่งผลต่อแนวโน้มการตอบสนองของค่าการเปลี่ยนแปลงแมกนีไตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นจากผลการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสภายในตัวอุปกรณ์อย่างแน่นอน

5. ความเข้มของสนามแม่เหล็กและทิศทางที่พุ่งผ่านเข้ากระทำต่อระนาบพื้นผิวอุปกรณ์ในแนวนอนจะทำให้เกิดผลการตอบสนองของค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์ที่ดีมากยิ่งขึ้นได้ เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์แมกนีไตรีซิสเตอร์ที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นการศึกษาลงในรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับในส่วนของผลการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนของปรากฏการณ์แมกนีไตรีซิสแตนซ์ที่ใช้หลักการของการเบี่ยงเบนพาหะประจุหรือการเกิดขึ้นของการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสภายในตัวอุปกรณ์ โดยทั่วไปแล้วที่ผ่านมาจนถึงในปัจจุบันตัวอุปกรณ์แมกนีไตรีซิสเตอร์ที่มีการสร้างขึ้นมาจนถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบในด้านมิติรูปทรงหรือลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปอย่างหลากหลายรูปแบบก็ตาม แต่ก็ยังคงอาศัยหลักการเดียวกันคือการทำให้เกิดปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสขึ้นภายในตัวอุปกรณ์เพื่อที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งนั่นเอง ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เองการวิจัยในครั้งนี้จึงต้องการเพื่อที่จะศึกษาถึงผลการตอบสนองปรากฏการณ์แมกนีไตรีซิสแตนซ์ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางที่แตกต่างไปจากกรณีทั่วไปซึ่งก็คือทิศทางแนวนอนหรือทิศทางในแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ดังกล่าว พร้อมด้วยได้ดำเนินการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีส่วนสำคัญและมีความเกี่ยวข้องที่จะทำให้ผลการตอบสนองของแมกนีไตรีซิสแตนซ์นั้นดียิ่งขึ้น เช่น ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ มิติหรือรูปทรงของตัวอุปกรณ์ และค่ากระแสคังที่อินพุท เป็นต้น

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาถึงหลักการทำงานพื้นฐานของเซ็นเซอร์แม่เหล็กซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากอีกประเภทหนึ่งสำหรับในระบบการวัดทุกชนิด ซึ่งได้ดำเนินการศึกษาในส่วนของการออกแบบหรือดัดแปลงและพัฒนามิติรูปทรงเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์แมกนีไตรีซิสแตนซ์มาใช้เพื่อให้สามารถที่จะตรวจจับและตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนได้ หรือที่เรียกกันว่าอุปกรณ์แมกนีไตรีซิสเตอร์ โดยเป็นการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ทางโครงสร้าง มิติหรือรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์, ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรองของตัวอุปกรณ์ และคุณลักษณะทางไฟฟ้าในด้านการไปไอศคังที่ค่าต่างๆ รวมถึงเพื่อต้องการที่จะเพิ่มผลของแมกนีไตรีซิสแตนซ์นั้นให้ดียิ่งขึ้น ตลอดจนเพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มและความเป็นไปได้ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กและพร้อมที่จะนำไปสู่การใช้งานจริง โดยในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาครั้งนี้ได้นำเครื่องมือที่เป็นโปรแกรมเสมือนเฉพาะทางสำหรับที่ใช้ในอุตสาหกรรมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพื่อมาช่วยในการจำลองแบบการทำงานรวมทั้งการวิเคราะห์ผลอีกด้วย

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาถึงหลักการของปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนทีในโครงสร้างของอุปกรณ์
2. ศึกษาถึงโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับความเข้มข้นแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์
3. ศึกษาถึงการใช้งานและการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD
4. ศึกษาถึงการออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD
5. ศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงมิติรูปทรงหรือลักษณะทางโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่มีต่อปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนทีด้วยการจำลองแบบ
6. ศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองของอุปกรณ์ที่มีต่อปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนทีด้วยการจำลองแบบ
7. ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของขนาดการไบอัสกระแสคงที่ค่าต่างๆที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนทีและแนวโน้มการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์
8. ศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนทีที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของอุปกรณ์มีผลการตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น

สำหรับเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

เป็นบทที่กล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษาสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อทำความเข้าใจในภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ดังกล่าว

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนทีซึ่งเกิดขึ้นบนมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์และปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้อง คุณสมบัติทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับตัวต้านทานที่นำมาใช้สำหรับเพื่อการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนด้วยกระแสเบี่ยงเบนในแนวตั้ง แนวคิดในการจำลองการออกแบบรวมทั้งตัวแปรหรือพารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับที่ใช้สำหรับในการจำลองแบบเพื่อเพิ่มผลการตอบสนองของปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนที รวมถึงหลักการในการ

ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนหรือขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของพาหะประจุหรือการเกิดการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสขึ้นภายในตัวอุปกรณ์

บทที่ 3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

เป็นบทที่จะกล่าวถึงเครื่องมือที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากที่ใช้ในการจำลองแบบการทำงานสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ในด้านของการออกแบบมิติรูปทรงหรือโครงสร้างของอุปกรณ์รวมถึงในส่วนในตัวแปรหรือพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง โดยโปรแกรมการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวนี้ก็คือโปรแกรม Sentaurus TCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับเพื่อพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนกระบวนการสร้างและการทำงานของตัวอุปกรณ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงขั้นตอนการจำลองแบบอุปกรณ์รวมถึงรายละเอียดของโมเดลทางฟิสิกส์ที่อยู่เบื้องหลังการจำลองแบบการทำงานของงานวิจัยดังกล่าวนี้

บทที่ 4 ผลการจำลองแบบ

กล่าวถึงผลของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ที่เกิดขึ้นซึ่งได้จากการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอน จากที่ได้ดำเนินการเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ เพื่อต้องการที่จะแสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าว

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

กล่าวถึงผลสรุปทั้งหมดที่ได้จากการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์รวมไปถึงในส่วนของการข้อเสนอแนะต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อีกด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

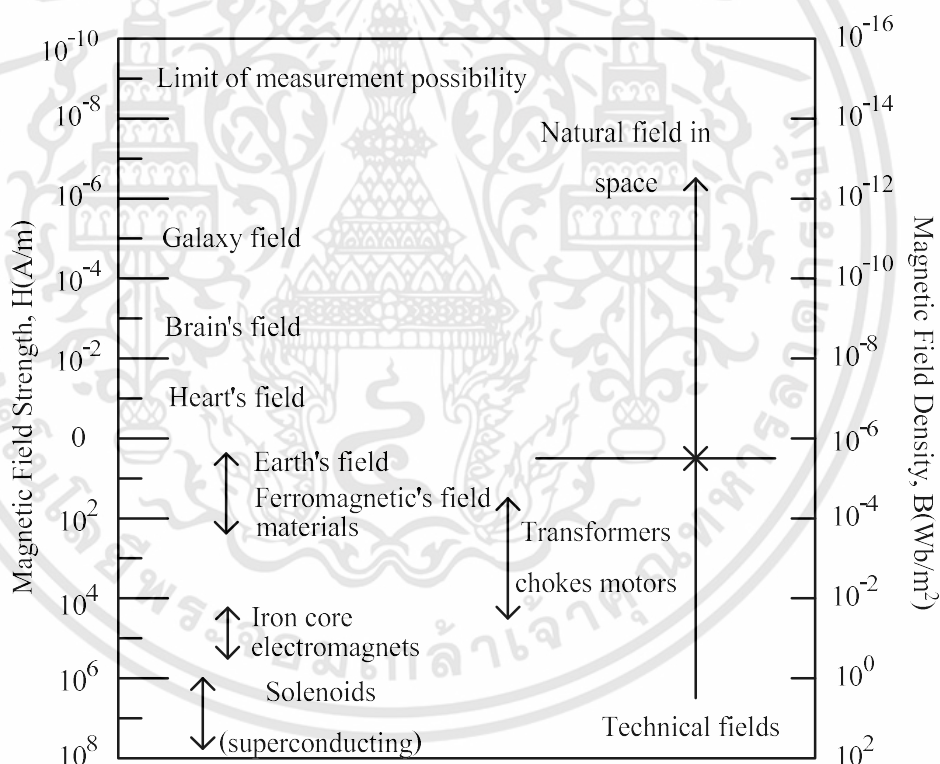
แม่เหล็ก (Magnet) เป็นสารชนิดหนึ่งที่มีสมบัติซึ่งมีความสามารถในการออกแรงดึงดูดสารจำพวกแม่เหล็กด้วยตัวเองและรวมไปถึงสารจำพวกโลหะบางชนิดได้ ซึ่งการที่แม่เหล็กสามารถดูดสารบางอย่างได้นั้นเนื่องจากมีสนามแม่เหล็กในบริเวณโดยรอบแม่เหล็กโดยอาศัยการเหนี่ยวนำ ปกติแล้วแม่เหล็กนั้นจะมีสองชนิด โดยทั่วไปแล้วจะเรียกเป็นขั้วซึ่งขั้วแม่เหล็กนั้นจะหมายถึงตำแหน่งของแท่งแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมากที่สุด ทัวไปแล้วจะอยู่ตรงปลายทั้งสองข้าง แท่งแม่เหล็กแต่ละแท่งนั้นจะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือ (North Pole) นิยมเขียนย่อ ๆ ด้วย N และขั้วใต้ (South Pole) นิยมเขียนย่อ ๆ ด้วย S รวมถึงชนิดของแม่เหล็กนั้นยังสามารถที่จะแบ่งตามลักษณะการเกิด ได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ 1.แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และ 2.แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการประดิษฐ์ โดยแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วยการประดิษฐ์นี้เป็นการสร้างขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ มี 2 ชนิด คือ แม่เหล็กชั่วคราว และแม่เหล็กถาวร ซึ่งแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการประดิษฐ์นั้นจะถูกนำมาใช้ประโยชน์มากกว่าแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเนื่องมาจากสาเหตุที่ว่ามีความอำนาจทางแม่เหล็กที่มากกว่านั่นเอง จากการค้นพบแม่เหล็กในอดีตนั้นได้ใช้แท่งแม่เหล็กเป็นเข็มทิศ ซึ่งพบว่าแท่งแม่เหล็กจะวางตัวในแนวเหนือใต้ของโลกเสมอ แรงกระทำระหว่างขั้วแม่เหล็กจะมี 2 รูปแบบ คือจะมีแรงกระทำทั้งแรงดูดที่เกิดจากการนำแม่เหล็กต่างขั้วกันมาวางใกล้กันและจะมีแรงผลักรกที่เกิดจากการนำแม่เหล็กขั้วเดียวกันมาวางใกล้กันซึ่งคล้ายคลึงกับแรงระหว่างประจุ แต่ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างประจุกับขั้วแม่เหล็กนั้นก็คือขั้วแม่เหล็กจะอยู่เป็นคู่เสมอไม่สามารถแยกขั้วแม่เหล็กเหนือและขั้วแม่เหล็กใต้ออกจากกันได้ เพราะไม่ว่าจะแบ่งแท่งแม่เหล็กให้เล็กลงขนาดเท่าใดก็ตามส่วนที่แยกออกมาก็ยังจะมีขั้วเหนือและขั้วใต้เสมอ นอกจากนั้นแล้วสารบางอย่างสามารถทำให้เป็นแม่เหล็กได้ เช่น การวางแท่งเหล็กไว้กับแม่เหล็ก แม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้แท่งเหล็กนั้นเป็นแม่เหล็กได้ ทั้งนี้สารแม่เหล็กในธรรมชาติเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กโลกนั่นเอง

สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) เป็นเส้นสมมติที่เขียนขึ้นเพื่อแสดงถึงบริเวณอาณาเขตที่มีเส้นแรงแม่เหล็กมากระทำหรือเป็นบริเวณที่แม่เหล็กส่งอำนาจไปถึง โดยถ้าบริเวณใดนั้นมีจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งผ่านมากบริเวณดังกล่าวนั้นก็จะมีแรงมากหรือมีความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงด้วย สนามแม่เหล็กเป็นปริมาณทางเวกเตอร์ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กในสนามแม่เหล็กนั้นจะมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ของแม่เหล็ก เส้นสนามแม่เหล็กจะวนเป็นลักษณะวงไม่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดซึ่งต่างจากเส้นสนามไฟฟ้า และเส้นแรงแม่เหล็กจะมีความหนาแน่นมากบริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็ก ส่วนทิศของเส้นแรงแม่เหล็กโลกนั้นจะมีทิศทางจากขั้วโลก

ใต้สู่ขั้วโลกเหนือ เพราะแท่งแม่เหล็กโลกมีขั้วเหนือ (N) อยู่ทางทิศใต้ และขั้วใต้ (S) อยู่ทางทิศเหนือ นั่นเอง

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอำนาจทางแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กนั้นเกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งอยู่รอบๆตัวเรา ตัวอย่างเช่น วัตถุที่อยู่ในท้องฟ้าหรือในอวกาศ เช่น ดาวฤกษ์ ดาวเคราะห์ เนบิวลา และ อุกกาบาต จะสร้างความเข้มข้นแม่เหล็กที่แตกต่างกันไปจากประมาณ 2×10^{-5} A/m สำหรับกาแลคซีระยะไกลถึงประมาณ 600 A/m ที่พื้นผิวของดวงอาทิตย์หรือที่บริเวณขั้วของดาวพฤหัสบดี ส่วนสนามแม่เหล็กขนาดเล็กก็ถูกสร้างขึ้นโดยระบบชีวภาพ ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงระดับของความเข้มข้นแม่เหล็กหรือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในตำแหน่งต่างๆ โดยแสดงถึงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{-9} A/m จนถึงค่า 10^8 A/m



รูปที่ 2.1 ระดับของความเข้มข้นแม่เหล็กทั่วไปในตำแหน่งต่างๆ [51]

และเราสามารถที่จะทำการแบ่งช่วงความเข้มข้นแม่เหล็กดังกล่าวนี้ออกเป็น 2 ส่วนเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ คือ ช่วงความเข้มข้นแม่เหล็กที่ระดับต่ำ จะเป็นความเข้มข้นแม่เหล็กที่อยู่ในระบบขนาดใหญ่ของกลุ่มดาวฤกษ์หรือที่เรียกว่ากาแล็กซี ในระบบร่างกายของมนุษย์บริเวณสมองและ

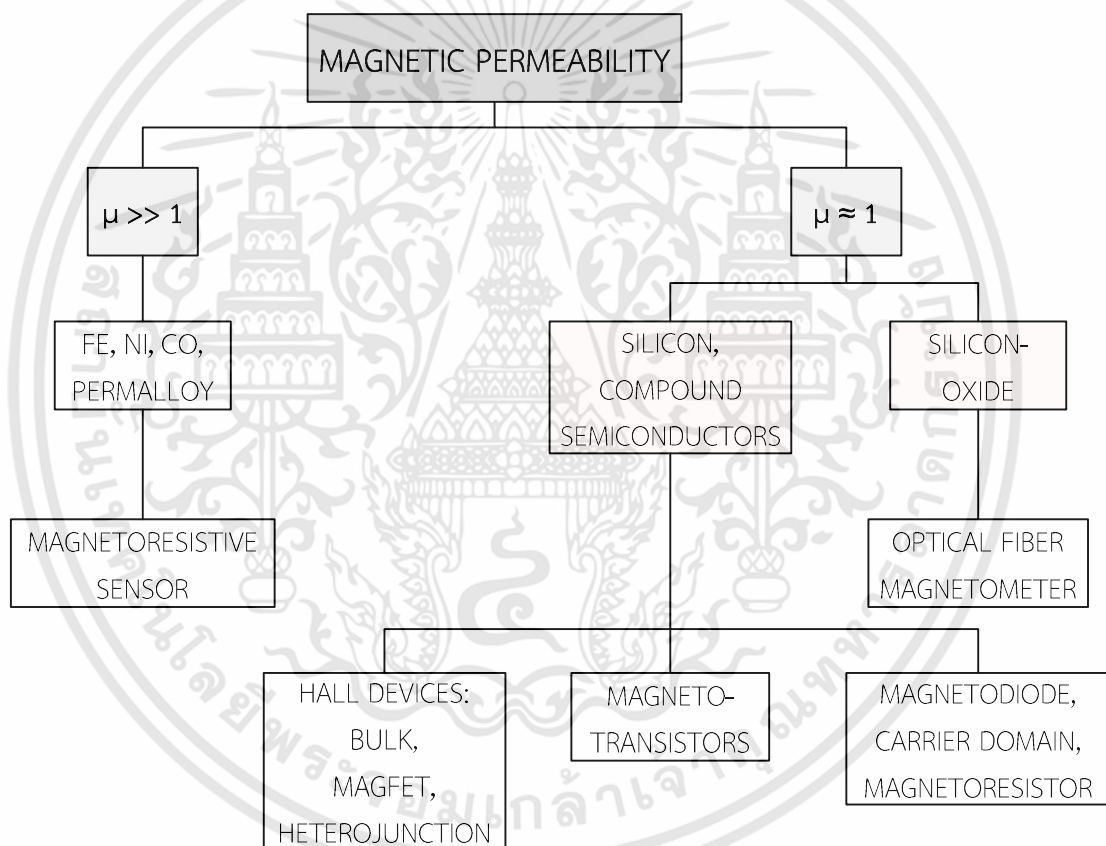
หัวใจ รวมไปถึงในส่วนของบริเวณเส้นเอ็นกล้ามเนื้อหรือเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อซึ่งจะมีปริมาณของความเข้มข้นแม่เหล็กอยู่ที่ประมาณ 10^{-2} A/m และมีปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเวียนอยู่ในระดับเพียงไมโครแอมแปร์ ส่วนที่เป็นช่วงของความเข้มข้นแม่เหล็กที่ระดับสูงนั้นจะเป็นความเข้มข้นแม่เหล็กที่มนุษย์สร้างขึ้น(ในทางเทคนิค)เกิดขึ้นที่ภายในของเคเบิลสายส่งสัญญาณ ตลอดจนสามารถที่จะพบเห็นได้หรือที่ปรากฏอยู่ในวัสดุสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (โดยทั่วไป $1-10^6$ A/m) ในระบบของหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง (โดยทั่วไป 10^1-10^5 A/m) และโซลินอยด์แบบดั้งเดิมหรือขดลวดตัวนำยิ่งยวด (โดยทั่วไป 10^6-10^7 A/m) เป็นต้น

ซึ่งหน่วยของความเข้มข้นแม่เหล็ก (H) จะมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ในขณะที่หน่วยของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) จะมีหน่วยเป็นเทสลา (T) ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าเป็น 1 เทสลา ก็ต่อเมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Φ) ขนาด 1 เวเบอร์ (Wb) พุ่งทะลุผ่านในลักษณะมีทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่ขนาด 1 ตารางเมตร (m^2) และการเหนี่ยวนำแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ในวัสดุก็จะมีเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นแม่เหล็ก (H) ด้วย ซึ่งเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก H เป็นปริมาณที่ได้จากการดำเนินการวัด มันเป็นการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก B ที่กระทำบนพาหะที่เคลื่อนไหวได้อย่างอิสระและเป็นส่วนที่กำหนดการตอบสนองของอุปกรณ์เซ็นเซอร์อีกด้วย โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.1)

$$B = \mu^B H = \mu_0^B \mu_r^B H \quad (2.1)$$

โดยที่ μ^B เป็นค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กได้ของวัสดุ (Permeability of the material) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวกลางที่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กนั้นไหลผ่านได้ยากหรือง่าย และมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างปริมาณทั้งสองก็คือค่าของความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กได้ในสภาวะสุญญากาศ (Permeability of free space, μ_0^B) หรือที่เรียกว่า ค่าคงที่ของแม่เหล็ก (Magnetic constant) ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A หรือ 1.257×10^{-6} H/m กับค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative permeability, μ_r^B) ในมุมมองของความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.1) จะสังเกตเห็นได้ว่าการพิจารณาในด้านของการตอบสนองของอุปกรณ์เซ็นเซอร์แล้ว การตอบสนองดังกล่าวนี้จะได้รับการสนับสนุนในลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นโดยค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่ค่าสูงๆ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เองจึงทำให้เราสามารถที่จะทำการแยกออกเป็นส่วนที่สำคัญได้ถึงสองประเภทในกรณีของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 ทั้งในส่วนของวัสดุที่มีค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กได้ในระดับที่สูง จะเป็นสารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) หรือสารจำพวกเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) จะมีค่าของความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่สูง ($\mu_r^B \gg 1$) นำมาซึ่งที่เกี่ยวข้องกับด้านการเพิ่มประสิทธิภาพที่สอดคล้องกันกับของความไวด้วย ตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ที่มีพื้นฐานอยู่บนแมกนีโตริซิสแตนท์ของฟิล์มบางนิกเกิล-เหล็ก (NiFe) [1] แมกนีโตสทริกชันของนิกเกิลแคลด์ดิงบนเส้นใยแก้วนำแสง [2] หรือ

ปรากฏการณ์แมกนีโตออปติกในแร่จำพวกกลุ่มซิลิเกตที่ถูกใช้เป็นอัญมณีโกเมนหรือชื่อในทางวิชาการว่าการ์เนต (Garnet) และเซ็นเซอร์ใด ๆ ที่รวมอยู่ด้วยกันกับอุปกรณ์ฟลักซ์คอนเซ็นเทรทิง [3,4] กับอีกทั้งในส่วนของวัสดุที่มีค่าความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กได้ในระดับที่ต่ำ จะเป็นสารจำพวกไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) หรือ พาราแมกเนติก (Paramagnetic) จะมีค่าของความสามารถในการซึมซับแม่เหล็กสัมพัทธ์ที่ต่ำ ($\mu_r^B \approx 1$) ซึ่งในส่วนของกรณีดังกล่าวนี้อาจไม่ได้ช่วยทำให้การขยายหรือเพิ่มขึ้นที่เกี่ยวข้องกับด้านการเพิ่มประสิทธิภาพที่เห็นได้ชัดเจน โดยปัจจัย μ_r^B ส่วนใหญ่แล้ว เซ็นเซอร์ทั้งหมดจะมีพื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติกในกรณีที่ตัวอุปกรณ์นั้นถูกสร้างด้วยวัสดุที่อยู่ในประเภทสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ รวมทั้งสารทั้งสองจำพวกดังที่กล่าวมานี้ยังได้ถูกนำมาใช้ในเซ็นเซอร์แม่เหล็กอีกด้วยนั่นเอง



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทการซึมซับแม่เหล็กได้ของวัสดุกับโครงสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก [9]

2.1.2 ปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กและเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

จากที่ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์ต่าง ๆ มากมายที่มีความเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงได้มีการพัฒนาทางด้านวัสดุแม่เหล็กตลอดจนถึงการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในรูปแบบต่างๆ เป็นวงกว้าง ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1 เป็นการแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของการค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในแต่ละยุค โดยเริ่มตั้งแต่จากการค้นพบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ Joule ซึ่งได้มีการค้นพบในปี 1842 ไปจนถึงการค้นพบปรากฏการณ์ Josephson ที่มีการค้นพบในปี 1962 ซึ่งในการค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กทั้งหลายเหล่านี้ในแต่ละยุคต่าง ๆ นั้นสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างหลากหลายอีกด้วย [5] ซึ่งสนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้ดวงตาปกติของเราไม่สามารถที่จะมองเห็นสนามแม่เหล็กนี้ได้เลย ในด้านของการนำไปประยุกต์ใช้งานโดยตรงนั้น เซ็นเซอร์แม่เหล็กได้ถูกนำมาสร้างแมกนีโตมิเตอร์เป็นหลัก ดังนั้นมันถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก เช่น ที่มาจากสนามแม่เหล็กโลกหรือเป็นสนามที่มาจากการมอดูเลตด้วยวัสดุที่เป็นแม่เหล็กบนเทปแม่เหล็ก, แผ่นดิสก์ และเครดิตการ์ด เป็นต้น ส่วนในการนำไปประยุกต์ใช้งานโดยทางอ้อมนั้น เซ็นเซอร์แม่เหล็กได้ถูกนำมาใช้เป็นเซ็นเซอร์สื่อกลางเพื่อตรวจจับในลักษณะที่ไม่ใช่สัญญาณทางแม่เหล็กซึ่งมีตัวอย่างมากมายในด้านการนำไปประยุกต์ใช้งานของเซ็นเซอร์แม่เหล็กดังกล่าว [6]

ตารางที่ 2.1 การค้นพบปรากฏการณ์ของสนามแม่เหล็กในยุคต่างๆ [51]

Year	Effect	Description	Application
1842	Joule	Magnetostriction-change in of ferromagnet with magnetisation.	Acoustic delay line magnetometers.
1846	-	Change in Young's modulus with magnetisation.	Acoustic delay line magnetometers.
1847	Matteucci	Torsion of a ferromagnetic rod changes magnetisation.	Magnetoelastic sensor.
1856	Thomson	Change in electrical resistance with magnetic field.	Magneto resistive sensors.
1858	Wiede mann	A Torsion is created by a current carrying ferromagnetic rod when subjected to a longitudinal field.	Torque and force measurement.
1865	Villari	Magnetization effected by tensile or compressive strength.	Magnetoelastic sensors.
1879	Hall	Transverse voltage created across current-carrying crystal by magnetic field.	Magnetogalvanic sensors.
1903	Skin	Displacement of current to surface due to eddy current.	Position sensors. (distance, proximity)
1931	Sixtus Tonks	Pulse magnetisation by large Barkhausen jumps.	Wiegand and pulse-Wire sensors.
1962	Josephson	Quantum mechanical tunneling effect between two superconducting layers.	SQUID magnetometers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น นำมาใช้ในการตรวจจับระยะทาง, ความเร็วและการตรวจจับพิกัดตำแหน่ง ตลอดจนถึงบอร์ดของคอมพิวเตอร์และพรีอิกซิมิตีส์วิตซ์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อการตรวจจับวัตถุโดยปราศจากการสัมผัส ทำให้เราทราบถึงตำแหน่งของวัตถุหรือสามารถที่จะระบุได้ว่าขณะนั้นมีวัตถุผ่านเข้ามาในตำแหน่งที่เรากำหนดไว้หรือไม่ เป็นต้น [6] โดยเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีการนำมาใช้งานกันโดยทั่วไปนั้นก็เพื่อตรวจจับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่อยู่ในช่วงของไมโครเทสลา(μT) จนถึงมิลลิเทสลา(mT) ซึ่งมักจะเป็นช่วงปกติของที่มนุษย์สร้างขึ้นนั่นเอง และสิ่งที่มีความน่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือสนามแม่เหล็กนั้นสามารถที่จะสร้างอิทธิพลทำให้เกิดแรงกระทำต่อประจุได้ ซึ่งผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุนี้ยังแสดงให้ทราบถึงความสัมพันธ์บางอย่างระหว่างสนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้าอีกด้วย นั่นเอง

2.2. ทฤษฎีเบื้องต้นของเซ็นเซอร์และไมโครเซ็นเซอร์

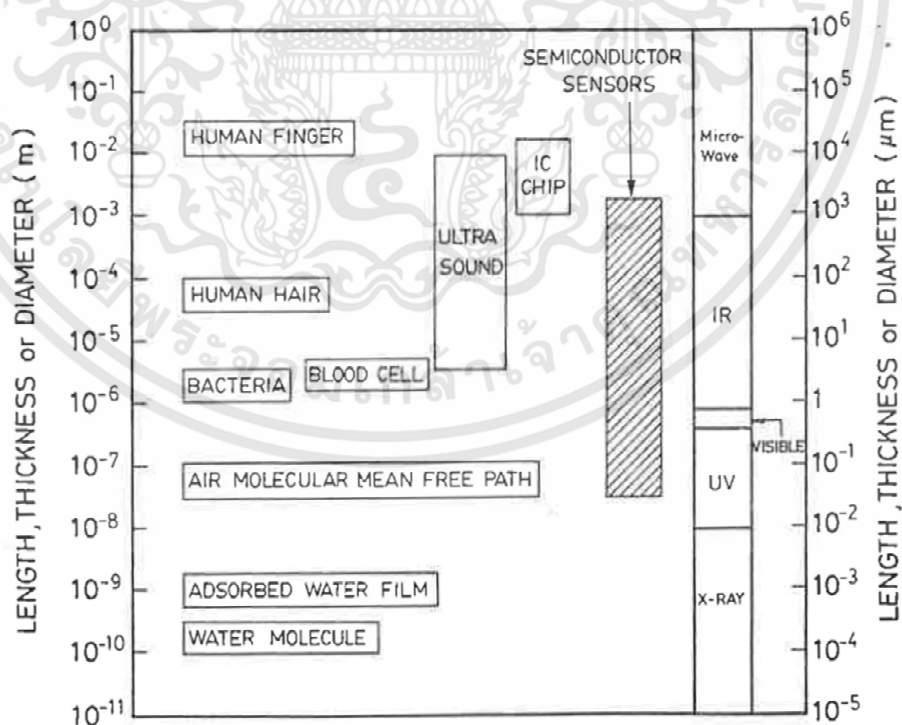
คำว่า “เซ็นเซอร์” เป็นคำที่ได้มาจากภาษาละติน *sentire* ซึ่งหมายความว่า “การรับรู้” ตัวเซ็นเซอร์ดังกล่าวนี้ได้ทำการแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อบางอย่างกับประสาทสัมผัสหรือส่วนการรับรู้ความรู้สึกของมนุษย์เรา ซึ่งมันจะช่วยในเรื่องของการให้ข้อมูลหรือในด้านของรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณทางกายภาพและสัญญาณทางเคมีกับเราซึ่งจะไม่สามารถรับรู้ได้โดยตรงด้วยประสาทสัมผัสหรือส่วนการรับรู้ความรู้สึกของเรา ส่วนในพจนานุกรมนั้นให้คำจำกัดความหรือคำนิยามของของเซ็นเซอร์ซึ่งอ้างอิงจากฐานข้อมูลพจนานุกรมของวิทยาลัยเว็บสเตอร์ พบว่า “เซ็นเซอร์” เป็น “อุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อทางด้านกายภาพหรือทางด้านเคมีจากสิ่งที่มีมากระตุ้น (อาทิเช่น ความร้อน, แสง, เสียง, ความดัน, อำนาจทางแม่เหล็ก, หรือโดยเฉพาอย่างยิ่งการเคลื่อนไหว) และส่งผ่านสิ่งกระตุ้นที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ (ในส่วนของการวัดหรือในส่วนของปฏิบัติการควบคุม)” ดังนั้นตัวเซ็นเซอร์จึงมีความสามารถในการที่จะตรวจจับสัญญาณอินพุต (หรือพลังงาน) และดำเนินการแปลงสัญญาณดังกล่าวนี้เพื่อให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่มีความเหมาะสม (หรือพลังงาน) นั่นเอง

เซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำ [9] ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งซึ่งในวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้โดยส่วนใหญ่แล้วก็จะมีส่วนในหน้าที่สำหรับการทำงานของเซ็นเซอร์ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำจะไม่ใช่วัสดุที่มีความเหมาะสมมากที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเซ็นเซอร์บางประเภทนั้น แต่ในอีกทางเลือกหนึ่งวัสดุดังกล่าวนี้สามารถจะดิสโปสิทซ์ที่ตำแหน่งด้านบนของซบสเตรตหรือที่ตำแหน่งด้านบนพื้นผิวฐานรองสารกึ่งตัวนำจากเซ็นเซอร์ได้ (ยกตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ SAW [7,8] กับ การดิสโปสิทซ์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ลงบนซิลิคอน) โดยในทั้งสองวิธีการนี้สามารถที่จะนำไปสู่ความเป็นไปได้ของการบูรณาการเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำกับวงจรมิคโรอิเล็กทรอนิกส์ เพราะฉะนั้นเราจึงมีรูปแบบของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำอยู่จำนวนสองรูปแบบด้วยกันคือ เซ็นเซอร์ที่อยู่ภายในสารกึ่งตัวนำ และ เซ็นเซอร์ที่อยู่ด้านบนสารกึ่งตัวนำ โดยสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับทั้งสองรูปแบบดังที่ได้กล่าวมานี้ก็คือสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิคอนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำจะมีส่วนที่มีความแตกต่างไปจากเซ็นเซอร์ประเภทโซลิตสเตรหรือเซ็นเซอร์แบบวัสดุของแข็งอื่นๆ ตรงที่ว่าด้วยมันมีขนาดเล็กเป็นอย่างมากและด้วยการใช้เทคนิคทางส่วนของในด้านการผลิตของตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งในเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการประดิษฐ์ขึ้นโดยกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาซึ่งอยู่ในสำหรับวงจรรวม (ICs) ด้วยการใช้กลุ่มกระบวนการที่มีมาตรฐานซึ่งสามารถที่จะพบเห็นได้ในอุตสาหกรรมไอซี [10] โดยความสามารถที่จะทำการผลิตของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำที่มีรูปแบบหรือลักษณะที่เหมือนกันออกมาได้ในหนึ่งครั้งการดำเนินงานต่อกระบวนการผลิตดังกล่าวนี้ได้เป็นจำนวนที่มากมายเลยทีเดียวซึ่งอยู่ในระดับหลายร้อยและหลายพันอุปกรณ์ หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถที่จะสร้างขึ้นมาได้ครั้งละในจำนวนที่มากมายนั่นเอง ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่สูงอย่างมากเลยทีเดียว ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เองจึงถือได้ว่าเป็นการปรับปรุงและพัฒนาเป็นอย่างมากในด้านการอัตราส่วนประสิทธิภาพต่อต้นทุน อีกด้วย

ด้วยในส่วนของขนาดที่เล็กลงเป็นอย่างมากของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำไม่ใช่เพียงแต่มีส่วนร่วมในการทำให้ราคาต้นทุนที่ลดต่ำลงแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ช่วยยังช่วยให้สามารถที่จะบูรณาการร่วมกันกับวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย ที่เรียกว่า เซ็นเซอร์บูรณาการ (integrated sensors) ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นการเสริมสร้างประสิทธิภาพการทำงานของเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบของสเกลเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำกับปริมาณอื่นๆ โดยได้แสดงให้เห็นเป็นที่ชัดเจนแล้วว่าเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำดังกล่าวมีมิติหรือขนาดของรูปทรงอยู่ในระดับเป็น



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบของสเกลเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำกับปริมาณอื่นๆ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร (ไมครอน) โดยเหตุดังกล่าวนี้เองทำให้ในบางครั้งผู้คนบางกลุ่มจึงเรียกว่าไมโครเซ็นเซอร์ ซึ่งในเซ็นเซอร์ดังกล่าวที่เป็นฟิล์มดีสโพสิซซึ่งมีลักษณะบางมีขนาดมิติเป็นหนึ่งในสิบของไมครอนกับ ในส่วนของมิติที่ด้านตัดขวางมีค่าตั้งแต่ช่วงจากเพียงไม่กี่ไมครอนไปจนถึงเพียงไม่กี่มิลลิเมตรโดยที่มีใช้งานกันอยู่ทั่วไป ซึ่งในการเว้นระยะห่างระหว่างในส่วนของชิ้นส่วนเซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำนั้นสามารถที่จะเว้นระยะห่างได้อยู่ในระดับหนึ่งไมครอนหรือที่น้อยกว่าได้ จากที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นจึงสามารถที่จะสรุปถึงข้อดีของไมโครเซ็นเซอร์แม่เหล็กได้ในภาพรวมว่า มีน้ำหนักที่ลดลงหรือเบา (พกพาได้สะดวกมากยิ่งขึ้น), ลดต้นทุนการผลิตหรือมีราคาที่ถูก (ใช้วัสดุน้อยลงเพราะมีขนาดเล็ก), ช่วงที่กว้างมากขึ้นของการใช้งานหรือใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น เป็นต้น

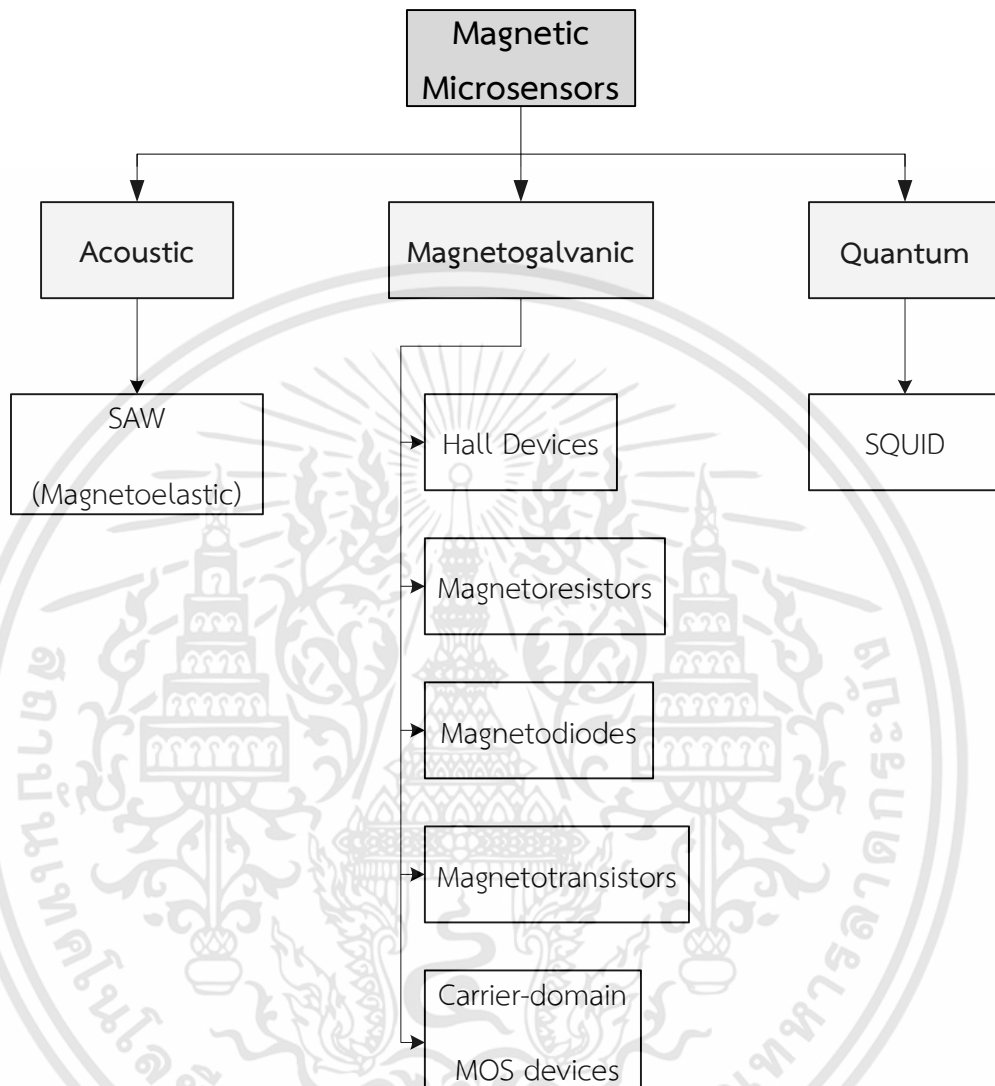
2.2.1 การจำแนกประเภทของไมโครเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

โดยในอดีตที่ผ่านมาเราสามารถที่จะตรวจสอบว่าพื้นที่ในบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหรือไม่ นั้น โดยการใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เรียกกันว่าเข็มทิศ แต่ถึงอย่างนั้นก็ยังคงไม่สามารถที่จะทำให้เราทราบได้ว่าสนามแม่เหล็กในพื้นที่บริเวณดังกล่าวนี้มีค่าปริมาณความเข้มหรือความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กเท่าใดได้เลยอยู่ดี นักวิทยาศาสตร์จึงมีความพยายามในการคิดค้นหาวิธีการเพื่อต้องการที่จะทำการวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการต่าง ๆ จนกระทั่งเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงในปัจจุบันทำให้เราสามารถที่จะทำการวัดสนามแม่เหล็กได้อย่างสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นโดยการใช้ตัวรับรู้แม่เหล็ก หรือที่เรียกกันว่าเซ็นเซอร์แม่เหล็ก ซึ่งเซ็นเซอร์แม่เหล็กดังกล่าวนี้เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถที่จะเปลี่ยนความเข้มของสนามแม่เหล็กให้กลายมาอยู่ในรูปแบบของสัญญาณทางไฟฟ้าได้นั่นเอง

ซึ่งเซ็นเซอร์แม่เหล็กหรืออุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กนั้นจะมีอีกประเภทหนึ่งที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากและเป็นที่แพร่หลายก็คือประเภท Magnetic Microsensors เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์จากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ [11] ที่ได้มีการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยเราสามารถที่จะจำแนกประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ Acoustic, Magnetogalvanic, และ Quantum กลุ่มแรก Acoustic จะเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่ใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์แมกนีโตสทริกทิฟและแมกนีโตอีแลสติกในฟิล์มที่มีลักษณะบางหรือหนาเพื่อใช้คลื่นเสียงในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ได้แก่ SAW (Surface Acoustic Wave) เหมือนกับในกลุ่มที่สอง Magnetogalvanic ที่เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กซึ่งใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์กัลวานแมกเนติกอันเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ที่กระทำบนพาหะประจุที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ในสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก และในกลุ่มสุดท้าย Quantum เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่ใช้ประโยชน์จากควอนตัมในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซ็นเซอร์แม่เหล็กประเภทสุดท้ายนี้ จะแตกต่างไปกับไมโครเซ็นเซอร์ในกลุ่มอื่นๆที่ผ่านมาไม่ได้แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงแค่หลักการทำงานอย่างเดียวเท่านั้น แต่เนื่องจากว่าเซ็นเซอร์แม่เหล็กประเภทดังกล่าวนี้จะมี ความไวในการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กที่สูงเป็นอย่างมากเลยทีเดียว ตัวอย่างอุปกรณ์ดังกล่าว



รูปที่ 2.4 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

ได้แก่ SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) [12] รวมทั้งสามารถที่จะ นำมาแก้ไขปัญหาสัญญาณในระดับพิโกเทสลาซึ่งพบในกระบวนการวัดแม่เหล็กของระบบชีวภาพและ ยังเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความไวมากที่สุดที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้น นี้เป็นการจำแนกประเภทตามหลักการทำงานพื้นฐานรวมถึงลักษณะในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ของแต่ละอุปกรณ์ในแต่ละประเภทได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กนั้นก็ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนเรื่อยมาโดยตลอด จะเห็นได้ว่าในส่วนของ Magnetogalvanic นั้นจะเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์แม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าส่วนอื่นๆ ด้วยการอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์ต่างๆหลายอย่างด้วยกัน อาทิเช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect), ปรากฏการณ์ความต้านทานทางแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect) หรือปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect) เป็นต้น ซึ่งตลอดหลายปีที่ผ่านมาปรากฏการณ์ต่างๆเหล่านี้ได้มีการถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านของการศึกษาเรียนรู้ รวมไปถึงด้านการนำเอาทฤษฎีหรือหลักการของปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กหลากหลายชนิดด้วยกัน โดยในปัจจุบันอุปกรณ์เซ็นเซอร์แม่เหล็กนั้นก็ได้มีการพัฒนาให้มีลักษณะทางโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไปหรือมีความหลากหลายเป็นอย่างมากซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน จึงทำให้รูปแบบลักษณะทางโครงสร้างของแต่ละแบบนั้นก็จะมีสามารถในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันออกไปด้วยนั่นเอง

2.3 ปรากฏการณ์กัลวานแม่เหล็ก (Galvanomagnetic effect)

ปรากฏการณ์กัลวานแม่เหล็กนั้นเป็นปรากฏการณ์เชิงฟิสิกส์ที่มีผลอันเกิดขึ้นมาจากการที่มีแรงลอเรนซ์มากระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าซึ่งกำลังเคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางเมื่อมีการปรากฏขึ้นของสนามแม่เหล็ก [13,14] จากทฤษฎีหรือหลักการเกี่ยวกับแรงแม่เหล็กที่กระทำกับพาหะประจุ โดยการให้สนามแม่เหล็ก (B) ในบริเวณที่มีพาหะประจุ (q) พบว่าเมื่อพาหะประจุอยู่นิ่งหรือไม่มีการเคลื่อนที่ก็จะไม่มีแรงกระทำต่อพาหะประจุดังกล่าวปรากฏขึ้นมา แต่เมื่อพาหะประจุนั้นมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) ในสนามแม่เหล็กพบว่าจะมีแรงเกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กมากระทำกับพาหะประจุ (F_B) โดยแรงดังกล่าวนี้จะมีค่าที่มากขึ้นเมื่อพาหะประจุนั้นมีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กและมีค่าที่ลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อพาหะประจุนั้นมีการเคลื่อนที่ในลักษณะทิศทางเดียวกันหรือขนานกับสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้แล้วแรงแม่เหล็กดังกล่าวนี้จะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อพาหะประจุนั้นมีการเคลื่อนที่เร็วขึ้น รวมถึงขนาดของแรงแม่เหล็กก็ยังขึ้นอยู่กับขนาดของพาหะประจุอีกด้วย จึงสรุปได้ว่าขนาดของแรงเนื่องจากแม่เหล็กที่กระทำกับพาหะประจุดังกล่าวนี้สามารถที่จะหาได้จากสมการที่ 2.2 ด้านล่าง

$$F_B = qvB \sin \theta \quad (2.2)$$

เมื่อ F_B เป็นแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นนิวตัน (N), q เป็นพาหะประจุ หรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C), v เป็นความเร็วของพาหะประจุ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s), B เป็นความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T) และ θ เป็นมุมระหว่าง v กับ B มีหน่วยเป็นองศา(°)

ทั้งนี้ทิศทางของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่กระทำกับพาหะประจุดังกล่าวนี้จะมีทิศทางที่สอดคล้องกับกฎมือขวาซึ่งทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นนี้จะหาได้จากการคูณแบบเวกเตอร์ (vector

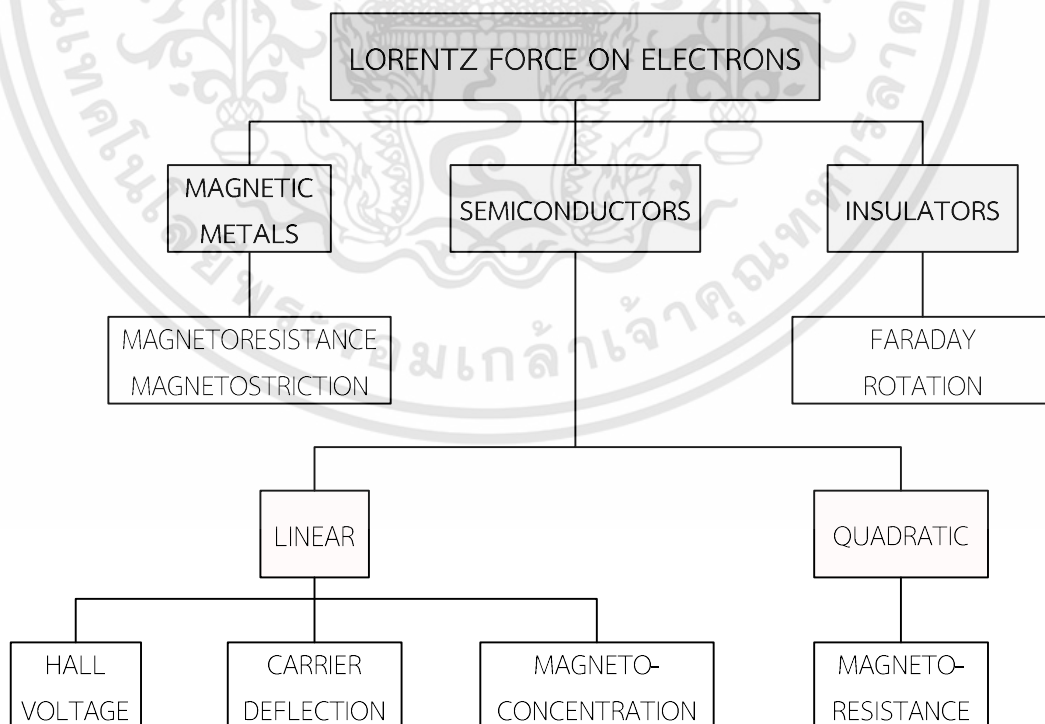
product) ระหว่างทิศทางของความเร็ว \vec{v} กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก \vec{B} ดังนั้นสมการที่สมบูรณ์ในการหาแรงแม่เหล็กที่กระทำกับพาหะประจุคือ

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

เนื่องจากพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันสองชนิดคือบวกและลบ จึงทำให้ทิศของแรงแม่เหล็กที่กระทำกับพาหะประจุทั้งสองชนิดนี้จึงมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ดังนั้นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสามารถที่จะสร้างอิทธิพลต่อพาหะประจุได้ ซึ่งสมการที่สามารถนำมาใช้อธิบายแรงที่กระทำกับพาหะประจุอันเนื่องมาจากสนามทั้งสองนี้ เรียกว่า “กฎแรงลอเรนซ์” (Lorentz force law) ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + (q\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.4)$$

โดยที่ \vec{F}_L คือเวกเตอร์ของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก, q แสดงถึงพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้า (สำหรับอิเล็กตรอน $q = -e$ สำหรับโฮล $q = +e$ ซึ่ง e คือขนาดของพาหะประจุอิเล็กตรอน), \vec{E} คือเวกเตอร์สนามไฟฟ้า, \vec{v} คือเวกเตอร์ความเร็วของพาหะประจุ, และ \vec{B} คือเวกเตอร์ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.5 แผนภูมิต้นไม้ของวัสดุที่ใช้เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กและผลปรากฏการณ์ต่างๆ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

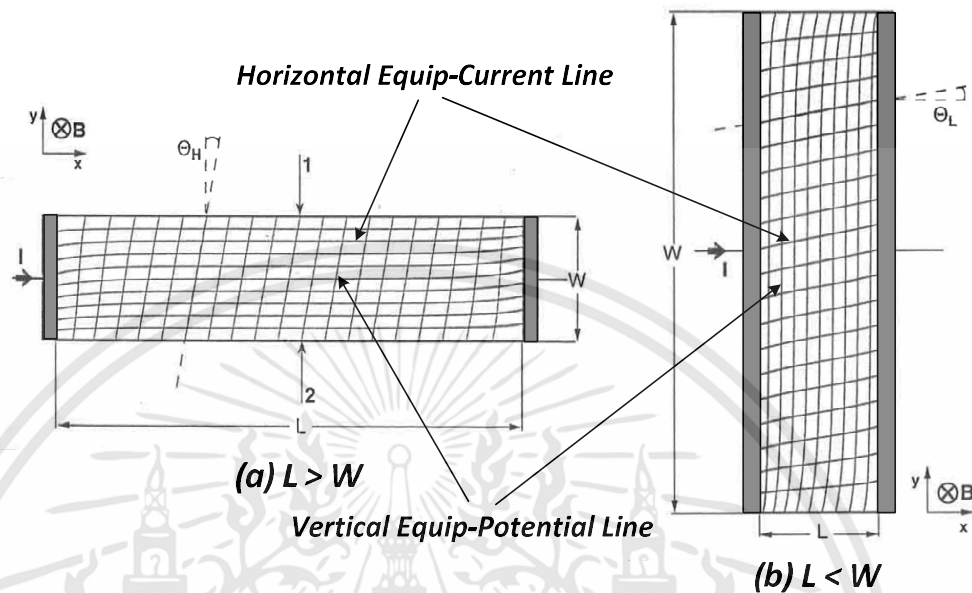
จากสมการที่ (2.4) แสดงให้เห็นว่าในส่วนของเทอมแรงดึงดูดด้านขวามือของสมการดังกล่าวบ่อยครั้งที่ จะใช้อ้างถึงเวกเตอร์ของแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ที่มากระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าเมื่อพาหะประจุนั้นอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า และในส่วนของเทอมที่สองฝั่งด้านขวามือของสมการจะเป็นแรงทางแม่เหล็กที่มากระทำต่อพาหะประจุเมื่อพาหะประจุนั้นอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกัน บางครั้งเราอาจจะเรียกเทอมทั้งสองนี้ว่าเป็นส่วนของไฟฟ้าและ ส่วนของแม่เหล็กตามลำดับ เพื่อที่จะให้การพิจารณาส่วนแม่เหล็กของแรงลอเรนซ์นั้นจะได้เข้าสู่สมการลอยเลื่อนของพาหะประจุ เราจึงทำการประมาณค่าซึ่งประกอบไปด้วยสมมติฐานที่ว่าพาหะประจุเหล่านี้มีการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมออันเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าหรือแรงกระทำอื่นๆ รวมถึงความเร็วของพาหะประจุทั้งหมดก็จะมีขนาดที่เท่ากันและมีค่าเท่ากับค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะทำการแทนที่ความเร็วของพาหะประจุแต่ละตัวในสมการที่ (2.4) ด้วยความเร็วลอยเลื่อนเฉลี่ยของพาหะประจุทั้งหมด และนอกจากนี้แล้วเราจะไม่พิจารณาลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงความร้อน (thermal motion) ของพาหะประจุเพื่อความสะดวกรวดเร็วต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อพาหะประจุ นอกจากนี้ยังสามารถที่จะพิจารณาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ประกอบซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงแผนภูมิต้นไม้ของวัสดุแต่ละประเภทที่นำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ เซ็นเซอร์แม่เหล็กและปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นอีกด้วยนั่นเอง

2.3.1 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส (Current deflection effect)

หากทำการพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางเมื่อได้ดำเนินการไบอัสกระแสคงที่ค่าหนึ่งให้ไหลผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนั้น จะพบว่าผลลัพธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางดังกล่าวนี้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป เมื่อมีรูปร่างหรือขนาดโครงสร้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปด้วย จึงทำให้เราสามารถที่จะทำการแยกออกได้ตามลักษณะของการออกแบบทางมิติรูปร่างหรือโครงสร้างแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ในประเภทแรกเป็นการออกแบบทางมิติรูปร่างหรือโครงสร้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำโดยให้มีด้านยาว (L) ที่มีขนาดมากกว่าด้านกว้าง (W) ในส่วนประเภทที่สองก็จะเป็นการออกแบบทางมิติหรือโครงสร้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำโดยให้มีด้านยาว (L) ที่มีขนาดน้อยกว่าด้านกว้าง (W) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งหากได้ทำการพิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและความหนาแน่นกระแสที่ไหลอยู่ภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบาง โดยยังคงใช้ในส่วนของการบัพทิตและสัญลักษณ์เหมือนกันกับในรูปที่ 2.10 ในประเภทแรกเป็นกรณีที่มีการออกแบบทางมิติรูปร่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำให้มีขนาดของด้านยาวมีค่ามากกว่าขนาดของด้านกว้าง ($L > W$) ดังในรูปที่ 2.6(a) เมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามากระทำหรือตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำก็จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นได้อย่างเต็มที่และสมบูรณ์ สังเกตได้จากเส้นที่อยู่ในแนวนอน (ทิศทางตามแนวแกน x) จะเป็นเส้นที่แสดงถึงลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของพาหะประจุหรืออนุภาคที่อยู่ในแผ่นสารกึ่งตัวนำซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยเส้นกระแสสมมูล (Equip-current lines) (เส้นตรงที่มีหัวลูกศร) และเส้นที่อยู่ในแนวตั้ง (ทิศทางตามแนวแกน z)

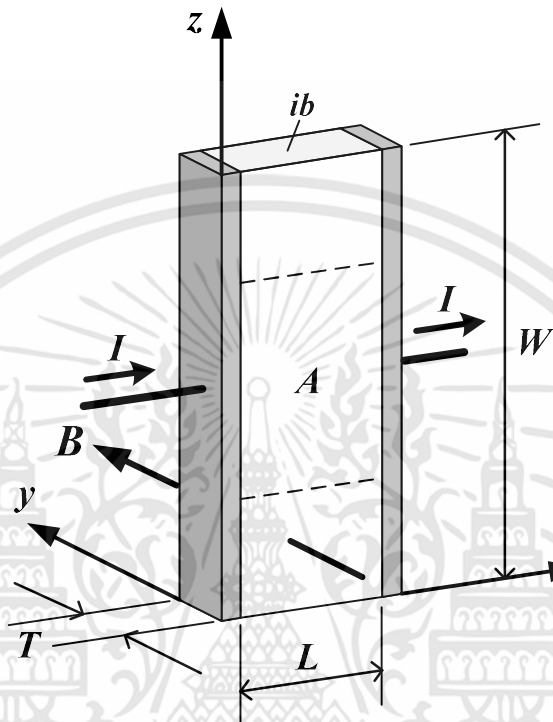


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นศักย์ไฟฟ้าและเส้นความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบาง ทั้งประเภทที่มีขนาดรูปทรงยาว ($L > W$) (a) กับที่มีขนาดรูปทรงสั้น ($L < W$) (b)

จะเป็นเส้นที่แสดงถึงลักษณะของสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นอยู่ในแผ่นสารกึ่งตัวนำซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูล (Equip-potential lines) (เส้นตรงที่ไม่มีหัวลูกศร) จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งในพื้นที่บริเวณตรงส่วนกลางของแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางซึ่งมีขนาดยาวนั้นเส้นกระแสสมมูลยังคงมีลักษณะการไหลเป็นแนวเส้นตรงโดยไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์มีค่าสมดุลหรือเท่ากับแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำ ส่วนเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลนั้นจะมีลักษณะที่เบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในพื้นที่บริเวณดังกล่าว รวมทั้งยังเป็นผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นได้อย่างเต็มที่และสมบูรณ์ด้วยนั่นเอง ซึ่งจะแตกต่างกับในพื้นที่บริเวณตรงส่วนขอบข้างด้านซ้ายและด้านขวา (บริเวณใกล้ขั้วสัมผัส) ของแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางนั้นที่เส้นกระแสสมมูลจะมีลักษณะการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์มีค่าไม่สมดุลกับแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำ แต่เส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลนั้นจะมีลักษณะที่ไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกไม่สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในพื้นที่บริเวณดังกล่าวนั่นเอง ส่วนในอีกประเภทก็คือประเภทที่สองนั้นจะเป็นกรณีที่มีการออกแบบทางมิติรูปทรงของแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางให้มีขนาดของด้านยาวมีค่าน้อยกว่าขนาดของด้านกว้าง ($L < W$) หรือขนาดของด้านกว้างมีค่ามากกว่าขนาดของด้านยาว (

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W > L$) ดังแสดงในรูปที่ 2.6(b) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางซึ่งมีขนาดสั้นดังกล่าวนี้ก็จะทำให้การปรากฏขึ้นของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์นั้นไม่สามารถเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นได้อย่างเต็มที่



รูปที่ 2.7 มิติหรือรูปทรงแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีด้านยาวมีค่าน้อยกว่าด้านกว้าง ($L < W$) หรือที่เรียกว่าขนาดสั้นซึ่งมีระยะห่างระหว่างขอบด้านข้างซ้ายถึงขวาของขั้วไฟฟ้าที่น้อยกว่าระยะห่างระหว่างขอบด้านบนถึงล่างที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)

สังเกตได้จากเส้นศักย์ไฟฟ้าสมมูลนั้นจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงขนานกับพื้นผิวแผ่นสารกึ่งตัวนำ โดยไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกไม่สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวหรืออาจจะกล่าวได้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้น และเป็นผลทำให้ไม่สามารถที่จะเกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นได้อย่างเต็มที่และสมบูรณ์ด้วย ซึ่งจะแตกต่างกับเส้นกระแสสมมูลที่มีลักษณะการไหลเป็นแนวเส้นตรงเอียงหรือมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นนั่นเอง อันเนื่องด้วยสาเหตุที่ว่าแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์มีค่าน้อยกว่าแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำหรืออาจจะกล่าวได้ว่าแรงลอเรนซ์มีค่าในปริมาณที่มากกว่าแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาจึงทำให้เราได้ทราบว่าเป็นกรณีที่ได้มีการออกแบบทางมิติรูปทรงของแผ่นสารกึ่งตัวนำให้มีขนาดของด้านยาวมีค่าน้อยกว่าขนาดของด้านกว้าง ($L < W$) นั้นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางดังกล่าวนี้เป็นสิ่งที่เกิดมาจากปรากฏการณ์อีก

อีกประเภทหนึ่งซึ่งในบางครั้งเรียกกันว่า “ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส” ซึ่งสามารถที่จะสังเกตได้จากรูปที่ 2.6(b) ประกอบด้วย จะเห็นว่าที่เส้นกระแสสมมูลดังกล่าวจะเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นในลักษณะที่สัมพันธ์ตามแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำอีกด้วย [15,16]

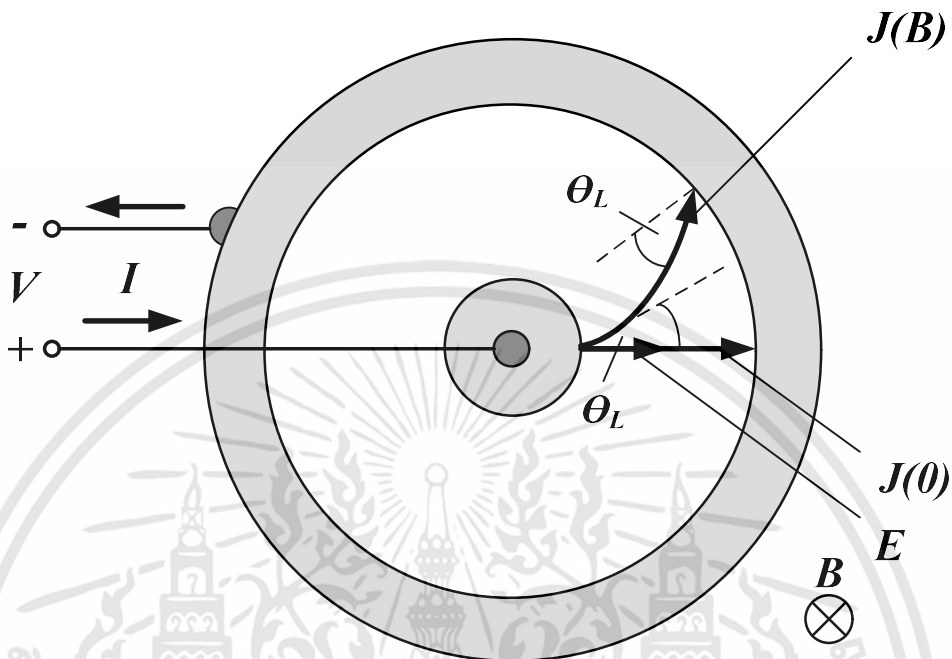
แผ่นคอร์บิโน (Corbino disc)

เพื่อต้องการที่จะศึกษาพร้อมทั้งทำความเข้าใจในลักษณะของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแสรวมทั้งปรากฏการณ์อื่นๆในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีมิติหรือรูปทรงของแผ่นสารกึ่งตัวนำซึ่งขนาดของด้านยาวมีค่าน้อยกว่าขนาดของด้านกว้าง ($L < W$) หรือที่เรียกว่าขนาดสั้น โดยเราจะมาพิจารณาถึงกรณีที่มีความพิเศษในอีกกรณีหนึ่งก็คือ แผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้นซึ่งมีมิติหรือรูปร่างเป็นวงแหวนซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 โดยแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นและมีลักษณะรูปร่างเป็นวงแหวนดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่า “แผ่นคอร์บิโน” ซึ่งแผ่นคอร์บิโนนี้ก็จะมีส่วนในลักษณะที่เป็นแผ่นหรือลักษณะที่เป็นวงแหวนสร้างขึ้นด้วยวัสดุประเภทที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ ตัวอย่างเช่น สารกึ่งตัวนำ โดยจะถูกติดด้วยขั้วไฟฟ้าจำนวนสองขั้วที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงไว้ที่ตำแหน่งบริเวณตรงจุดศูนย์กลางและที่บริเวณรอบๆแผ่น [17] ถ้าหากนำขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้ไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟภายนอกที่มีค่าความต่างศักย์คงที่อยู่ค่าหนึ่งหรือทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้ ก็จะพบได้ว่า เส้นศักย์ไฟฟ้า (equipotential line) จะมีจุดที่ร่วมศูนย์กลางเดียวกันอยู่ที่ตำแหน่งบริเวณวงแหวนตรงศูนย์กลางและทิศทางของสนามไฟฟ้าก็จะแผ่ออกตามแนวรัศมีจากที่ตำแหน่งบริเวณวงแหวนตรงศูนย์กลางไปยังที่ตำแหน่งบริเวณวงแหวนรอบๆด้านนอกของแผ่น ดังนั้นหากพิจารณาในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าว ทิศทางของกระแสก็จะมีลักษณะการไหลภายในแผ่นไปตามแนวรัศมีของวงกลมจากที่ตำแหน่งบริเวณวงแหวนตรงศูนย์กลางไปยังที่ตำแหน่งบริเวณวงแหวนรอบๆด้านนอกของแผ่นเช่นเดียวกันกับทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่เมื่อทำการพิจารณาในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านในลักษณะที่มีทิศทางซึ่งตั้งฉากกับแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ ก็จะมีผลทำให้ทิศทางการไหลของกระแสเกิดมีลักษณะเอียงไปจากแนวเดิมหรือเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นเมื่อได้ทำการเปรียบเทียบกับทิศทางของรัศมีปกติ (ดูรูปที่ 2.8) จะเห็นได้ว่ามิติหรือรูปทรงที่เป็นวงแหวนในแผ่นคอร์บิโนนั้นจะทำให้ไม่มีบริเวณขอบที่เป็นพื้นที่ให้พาหะประจุหรืออนุภาคสามารถที่จะสะสมอยู่ได้เลยเหมือนกับในกรณีของแผ่นสารกึ่งตัวนำบาง [18,19] ที่มีขนาดยาวก่อนหน้านี้ ดังนั้นเมื่อไม่มีการสะสมของพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าเกิดขึ้นแล้วจึงเป็นสาเหตุทำให้สนามไฟฟ้าฮอลล์ก็จะไม่ปรากฏขึ้นมาด้วยทำให้ไม่มีแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ไปถ่วงดุลกับแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำ ส่งผลทำให้พาหะประจุหรืออนุภาคดังกล่าวถูกแรงทางแม่เหล็กมากระทำแต่เพียงอย่างเดียวเท่านั้นอันเป็นผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเส้นทางการเคลื่อนที่ซึ่งทำให้มีระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมจากเส้นทางปกติที่สั้นที่สุดนั่นเอง

หากลองทำการพิจารณาแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้นดังในรูปที่ 2.7 โดยเราสามารถที่จะมองเพื่อเปรียบเทียบเป็นแผ่นคอร์บิโนที่มีรัศมีขนาดใหญ่ไม่สิ้นสุด จะทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่เป็นพื้นที่บริเวณภายในของแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้น (A) ซึ่งมีระยะห่างจากบริเวณขอบด้านบนที่เป็นฉนวน (ib) ก็จะทำให้มีลักษณะที่เหมือนกับเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นคอร์ปิโนจริงๆ



รูปที่ 2.8 มิติหรือรูปทรงแผ่นคอร์ปิโน เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลมที่มีขั้วหนึ่งขั้วอยู่ตรงกลางและอีกขั้วอยู่ล้อมรอบเส้นรอบวงของแผ่น ในแผ่นคอร์ปิโนสนามไฟฟ้า E จะแผ่ตามรัศมีวงกลมโดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ส่วนความหนาแน่นกระแส J จะถูกทำให้เอียงตามมุมลอเรนซ์ θ_L

ดังนั้นจึงทำให้เราทราบได้ว่าในแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้นนั้นจะไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นได้จะมีก็เพียงแต่การเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสเกิดขึ้นแทนนั่นเองและการที่แรงดันไฟฟ้าฮอลล์นั้นไม่สามารถที่จะปรากฏขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้นได้นั้นซึ่งเราสามารถที่จะอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองวงจรไฟฟ้า ตามแบบจำลองที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นนี้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะไม่สามารถปรากฏขึ้นได้เพราะเนื่องมาจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางแม่เหล็ก (magnetic electromotive force) จะถูกตัดวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ของมันเอง

การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection)

ในลำดับต่อมาเราจะมาหาความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส ซึ่งเราจะทำการใช้ลักษณะการประมาณค่าดังที่เคยกล่าวเอาไว้ไปก่อนหน้านี้อีกครั้งนั่นก็คือเราจะไม่ทำการพิจารณาในส่วนของการเคลื่อนที่เชิงความร้อนของพาหะประจุและจะสมมุติว่าให้พาหะประจุหรืออนุภาคดังกล่าวนี้มีลักษณะของการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอภายใต้การกระทำของแรงลอเรนซ์ หากเราพิจารณาในสมการที่ (2.4) สามารถที่จะนำมาเขียนใหม่เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_L = -qE - q[v_d \times B] \quad (2.5)$$

ซึ่ง v_d หมายถึงความเร็วของพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนที่มีสาเหตุมาจากแรงลอเรนซ์ F_L

เพื่อต้องการที่จะทำให้การวิเคราะห์ในลำดับถัดไปมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น เราจึงจะดำเนินการแทนแรงลอเรนซ์ F_L ในสมการที่ (2.5) ให้มีค่าเทียบเท่ากับแรงทางไฟฟ้า $-qE$ เป็น

$$-qE = -qE - q[v_d \times B] \quad (2.6)$$

พาหะประจุหรืออนุภาคจะลอยเลื่อนเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าสมมูล (equivalent electric field) E ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่แรงลอเรนซ์กระทำ เมื่อนำ $-\mu n$ คูณทั้งสมการที่ (2.6) จะได้

$$J(B) = J(0) - \mu[J(B) \times B] \quad (2.7)$$

ซึ่ง $J(B)$ คือความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน B ตามลำดับ

$$J(B) = q\mu n E_e = \mu n F_E = -q n v_d \quad (2.8)$$

และ $J(0)$ คือความหนาแน่นของกระแสลอยเลื่อนอันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า E เมื่อ $B = 0$

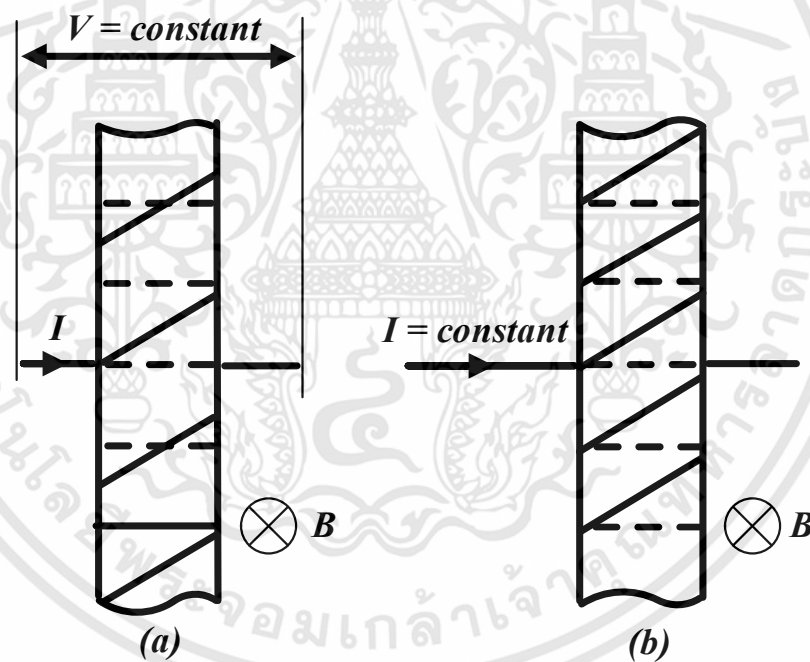
$$J(0) = q\mu n E \quad (2.9)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าภายนอก E จะมีทิศทางตามแนวแกน x ส่วนสนามแม่เหล็กจะมีทิศในแนวแกน y และกำหนดว่าให้สนามไฟฟ้าภายนอกและสนามแม่เหล็กดังกล่าวมีค่าคงที่ จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่สำคัญ ก็คือเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าภายนอก E และเวกเตอร์ของความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้น $J(B)$ ที่ไม่ได้อยู่ร่วมบนแนวแกนเดียวกัน ดังนั้นสำหรับในกรณีแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางซึ่งมีขนาดสั้นดังกล่าวนี้ สนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งผ่านเข้ามากระทำจะส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเส้นทางของกระแสจากเส้นทางปกติเดิมไปตามสนามไฟฟ้านั่นเอง

2.3.2 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็นผลที่เกิดมาจากสนามแม่เหล็กนั้นไหลผ่านเนื้อสารหรือวัสดุแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเนื้อสารหรือวัสดุขึ้น [20] จะเป็นในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีสำหรับที่วัสดุหรือเนื้อสารดังกล่าวไม่ใช่สารจำพวกแม่เหล็ก ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เองเป็นส่วนหนึ่งจากผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยรวมทั้งในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานดังที่กล่าวมานี้ก็ยังมีผลมาจากการเบี่ยงเบนของเส้นทางการไหลกระแสอีกด้วย โดยมันจะเกิดขึ้นเมื่อแรงเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าฮอลล์นั้นมีค่าที่น้อยกว่าแรงลอเรนซ์เหนี่ยวนำจากการที่สนามแม่เหล็กภายนอกนั้นพุ่งเข้ามากระทำกับพื้นผิวหรือตัดผ่านในทิศทางที่ตัดกับทิศทางการไหลกระแส ในสิ่งดังที่ได้กล่าวมานี้จะเกิดขึ้นเมื่อมิติหรือรูปทรงของแผ่นสารกึ่งตัวนำบางนั้นได้รับการออกแบบให้มีด้านยาวที่สั้นกว่าด้านกว้างสำหรับในทุกๆ ครั้ง มิติหรือรูปทรงในลักษณะดังที่ได้กล่าวมานี้เองมันจึงถูกเรียกกันว่า “รูปทรงแมกนีโตรีซิสแตนซ์” [21] ด้วยการที่กระแสเบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้นเป็นเส้นทางยาวก็จะส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความต้านทานอีกด้วย ซึ่งรูปร่างโดยทั่วไปของอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์นั้นจะเป็นการออกแบบในรูปทรงที่เป็นลักษณะวงกลมที่เรียกว่าคอร์บิโนดิสก์และรูปทรงที่เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมซึ่งมีด้านยาวที่สั้นกว่าด้านกว้าง ซึ่งก็ได้มีการกล่าวถึงเนื้อหาเอาไว้บ้างแล้วรวมทั้งลงถึงในรายละเอียดดังกล่าวในช่วงตอนกลางบท เมื่อทำการพิจารณาคูแผนภาพดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำบางที่มีขนาดสั้น กรณีที่ถูกป้อนด้วยแรงดันคงที่ (a) และ กรณีที่ถูกป้อนด้วยกระแสคงที่ (b) เส้นประคือเส้นกระแสที่ $B = 0$ ในขณะที่เส้นทึบแสดงถึงเส้นกระแสที่ $B \neq 0$

ทำให้เราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแส $J(B)$ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามากระทำหรือตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้จะมีขนาดที่น้อยกว่า $J(0)$ กรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำลักษณะบางที่มีขนาดสั้นดังกล่าว นั่นก็หมายความว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีติหรือรูปร่างมีขนาดสั้นสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำจะมีอิทธิพลทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เพิ่มเติมจากปรากฏการณ์ฮอลล์ [22] นั่นเอง โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลงอีกด้วย

จากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสซึ่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.9(a) จะเห็นได้ว่าเส้นทึบที่แสดงถึงความหนาแน่นกระแสเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามากระทำหรือตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้จะมีจำนวนเส้นที่น้อยกว่าเส้นประที่แสดงถึงความหนาแน่นกระแสเมื่อตอนที่ไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการที่จำนวนเส้นที่แสดงถึงความหนาแน่นกระแสมีปริมาณที่ลดลงหรือเกิดการลดทอนความหนาแน่นกระแสก็เป็นผลมาจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสนั้นเอง โดยเส้นความหนาแน่นกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนในบริเวณพื้นที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของแผ่นสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะที่ยาวเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ด้วยเส้นทางการไหลของกระแสที่ยาวเพิ่มมากขึ้นนี้เอง นั่นก็หมายความว่ามันจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเพิ่มขึ้นด้วยนั่นเอง ดังนั้นสำหรับในกรณีแผ่นสารกึ่งตัวนำที่ถูกไบอัสด้วยแรงดันคงที่ เมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านจะส่งผลทำให้กระแสที่ไหลผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวมีค่าที่ลดลง ในขณะที่แผ่นสารกึ่งตัวนำที่ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่ ดังในรูปที่ 2.10(b) จะเห็นได้ว่าเส้นทึบที่แสดงถึงความหนาแน่นกระแสเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำนั้นจะยังคงมีจำนวนเส้นที่เท่ากับกับเส้นประที่แสดงถึงความหนาแน่นกระแสตอนที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก แต่จะสังเกตเห็นว่าเส้นความหนาแน่นกระแสมีการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสที่ยาวเพิ่มมากกว่าเดิมปรากฏขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน สิ่งดังกล่าวนี้เองจึงส่งผลทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ในระดับที่สูงขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง

เพื่อต้องการที่จะทราบถึงความหนาแน่นกระแสที่ลดลงไปอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำนั้น เราจึงทำการพิจารณาในสมการที่ (2.7) สำหรับสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉาก $E \cdot B = 0$ ผลการพิจารณาของสมการที่ (2.7) จะได้ว่า

$$J(B) = \sigma_B E - \sigma_B \mu [E \times B] \quad (2.10)$$

โดยที่

$$\sigma_B = \frac{\sigma_0}{1 + (\mu B)^2} \quad (2.11)$$

ซึ่งในสมการที่ (2.11) ดังกล่าวนี้เป็นสภาพนำไฟฟ้ายังผล (effective conductivity) ของแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำ ส่วน σ_0 เป็นสภาพนำไฟฟ้ายังผลในตอนที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้ทราบว่าสัมประสิทธิ์ σ_B (ตั้งสมการ

ที่ (2.11)) จะเป็นการใช้ในกรณีสำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดสั้น เนื่องจากเราได้ทำการพิจารณา มิติหรือรูปร่างแผ่นกึ่งตัวนำที่มีขนาดสั้นโดยเสมือนว่าเป็นการหีบมาเพียงส่วนเล็กๆมาจากส่วนหนึ่งของแผ่นคอร์บิโน ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะเรียกสัมประสิทธิ์ σ_B ว่าเป็นสภาพนำไฟฟ้าของคอร์บิโน (Corbino conductivity) ได้อีกด้วยนั่นเอง

หากพิจารณาจากในสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11) ทำให้เราสามารถที่จะคาดคะเน ด้วยสมการดังกล่าวนี้ได้ว่าความหนาแน่นของกระแสภายในอุปกรณ์จะมีค่าที่ลดลงเมื่อสนามแม่เหล็ก มีค่าที่สูงขึ้น ดังนั้นถ้าหากแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามาตัดผ่านก็จะมีผลทำให้ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุจะมีค่าที่ลดลงนั่นเอง โดยสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อ สนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็นดังสมการที่ 2.12

$$\frac{\rho_B - \rho_0}{\rho_0} = (\mu B)^2 \quad (2.12)$$

ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าในวัสดุที่อยู่ภายใต้อิทธิของสนามแม่เหล็กนั้น จะถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์” โดยการเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ดังกล่าวนี้นั้นเป็นผลที่เกิดมาจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีมิติหรือ รูปร่างที่สั้น และการที่ใช้มิติหรือรูปทรงของอุปกรณ์มาเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพ ต้านทานทางไฟฟ้าในวัสดุดังกล่าวนี้ก็จะถูกเรียกกันว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์เชิง เรขาคณิต (geometrical magnetoresistance effect)” นั่นเอง [23]

2.3.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

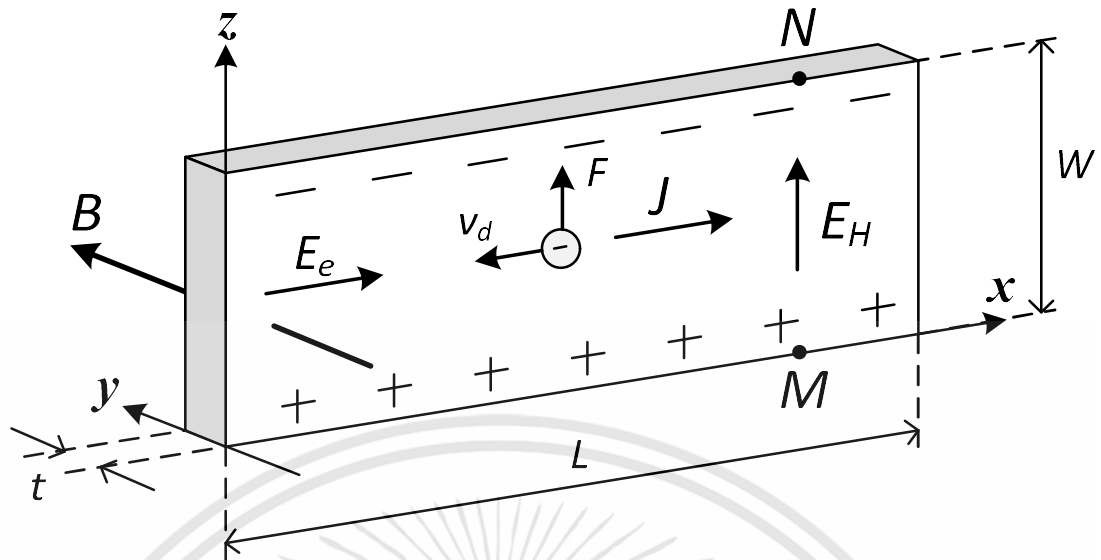
ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นอีกหนึ่งปรากฏการณ์ที่อยู่ในกลุ่มของปรากฏการณ์กัลวานโม่แมกเนติก ซึ่งถูกค้นพบโดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall) ในปี ค.ศ. 1879 ขณะที่เขากำลัง ศึกษาอยู่ในระดับปริญญาเอกอยู่ที่มหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปกินส์ ในบัลติมอร์ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเอ็ดวินฮอลล์ต้องการที่จะตรวจสอบความเป็นจริงของทฤษฎีที่เกี่ยวกับการไหลของอนุภาค อิเล็กตรอน ซึ่งเอ็ดวินฮอลล์ได้ค้นพบว่าเมื่อแท่งแม่เหล็กและแผ่นตัวนำนั้นถูกวางตรงกับตำแหน่งที่ สนามของแท่งแม่เหล็กดังกล่าวนี้ตั้งฉากอยู่กับระนาบพื้นผิวหน้าหนึ่งของแผ่นทองคำที่มีกระแสไฟฟ้า ไหลผ่าน ทำให้พาหะประจุถูกแรงแม่เหล็กผลักให้เกิดการเคลื่อนที่ไปอยู่ที่บริเวณขอบด้านหนึ่งของ ตัวนำ ส่วนพาหะประจุชนิดตรงกันข้ามนั้นก็จะถูกแรงแม่เหล็กผลักไปอยู่ที่บริเวณขอบด้านที่ตรงข้าม เช่นเดียวกัน นอกจากนั้นเขายังพบอีกด้วยว่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบทั้งสองของตัวนำ ดังกล่าวนี้อาจมีลักษณะแปรผันกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก การ ค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จึงเป็นที่มาของชื่อปรากฏการณ์ที่เรียกกันว่า “ปรากฏการณ์ฮอลล์”

นั่นเอง [24] ถึงแม้ว่าการทดลองของเอ็ดวินฮอลล์นั้นจะประสบความสำเร็จและได้รับการตอบรับเป็นอย่างดีแต่ก็ไม่ได้มีการนำมาใช้ในงานต่างๆ หลังจากที่ค้นพบผ่านมาประมาณ 70 ปี

ปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นได้เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมากกว่า 100 ปี แต่ได้มีการนำมาดัดแปลงเพื่อใช้งานเมื่อ 60 ปีที่ผ่านมาในการใช้งานภาคปฏิบัติเป็นครั้งแรกมีขึ้นเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1950 เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจจับความเข้มข้นแม่เหล็กของคลื่นไมโครเวฟ และต่อจากนั้นเมื่อเข้าสู่ยุคที่มีการผลิตสารกึ่งตัวนำขึ้นก็ได้มีความเป็นไปได้ที่จะนำปรากฏการณ์ฮอลล์ดังกล่าวนี้มาใช้ในงานต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยบริษัท Honeywell Micro Switch Sensing and Control ได้ทำการปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมการผลิตชิปบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ในปี ค.ศ.1968 โดยได้ดำเนินการเปิดตัวโซลิตสเตทชิปบอร์ด [25] ที่ใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในช่วงแรกๆนั้นขึ้นส่วนในการตรวจวัดโดยปรากฏการณ์ฮอลล์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องนั้นจะถูกประกอบรวมกันเป็นวงจรในรูปแบบวงจรรวม (Integrated circuit) หรือที่เราเรียกกันว่าไอซี (IC) วงจรเดียว รวมถึงในปัจจุบันอุปกรณ์ในการตรวจวัดด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์จะรวมอยู่ในอุปกรณ์ต่างๆมากมาย เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องเย็บผ้า รถยนต์ เครื่องบิน เครื่องจักรอุตสาหกรรม รวมถึงอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ดังนั้นสำหรับการศึกษาอุปกรณ์เซ็นเซอร์แม่เหล็กหรืออุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กประเภทโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์นั้นสามารถที่จะอธิบายการทำงานจากหลักการพื้นฐานปรากฏการณ์ฮอลล์ตลอดจนการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้โดยใช้รูปที่ 2.10

จากรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปทรงอุปกรณ์ฮอลล์เพลทหรืออาจเรียกว่าแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางและยาว ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความกว้าง w ความยาว l และความหนา t โดยรูปทรงดังกล่าวนี้จะมีค่าความยาวของแผ่น l มีค่าที่มากกว่าความกว้าง w เป็นอย่างมาก พิจารณาการเคลื่อนที่ของพาหะประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำ (รูปที่ 2.10) ซึ่งในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้เราสามารถที่จะละเลยอิทธิพลของขั้วไฟฟ้าที่ใช้บ่อนกระแสไฟฟ้าให้แก่แผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ได้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวนี้โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีระยะทางที่สั้นอย่างมากจึงไม่ส่งผลให้เกิดผลกระทบหรือหากมีการเกิดผลกระทบขึ้นก็จะส่งผลกระทบในเชิงปริมาณที่น้อยมากจนสามารถที่จะละเลยได้นั่นเอง โดยที่แผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n ดังกล่าวนี้มี พาหะข้างมาก (Majority carrier) คืออนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบและในส่วนของ พาหะข้างน้อย (Minority carrier) คืออนุภาคของโฮลที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นบวก ซึ่งเราจะไม่พิจารณาผลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยในแผ่นสารกึ่งตัวนำเพื่อความง่ายต่อการอธิบาย ในรูปที่ 2.10 E_o คือสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก, B คือความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กภายนอก, v_d คือความเร็วลอยเลื่อนของพาหะประจุ, F คือแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กภายนอก, J คือความหนาแน่นกระแส, และ E_H สนามไฟฟ้าฮอลล์ เมื่อนำแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือแผ่นฮอลล์เพลทดังกล่าวนี้ไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟภายนอกที่มีค่าความต่างศักย์คงที่อยู่ค่าหนึ่ง ทำให้บริเวณขอบของแผ่นฮอลล์เพลททั้งสองฝั่งในทิศทางตามแนวแกน x นั้นมีแรงดันตกคร่อมเกิดขึ้นเป็นผลทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Current density) J ไหลในทิศทางตามแนวแกน $+x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n

อันเป็นผลมาจากมีแรงกระทำต่อพาหะประจุของแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งพาหะข้างมากของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็คืออนุภาคอิเล็กตรอนที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบจากการได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก E_e ทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อนหรือความเร็วดริฟท์ (Drift velocity: v_d) ไปในทิศทางตามแนวแกน $-x$ ซึ่งเป็นทิศทางที่ตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกและทิศทางการไหลของความหนาแน่นกระแส หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบนั้นจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำ เพียงแต่ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนนั้นจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกับการไหลของกระแสและทิศทางของสนามไฟฟ้านั้นเอง จากนั้นเมื่อให้สนามแม่เหล็ก B พุ่งเข้าหาหรือตัดผ่านในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่ระนาบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ รวมถึงตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสด้วย จากในรูปที่ 2.10 ก็คือสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าหาหรือตัดผ่านตามแนวแกน y พบว่าจะเกิดแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กกระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแรงที่กระทำต่อพาหะประจุดังกล่าวนี้เรียกว่า “แรงลอเรนซ์” โดยจะมีผลทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนนั้นเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวปกติหรือแนวเดิมขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนในสภาวะปกติเมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำนั้นอนุภาคอิเล็กตรอนจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงในทิศทางตามแนวแกน $-x$ แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามามีผลกับแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวแรงลอเรนซ์จะผลักพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนให้มีลักษณะการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปสะสมอยู่ที่ด้านข้างหรือบริเวณขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำในทิศทางตามแนวแกน z ดังรูปที่ 2.10 ส่วนอีกฝั่งด้านตรงข้ามกันหรือบริเวณขอบด้านล่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำก็จะเกิดการสะสมของ

พาหะประจุประเกศตรงข้ามกันอีกประเกศหนึ่งซึ่งก็คืออนุภาคของโฮลที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นบวกด้วยเช่นกัน ดังนั้นการที่มีพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าต่างชนิดกันที่บริเวณขอบทั้งสองฝั่งด้านตรงข้ามกันของแผ่นสารกึ่งตัวนำนั้นจะเป็นสิ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น ที่เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field) E_H ในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบาง ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์ดังกล่าวนี้จะมีทิศทางตามแนวแกน z จากบริเวณขอบด้านล่างแผ่นสารกึ่งตัวนำไปยังขอบด้านบนแผ่นสารกึ่งตัวนำ โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์นี้จะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E มากระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะมีผลทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนนั้นถูกผลักไปในทิศทางบริเวณขอบด้านล่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำ และจะสังเกตเห็นได้ว่าแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนนั้นจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกับทิศทางของแรงที่กระทำต่อพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กภายนอกอีกด้วย ค่าของแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับสมการที่ (2.13)

$$\vec{F}_E = q\vec{E}_H \quad (2.13)$$

นอกจากนั้นยังทำให้ทราบว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบางดังกล่าวนี้จะมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ดังสมการที่ (2.14) นี้อีกด้วย

$$E_H = \frac{V_H}{w} \quad (2.14)$$

โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ซึ่งที่เรียกกันว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall potential difference หรือ Hall voltage) หรือ แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ V_H นั้นทำให้เรายังพบอีกว่าความต่างศักย์ฮอลล์หรือแรงดันไฟฟ้าฮอลล์นี้จะมีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำที่มีลักษณะบางดังกล่าวนี้ทำจากวัสดุประเกศสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน และเจอร์เมเนียม เป็นต้น ส่วนวัสดุจำพวกประเกศตัวนำไฟฟ้าที่ตินั้นจะให้ผลลัพธ์ของค่าความต่างศักย์ฮอลล์หรือแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ค่าน้อยกว่าเป็นอย่างมากเลยทีเดียว

พิจารณาจากรูปที่ 2.10 เมื่อกำหนดให้สนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกนั้นมีทิศทางตามแนวแกน x ($E_e = E_x, 0, 0$) ซึ่งมีทิศทางเดียวกันกับการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำและในส่วนของสนามแม่เหล็กนั้นจะมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามากระทำกับแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าว ดังนั้นหากพิจารณาแรงลอเรนซ์ดังสมการที่ (2.4) จะพบว่าเหลือเพียงในส่วนเทอมแรกด้านขวามือของสมการเท่านั้น ซึ่งก็คือในเทอมของแรงทางไฟฟ้า โดยแรงทางไฟฟ้านี้จะทำให้พาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าจะลอยเลื่อนไปตามแผ่นสารกึ่งตัวนำใน

ทิศทางตามแนวแกน $-x$ โดยความเร็วลอยเลื่อนของพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสามารถที่จะหาได้จากสมการที่ (2.15)

$$v_d = \mu_n E_e \quad (2.15)$$

ซึ่ง μ_n คือสภาพความคล่องตัวของพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด n ดังนั้นทำให้เราสามารถที่จะทราบได้ถึงค่าความหนาแน่นของกระแสได้โดยจะหาได้ด้วยสมการที่ (2.16)

$$J = qn v_d \quad (2.16)$$

จากนั้นนำสมการที่ (2.15) มาแทนลงในสมการที่ (2.16) จะได้สมการความหนาแน่นของกระแสดังกล่าว

$$J = q\mu_n n E_e \quad (2.17)$$

ซึ่ง n แทนความหนาแน่นของพาหะประจุซึ่งก็คืออนุภาคอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด n

ดังนั้นเราจึงสามารถทำการระบุความไว (sensitivity) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันได้ตามสมการ ซึ่งความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ก็คือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งเข้ามากระทำกับพื้นผิวของอุปกรณ์หรือตัดผ่านตัวอุปกรณ์ไปโดยอยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตได้มากน้อยเพียงใดนั่นเอง

2.4 ทฤษฎีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ สภาพความต้านทาน และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า

วัสดุ (Materials) คือ สสารที่ประกอบและทำขึ้นด้วยสารต่างๆบางอย่างซึ่งเป็นสารในทางเคมี ทั้งที่เป็นวัสดุที่ได้จากการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือที่ได้จากการที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นจากทรัพยากรธรรมชาติ ซึ่งมนุษย์ได้นำมาประกอบขึ้นหรือผลิตขึ้นเพื่อต้องการที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์, เครื่องมือเครื่องใช้, สิ่งประดิษฐ์และสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ เป็นต้น โดยคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุดังกล่าวนี้ถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุเพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานนั้นๆ จึงเป็นสาเหตุหลักที่จำเป็นจะต้องศึกษาเรียนรู้และให้เข้าใจเสียก่อนเพื่อนำไปพิจารณาจากสมบัติของวัสดุนั้นให้มันตรงกับงานที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้นั่นเอง ซึ่งในวัสดุแต่ละประเภทนั้นก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปอีกด้วย อันได้แก่ สมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ, สมบัติความแข็งของวัสดุ, สมบัติความเหนียวของวัสดุ, สมบัติการนำความร้อนของวัสดุ และสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

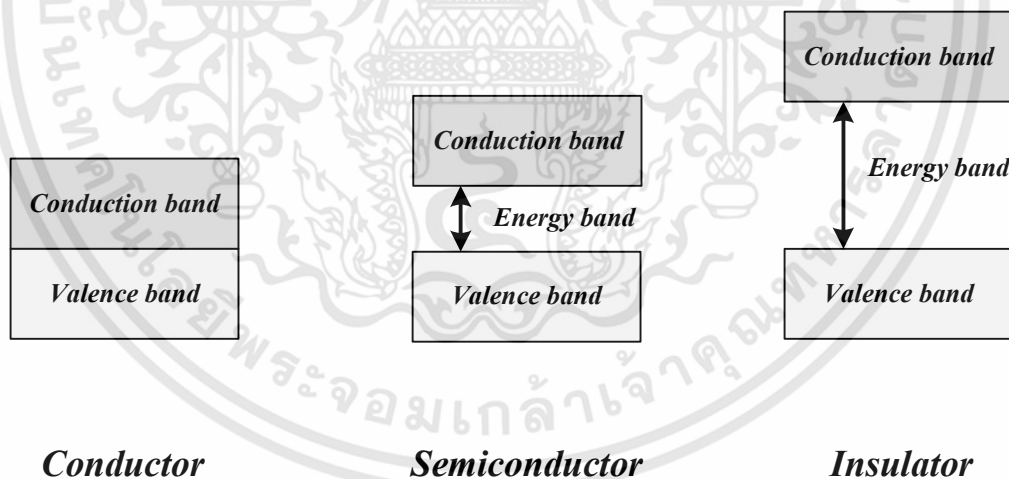
การนำไฟฟ้าของวัสดุ หากนำเอาคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุมาทำการพิจารณาแล้วจะทำให้เราสามารถที่จะแบ่งวัสดุสารออกได้เป็นส่วนย่อยอีก 3 ประเภท คือ ตัวนำ, สารกึ่งตัวนำ และฉนวน โดยวัสดุที่ยอมให้กระแสไฟฟ้านั้นสามารถที่จะไหลผ่านได้อย่างง่ายดาย หรืออาจจะกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า วัสดุดังกล่าวนี้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่ต่ำเป็นอย่างมากนั้น จึงเรียกวัดวัสดุตัวกลางที่มีคุณสมบัติในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า ตัวนำทางไฟฟ้า (Conductor) ในขณะที่ยังมีวัสดุอีกลักษณะหนึ่งซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้านั้นสามารถที่จะไหลผ่านไปได้อย่างง่ายดายหรือมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่สูงเป็นอย่างมากจึงส่งผลทำให้สามารถที่จะต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าไม่ให้ผ่านไปได้นั่นเอง วัสดุตัวกลางที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จึงถูกเรียกว่า ฉนวนทางไฟฟ้า (Insulator) และในส่วน of วัสดุตัวกลางที่เรียกกันว่า สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) นั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำทางไฟฟ้าและฉนวนทางไฟฟ้า กล่าวคือ ในบางสภาวะนั้นสามารถที่จะทำตัวเป็นฉนวนทางไฟฟ้าได้และบางสภาวะก็สามารถที่จะทำตัวเป็นตัวนำทางไฟฟ้าได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งในคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นนี้เองทำให้วัสดุตัวกลางประเภทสารกึ่งตัวนำจึงได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการทำเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังตัวอย่างเช่น ไดโอด และ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยเนื้อหาในส่วนดังกล่าวนี้จะขอกกล่าวถึงแต่เพียงวัสดุที่เป็นเฉพาะประเภทสารกึ่งตัวนำเท่านั้นเนื่องจากเป็นวัสดุตัวกลางที่ได้ทำการเลือกเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษาค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ไมโครเซ็นเซอร์แม่เหล็ก [26] นั่นเอง

2.4.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่สูงกว่าไดอิเล็กทริกหรือวัสดุที่เป็นฉนวนแต่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าวัสดุที่เป็นตัวนำ โดยวัสดุสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้รวมไปถึงเป็นวัสดุที่ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นเวเฟอร์เพื่อที่จะนำมาสร้างเป็นวงจรรวม (IC) นั่นก็คือ ซิลิคอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้สามารถที่จะทำการศึกษาร่วมกับทำความเข้าใจได้จากพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนที่โคจรรอบๆนิวเคลียสได้ โดยในแต่ละวงโคจรที่มีอิเล็กตรอนอาศัยอยู่นั้นก็จะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละระดับชั้นอีกด้วย ซึ่งเราจึงอาจจะศึกษาอนุภาคอิเล็กตรอนได้ด้วยการศึกษาจากพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นวงโคจร จากการศึกษาในแง่ของพลังงานจึงเป็นที่มาของชื่อที่เรียกว่า ระดับพลังงาน (Energy level) ซึ่งในการวาดรูปโครงสร้างของอะตอมโดยมีนิวเคลียสอยู่ตรงกลางและมีอิเล็กตรอนโคจรเป็นวงกลมอยู่โดยรอบนั้น เป็นวิธีการที่จะต้องใช้ทักษะฝีมือด้านการวาดค่อนข้างที่จะยุ่งยากและต้องใช้เวลาพอสมควร ด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้มีการทำการดัดแปลงให้มีรูปแบบที่ดูสะดวกและง่ายมากขึ้น โดยการวาดระดับชั้นวงโคจรที่อยู่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุดให้กลายมาเป็นเส้นตรงอยู่ตรงตำแหน่งต่ำที่สุด ส่วนในระดับชั้นวงโคจรที่ห่างจากนิวเคลียสออกไปก็จะถูกวาดให้กลายมาเป็นเส้นตรงที่อยู่สูงขึ้นมาเรียงตามลำดับไป จนกระทั่งถึง

ระดับชั้นวงโคจรที่อนุภาคอิเล็กตรอนนั้นสามารถที่จะหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระได้ จึงเรียกรูปดังกล่าวนี้ว่า ไดอะแกรมระดับพลังงาน (Energy level diagram)

จากลักษณะของอะตอมที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้เป็นอะตอมที่อยู่โดดเดี่ยวเพียงแค่อะตอมเดี่ยวเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วถ้าหากในกรณีที่อะตอมดังกล่าวนี้มีลักษณะอยู่รวมกันอย่างใกล้ชิดกันมาก ดังเช่น อะตอมของวัสดุสารที่เป็นสถานะของแข็งนั้น ซึ่งแรงที่กระทำให้อะตอมดังกล่าวนี้อยู่รวมกันได้จะส่งผลทำให้การประพุดตัวของอนุภาคอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปรวมไปถึงยังทำให้ระดับพลังงานของอะตอมแทนที่จะเป็นเพียงแค่ค่าเดียวกลับแตกออกมาเป็นช่วงพลังงานที่เรียกว่า แถบพลังงาน (Energy band) โดยในแต่ละแถบพลังงานดังกล่าวนี้ก็จะจะมีพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนอาศัยอยู่จำนวนหลายตัวเช่นกัน ในลักษณะแถบพลังงานโดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วย แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ซึ่งมีความกว้างไม่เกินประมาณ 4eV กันระหว่างแถบทั้งสองนี้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11 ประกอบ หน่วยของพลังงานจะเป็นหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์ (Electron volt : eV) ซึ่งมีความหมายถึงพลังงานที่ใช้งานในการทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหนึ่งตัวเคลื่อนที่ผ่านสนามศักย์ไฟฟ้าขนาด 1 โวลต์ จากนั้นเมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนดังกล่าวนี้ที่อาศัยอยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานในปริมาณที่มากพอ ก็จะสามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำและส่งผลทำให้เกิดการนำกระแสได้นั่นเอง ดังสามารถที่จะพิจารณาจากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram)



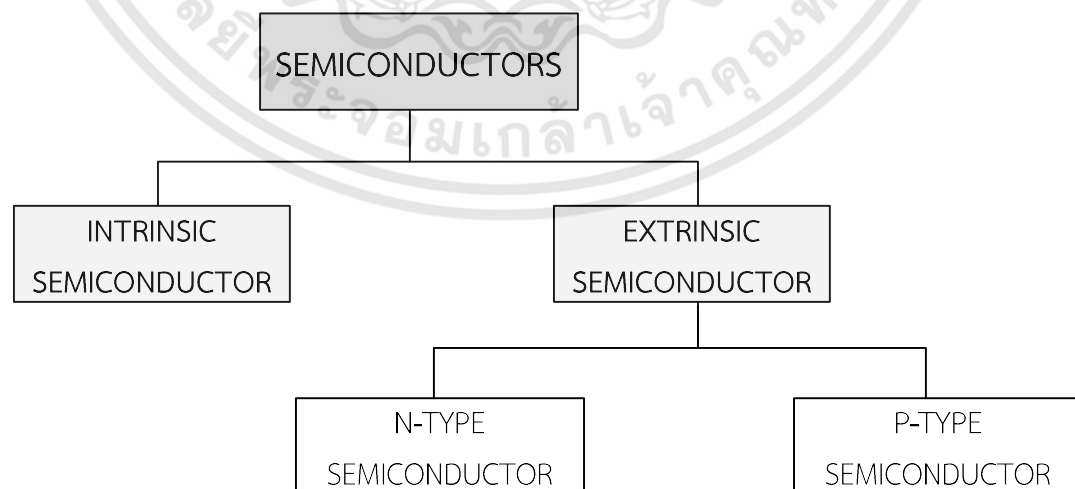
รูปที่ 2.11 ลักษณะช่องว่างและแถบพลังงานของสารที่เป็นตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน

แถบพลังงานที่อยู่ในตำแหน่งด้านบนสุดมีชื่อที่เรียกกันว่า แถบพลังงานนำ (Conduction energy band) หรือเรียกกันสั้นๆว่า แถบนำ (Conduction band) โดยพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบนำดังกล่าวนี้สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้จึงส่งผลทำให้สามารถที่จะนำไฟฟ้า

ได้นั่นเอง ดังนั้นสารประเภทใดก็ตามที่มีอนุภาคอิเล็กตรอนในแถบนำดังกล่าวนี้ในปริมาณที่มาก สารประเภทนั้นก็จะถือได้ว่าเป็นตัวนำที่ดีด้วย

ในส่วนของแถบพลังงานที่อยู่ในตำแหน่งลำดับถัดมาก็คือแถบพลังงานที่อยู่ใต้แถบนำจะเป็นแถบพลังงานห้าม (Forbidden energy band) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ซึ่งในตำแหน่งบริเวณแถบช่องว่างพลังงานนี้จะไม่มีการประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนอาศัยอยู่เลย จะเป็นบริเวณที่อนุภาคอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้เพียงอย่างเดียวแต่จะอาศัยอยู่ในบริเวณแถบพลังงานดังกล่าวไม่ได้

ถัดจากแถบช่องว่างพลังงานในลำดับต่อลงมาก็จะเป็นแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence energy band) หรือที่เรียกกันสั้นๆว่า แถบวาเลนซ์ (Valence band) ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกสุดของอะตอมจากที่มีอยู่จำนวนมากมาย เมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบวาเลนซ์ดังกล่าวนี้ได้รับพลังงานในระดับที่พอเหมาะ ก็จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนนี้สามารถที่จะเคลื่อนที่ข้ามแถบช่องว่างพลังงานไปยังแถบนำได้ โดยพลังงานในระดับที่พอเหมาะนี้จะต้องมีค่าที่มากกว่าความกว้างของแถบช่องว่างพลังงาน ดังนั้น ความกว้างของแถบช่องว่างพลังงานนี้เองจึงเป็นตัวกำหนดจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนในแถบนำ ซึ่งถ้าหากว่าแถบช่องว่างพลังงานมีขนาดความกว้างที่มาก อนุภาคอิเล็กตรอนที่จะข้ามเข้ามาสู่ภายในแถบนำไปได้นั้นก็จะมีปริมาณที่น้อยด้วย แต่ถ้าหากแถบช่องว่างพลังงานมีขนาดที่แคบ อนุภาคอิเล็กตรอนที่จะข้ามเข้าไปสู่ภายในแถบนำก็จะมีปริมาณที่มากด้วยนั่นเอง เนื่องจากว่าอนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบนำนั้นเป็นอนุภาคอิเล็กตรอนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จึงทำให้เราทราบว่า การนำไฟฟ้าได้ดีหรือไม่ดีนั้นจึงขึ้นอยู่กับปริมาณพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบนำนั้นก็คือ ความกว้างของแถบช่องว่างพลังงานของสารนั้นก็เป็นตัวบ่งชี้ด้วยว่าสารนั้นเป็นตัวนำ (Conductor) ฉนวน (Insulator) หรือ สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) อีกด้วย



รูปที่ 2.12 สารกึ่งตัวนำและการจำแนกประเภทของสารสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ยังสามารถที่จะถูกแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ชนิด นั่นก็คือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) และ สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) โดยสามารถที่จะพิจารณาได้จากรูปที่ 2.12 ประกอบการอธิบายพร้อมกับการทำความเข้าใจ

2.4.1.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่นำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดในการผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั่นก็คือ ซิลิคอน และ เจอร์เมเนียม ซึ่งธาตุทั้งสองนี้อยู่ในแถวที่ 4 ของตารางธาตุ มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่จำนวน 4 ตัว ในที่สภาวะปกติทั่วไปจะอยู่ในรูปของโครงสร้างที่เป็นลักษณะผลึกเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) โดยที่อะตอมตัวหนึ่งของสารกึ่งตัวนำนั้นจะไปจับกับอะตอมอื่นที่อยู่บริเวณรอบข้างเคียงกันอีกจำนวน 4 อะตอม เพื่อให้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนครบจำนวน 8 ตัว เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันของอะตอมซึ่งการรวมตัวกันในลักษณะดังกล่าวนี้เป็นแบบโควาเลนต์ (Covalent) หรือที่เรียกกันว่า เป็นการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นอนุภาคอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำจึงมีลักษณะของการยึดเหนี่ยวกันที่แน่นเป็นอย่างมากกับอะตอม จึงเป็นสาเหตุที่ว่าสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์นั้นถึงมีคุณสมบัติทางความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่าที่ควรนั่นเอง แต่ถึงอย่างไรก็ตามถ้าหากทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะมีผลทำให้ผลึกที่เป็นโครงสร้างภายในเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นจากพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวและทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่หลุดออกจากพันธะโควาเลนต์กลายเป็นอนุภาคอิเล็กตรอนอิสระและสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำได้ เนื่องจากช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นั้นมีขนาดของความกว้างไม่มากนัก จึงไม่จำเป็นที่จะต้องให้พลังงานที่สูงมากนักแก่อนุภาคอิเล็กตรอน อนุภาคอิเล็กตรอนก็สามารถที่จะเคลื่อนที่ไปยังแถบนำได้ ซึ่งการเคลื่อนที่ของวาเลนซ์อิเล็กตรอนแต่ละตัวก็จะทำให้เกิดโฮล (Hole) ปรากฏขึ้นด้วย ซึ่งการที่พาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำนั้นจะทำให้เกิดโฮลขึ้นในแถบวาเลนซ์ ซึ่งโฮลที่เกิดปรากฏขึ้นนี้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและเกิดอนุภาคอิเล็กตรอนในแถบนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าการเกิดหรือการปรากฏขึ้นนั้นจะเป็นลักษณะของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pair) ดังนั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จึงมีพาหะประจุนำไฟฟ้าอยู่ 2 ชนิด ก็คือ อิเล็กตรอนและโฮล นั่นเอง

2.4.1.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

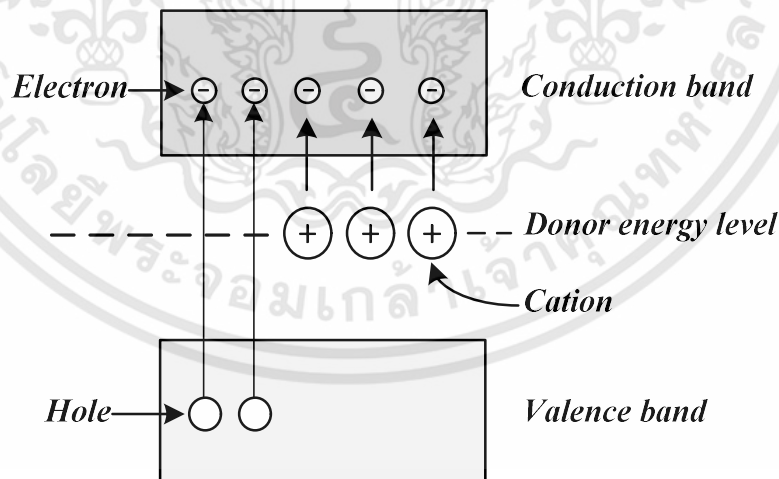
ปริมาณพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากพลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิกำหนดหนึ่งหรือจากพลังงานแสงสว่างนั้น ยังคงมีจำนวนที่น้อยเกินไปทำให้สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่าที่ควรสักเท่าไร ในทางปฏิบัติจึงได้ทำการเติมอะตอมอื่น ๆ ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 หรือ 5 ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เพื่อต้องการที่จะทำให้ปริมาณพาหะประจุของอนุภาคอิเล็กตรอนและโฮลมีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้น โดยอะตอมที่ได้ทำการเติมลงไปนั้นมีชื่อเรียกกันว่า อะตอมสารเจือ (Impurity atom) ส่วนการเติมสารเจือ ก็จะถูกเรียกว่า การโด๊ป (Doping) ซึ่งสารกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำที่มีอะตอมสารเจือถูกเจือปนอยู่ด้วยนั้น ได้ถูกเรียกกันว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) หรือสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยสารเจือ (Doping semiconductor) โดยสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ก็คือ สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีอนุภาคของอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมาก และสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (P-type semiconductor) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีอนุภาคของโฮลเป็นจำนวนมาก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น คือ สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะประจุลบมากกว่าพาหะประจุบวก เพราะมีอนุภาคอิเล็กตรอนเพิ่มเติมขึ้นมาจากการที่ได้ทำการเติมสารเจือนั่นเอง ซึ่งเป็นสิ่งที่เกิดมาจากการเติมอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว ตัวอย่างเช่น ฟอสฟอรัส (P), แอนติโมนีหรือพลวง (Sb), หรือเป็น อาร์เซนิก (As) ถูกเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ซิลิคอน (Si) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว จากนั้นอิเล็กตรอนจากทั้งสองอะตอมก็จะจับคู่กันด้วยพันธะโควาเลนต์ 4 พันธะ และจะเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสารเจืออยู่ 1 ตัว ดังดูกับนิวเคลียสอย่างหลวมๆ ด้วยพลังงานพันธะอยู่ค่าหนึ่ง แต่ถ้าหากเมื่อใดก็ตามที่มีพลังงานเพิ่มเข้ามาอีกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนของสารเจือที่เหลืออยู่ 1 ตัวนั้นสามารถที่จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระรวมทั้งสามารถที่จะนำกระแสได้อีกด้วย เราจึงเรียกอะตอมสารเจือที่สามารถให้อนุภาคอิเล็กตรอนได้นั้นว่า อะตอมผู้ให้ (Donor atom) โดยมีระดับพลังงานอยู่ที่ใต้แถบนำ ซึ่งเรียกว่า ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (Donor energy level : E_d) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.13 ประกอบ



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

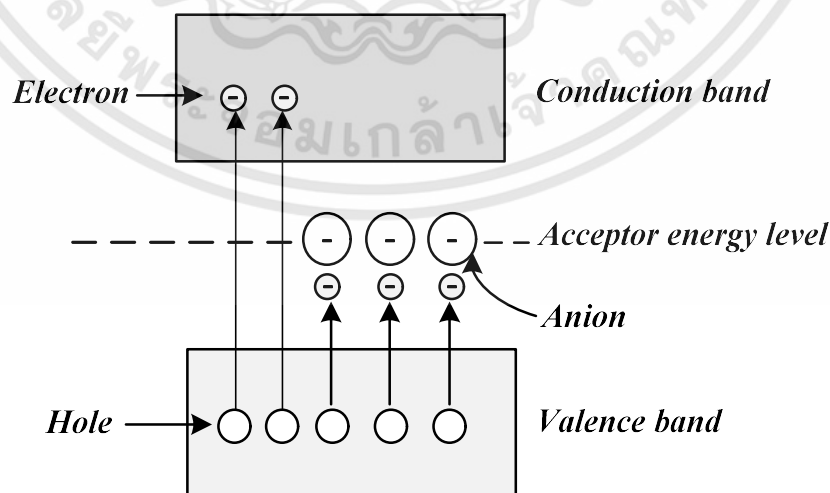
โดยส่วนใหญ่แล้วอะตอมสารเจือมักจะเป็นประเภทสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเพราะว่ามีอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะของประจุลบอยู่มาก แต่ถึงอย่างไรก็ตามในแถบวาเลนซ์ก็ยังคงมีอนุภาคโฮลอยู่บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีอนุภาคอิเล็กตรอนในแถบนำเป็นพาหะส่วนใหญ่หรือพาหะข้างมาก (Majority carrier) และมีอนุภาคโฮลในแถบวาเลนซ์เป็นพาหะส่วนน้อยหรือพาหะข้างน้อย (Minority carrier) นั่นเอง

สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี คือ สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะประจุบวกมากกว่าพาหะประจุลบ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ได้มีการเติมสารเจือของธาตุที่อยู่ในหมู่ 3A ซึ่งเป็นอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนของสารเจืออยู่ 3 ตัว ตัวอย่างเช่น โบรอน (B) อินเดียม (In) หรือเป็น อลูมิเนียม (Al) เติมลงไปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนบริสุทธิ์ จากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนของอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่ 3 ตัวของสารเจือเข้าจับคู่กับกับอิเล็กตรอนของอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่ 4 ตัวของซิลิคอนบริสุทธิ์ด้วยพันธะโควาเลนซ์ 3 พันธะ จะทำให้เหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิคอนบริสุทธิ์อยู่ 1 ตัว ที่ไม่ได้มีคู่จับด้วยหรือกล่าวได้ว่าเป็นการเกิดโฮลปรากฏขึ้น 1 โฮลภายในโครงสร้างและพร้อมที่จะรับอนุภาคอิเล็กตรอนเข้ามา เราจึงเรียกอะตอมสารเจือที่สามารถรับอนุภาคอิเล็กตรอนเข้ามานั้นว่า อะตอมผู้รับ (Acceptor atom) โดยมีระดับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียงแค่อิเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่า ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (Acceptor energy level : E_a) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.14 ประกอบ โดยที่พาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบวาเลนซ์นั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในระดับพลังงานของอะตอมผู้รับดังกล่าวนี้ได้ง่ายกว่าที่จะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในแถบนำ เนื่องจากใช้พลังงานที่น้อยกว่าการที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบวาเลนซ์นั้นจะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ภายในแถบนำอย่างทันทีเลย เมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนที่ออกไปจากแถบวาเลนซ์แล้วก็จะทำให้เกิดโฮลปรากฏขึ้นมาที่มีลักษณะเสมือนหนึ่งว่าเป็นสภาพเคลื่อนที่ได้ซึ่งทำให้มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพีนั่นเอง



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

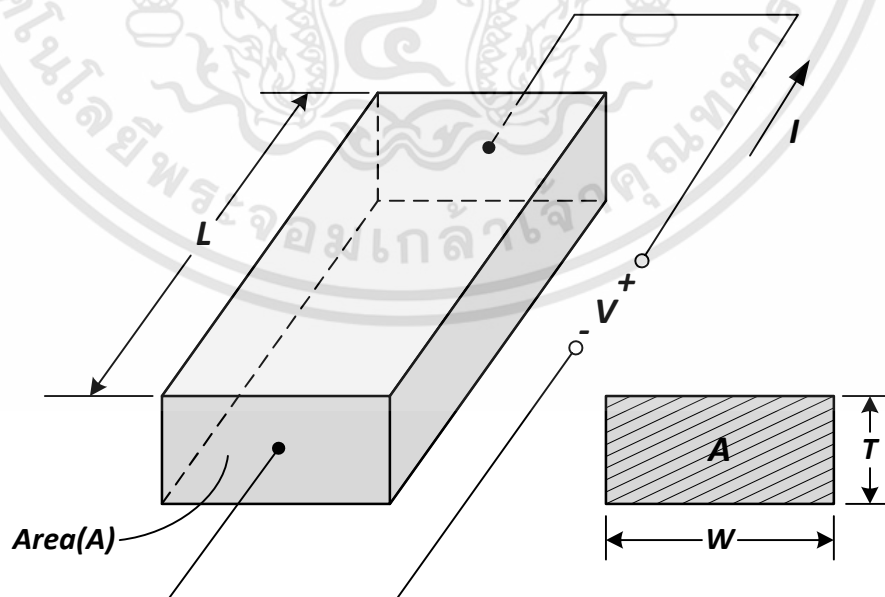
ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีพาหะส่วนใหญ่หรือพาหะข้างมาก (Majority carrier) เป็นโฮลและมีพาหะส่วนน้อยหรือพาหะข้างน้อย (Minority carrier) เป็นอนุภาคอิเล็กตรอนนั่นเอง

2.4.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นในสารกึ่งตัวนำที่ควรจะต้องทราบนั้นก็ประกอบไปด้วย สภาพนำทางไฟฟ้า, สภาพต้านทานทางไฟฟ้า, สภาพความคล่องตัวของพาหะ และความหนาแน่นของพาหะ ซึ่งสามารถที่จะหาได้จากปรากฏการณ์กัลวานโวมกเนติกหรือในปัจจุบันที่รู้จักกันด้วยการใช้วิธีทางปรากฏการณ์ฮอลล์นั่นเอง

2.4.2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ

จากที่เคยได้กล่าวเอาไว้ในเบื้องต้นให้ทราบแล้วว่าในสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีพาหะประจุอยู่ 2 ชนิด ก็คือ พาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนและพาหะประจุที่เป็นโฮล ซึ่งทั้งอิเล็กตรอนและโฮลนี้เองที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดภายในสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้เป็นอย่างมาก พิจารณาในกรณีที่มีสนามไฟฟ้าจากภายนอกจ่ายเข้าไปในแท่งสารกึ่งตัวนำดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.15 ประกอบ พาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนที่อาศัยอยู่ในแถบนำนั้นจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าง่ายๆนี้ด้วยการเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะประจุหรืออนุภาคอิเล็กตรอนขึ้นส่งผลทำให้กลายมาเป็นการไหลของกระแสไฟฟ้าปรากฏอยู่ในสารกึ่งตัวนำนั่นเอง ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในแท่งสารกึ่งตัวนำที่มีสถานะเป็นของแข็งและมีความต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายทั้งสองของแท่งสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.15 ลักษณะรูปร่างและขนาดของแท่งสารกึ่งตัวนำเมื่อทำเป็นตัวต้านทานแบบง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่ตำแหน่งบริเวณแห่งสารกึ่งตัวนำทั้งสองด้านนี้ โดยปกติแล้วปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลหรือที่เรียกกันว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) นอกจากจะขึ้นกับปริมาณพาหะประจุทั้งสองชนิดดังที่เคยได้กล่าวเอาไว้แล้วนั้น ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆในลักษณะที่สัมพันธ์กับค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity), สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) และสนามไฟฟ้า (Electric field) จากแหล่งจ่ายภายนอกที่จ่ายเข้าไปในแห่งสารกึ่งตัวนำอีกด้วย ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.18

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} \quad (2.18)$$

เมื่อ J คือ ความหนาแน่นกระแส, σ คือ สภาพนำไฟฟ้า, E คือ สนามไฟฟ้า และ ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า หรือหากจะกล่าวในมุมของสภาพนำไฟฟ้าก็คืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อสนามไฟฟ้าจะเป็นค่าคงตัวสำหรับวัสดุบางชนิด $\sigma = (J/E)$ ดังนั้น สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอันเนื่องมาจากพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนในแถบนำ ดังแสดงในสมการที่ 2.19

$$\sigma_n = n\mu_n q \quad (2.19)$$

เมื่อ σ_n คือ สภาพนำไฟฟ้าของพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอน, n คือ จำนวนพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอน, μ_n คือ สภาพความคล่องตัวหรือสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอน และ q คือ ค่าของพาหะประจุอิเล็กตรอนเป็นค่าคงที่ เท่ากับ $-1.602176565 \times 10^{-19}$ คูลอมบ์ และสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอันเนื่องมาจากพาหะประจุที่เป็นโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.20

$$\sigma_p = p\mu_p q \quad (2.20)$$

เมื่อ σ_p คือ สภาพนำไฟฟ้าของพาหะประจุที่เป็นโฮล, p คือ จำนวนพาหะประจุที่เป็นโฮล, μ_p คือ สภาพความคล่องตัวหรือสภาพเคลื่อนที่ได้ของพาหะประจุที่เป็นโฮล ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอันเนื่องมาจากพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮล คือ

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = (n\mu_n + p\mu_p)q \quad (2.21)$$

สำหรับในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) จำนวนพาหะประจุของโฮลจะเท่ากับจำนวนพาหะประจุของอิเล็กตรอน เนื่องจากโฮลเกิดจากการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากอะตอมสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ด้วยดั่งสมการที่ 2.22

$$n = p = n_i \quad (2.22)$$

เมื่อ n_i คือ ปริมาณของพาหะประจุ (โฮล หรือ อิเล็กตรอน) ภายในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

$$\sigma = q(\mu_n + \mu_p)n_i \quad (2.23)$$

ส่วนสำหรับในสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (N-type semiconductor) นั้นเป็นที่ทราบกันดีในเบื้องต้นแล้วว่า จำนวนพาหะประจุของอิเล็กตรอนมีมากกว่าจำนวนพาหะประจุของโฮลเป็นอย่างมาก ($n \gg p$) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำดังกล่าวจึงมีค่าเป็นดั่งสมการที่ 2.24

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \cong q\mu_n n \quad (2.24)$$

หากพิจารณาจากสมการที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าเป็นสมการที่แสดงกฎของโอห์ม (Ohm's law) จากรูปที่ 2.15 แสดงถึงมิติรูปร่างและขนาดของแท่งสารกึ่งตัวนำเมื่อทำเป็นตัวต้านทานแบบง่ายพร้อมทั้งนำมาพิจารณาเพื่อต้องการทราบถึงสภาพต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ โดยทำการนำแท่งสารกึ่งตัวนำต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดขวางคงที่ (A) ความหนาแน่นกระแสภายในแท่งสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับ

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.25)$$

และจากการที่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของแท่งสารกึ่งตัวนำนั้นส่งผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในแท่งสารกึ่งตัวนำด้วย ถ้ากำหนดให้ ΔV เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ ที่มีความยาว L และพื้นที่หน้าตัด A ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าในแท่งสารกึ่งตัวนำจะเป็น

$$E = \frac{\Delta V}{L} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.18 สามารถที่จะเขียนสมการใหม่ได้โดยการนำสมการที่ 2.25 และสมการที่ 2.26 แทนลงไป

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{\Delta V}{L} \right) \quad (2.27)$$

และดำเนินการจัดรูปสมการจะได้

$$\Delta V = I \left(\frac{L}{\sigma A} \right) = I \left(\rho \frac{L}{A} \right) \quad (2.28)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าในสมการที่ 2.28 นั่นก็คือ กฎของโอห์มโดยทั่วไป และสมการความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำที่มีความยาว L คือ

$$\frac{\Delta V}{I} = \rho \frac{L}{A} = R \quad (2.29)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.29 สามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าคุณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของแท่งสารกึ่งตัวนำจะแปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำนั้น โดยค่าคงที่ของการแปรผันดังกล่าวนี้เองมีชื่อเรียกกันว่า “ค่าความต้านทาน (Resistance)” มีหน่วยตามระบบเอสไอเป็น โวลต์ต่อแอมแปร์ (Volt/Amps) โดย 1 Volt/Amps ถูกกำหนดให้เป็น 1 โอห์ม (Ohms ; Ω) ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ผู้ค้นพบก็คือ จอร์จ ซิมอน โอห์ม (Georg Simon Ohm) และเรียกความสัมพันธ์ตามสมการ 2.29 นี้ว่า กฎของโอห์ม (Ohm's law) เมื่อแท่งสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่ภาคตัดขวาง A มีค่าเท่ากับ $W \cdot T$ และ $\rho = 1/\sigma$ จากสมการที่ 2.29 จึงสามารถที่จะเขียนเป็นสมการใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{\rho \cdot L}{T \cdot W} = \frac{1}{\sigma \cdot T} \cdot \frac{L}{W} \quad (2.30)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้า , L คือ ขนาดของความยาว , W คือ ขนาดของความกว้าง และ T คือ ขนาดของความสูงหรือความหนา

ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุแท่งสารกึ่งตัวนำและรูปทรงของวัสดุแท่งสารกึ่งตัวนำ ซึ่งวัสดุที่เป็นชนิดหรือประเภทเดียวกันก็จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เท่ากันด้วย ซึ่งความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ส่วนสภาพต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์มเซนติเมตร ($\Omega \cdot cm$) และ สภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นต่อโอห์มเซนติเมตร ($\Omega \cdot cm$)⁻¹ หรืออาจเรียกว่า ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm)

2.4.2.2 ความคล่องตัวของพาหะ (Mobility ; μ)

สภาพความคล่องตัวของพาหะ (Mobility) ดังกล่าวนี้เป็นอัตราส่วนของความเร็วลอยเลื่อน (Drift velocity) กับสนามไฟฟ้า E ดังแสดงในสมการที่ 2.31

$$\mu = \frac{v_{drift}}{E} \quad (2.31)$$

โดยที่ค่าความคล่องตัวของพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนจะแทนด้วย μ_e และค่าความคล่องตัวของพาหะประจุที่เป็นโฮลก็จะแทนด้วย μ_h สำหรับพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนที่ไหลอยู่ภายในสนามไฟฟ้า E สามารถที่จะหาสภาพนำไฟฟ้าได้จากสมการ 2.32

$$\sigma_e = n_e q \mu_e \quad (2.32)$$

เมื่อ n_e คือ ความหนาแน่นของพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ เมื่อพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนและพาหะประจุที่เป็นโฮลดังกล่าวนี้เป็นอนุภาคที่นำกระแสไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะเขียนได้เป็น

$$\sigma = n_e q \mu_e + n_h q \mu_h \quad (2.33)$$

เมื่อ n_h คือ ปริมาณความหนาแน่นของพาหะประจุที่เป็นโฮล

2.4.2.3 ความหนาแน่นของพาหะ (Carrier concentration ; n)

ความหนาแน่นของพาหะประจุ (Carrier concentration) ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิคงที่ภายใต้ที่สภาวะสมดุลดังกล่าวนี้ ผลคูณของความหนาแน่นพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระกับพาหะประจุที่เป็นโฮล มีค่าดังนี้

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (2.34)$$

เมื่อ n_0 คือ ปริมาณความหนาแน่นพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระ , p_0 คือ ปริมาณความหนาแน่นพาหะประจุที่เป็นโฮล และ n_i คือ ความหนาแน่นพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

สำหรับในสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) พาหะประจุที่มีปริมาณของความหนาแน่นมากก็จะเป็นพาหะหลักหรือที่เรียกกันว่า พาหะข้างมาก (Majority carriers) และพาหะประจุที่มีปริมาณของความหนาแน่นน้อยก็จะเป็นพาหะรองหรือที่เรียกกันว่า พาหะข้างน้อย (Minority carriers) ความหนาแน่นของอนุภาคอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ n_n และความหนาแน่นของอนุภาคโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็จะแทนด้วยสัญลักษณ์ p_n ในทำนองเดียวกัน ความหนาแน่นของอนุภาคอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) จะแทนด้วยสัญลักษณ์ n_p และความหนาแน่นของอนุภาคโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะแทนด้วยสัญลักษณ์ p_p

จากความจริงที่ว่า ภายในโครงสร้างที่เป็นผลึกนั้นจะต้องมีสถานะของประจุที่เป็นกลาง ดังนั้น ผลรวมของความหนาแน่นของพาหะประจุทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตรนั้นจะต้องเท่ากับศูนย์ ส่วนสำหรับในสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์นั้นจะมีประจุอยู่ 2 ชนิด ก็คือ ไอออนที่ไม่เคลื่อนที่ และ พาหะนำประจุที่เคลื่อนที่ ซึ่งไอออนที่ไม่เคลื่อนที่นั้น ได้แก่ อะตอมของสารเจือปนที่เป็นอะตอมซึ่งสามารถที่จะให้อนุภาคอิเล็กตรอนได้ (Donor) และ อะตอมของสารเจือปนที่เป็นอะตอมซึ่งสามารถที่จะรับอนุภาคอิเล็กตรอนได้ (Acceptor) จะเป็นธาตุในหมู่ที่ 3A หรือ 5A

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะต้องมีสถานะของประจุที่เป็นกลาง ดังนั้นผลรวมของความหนาแน่นของประจุลบจะต้องเท่ากับผลรวมของความหนาแน่นของประจุบวก ดังสมการที่ 2.35

$$N_a + n = N_d + p \quad (2.35)$$

เมื่อ N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (Acceptor)

N_d คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (Donor)

n คือ จำนวนอนุภาคอิเล็กตรอน

p คือ จำนวนอนุภาคโฮล

สำหรับสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (N-type) นั้น เนื่องจากไม่มีไอออนตัวรับ (Acceptor ions) ที่มีประจุลบ ดังนั้น N_a จะเท่ากับศูนย์ และจำนวนอิเล็กตรอนจะมากกว่าจำนวนโฮลเป็นอย่างมาก ($n \gg p$) ดังนั้นสมการที่ 2.35 จึงอาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$n_n \cong N_d \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.36 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (N-type) อาจประมาณได้เท่ากับความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (Donor) ที่ได้ทำการเจือเข้าไป ส่วนความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น อาจประมาณได้จากสมการที่ 2.34 ดังนี้

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (2.37)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (P-type) นั้น ความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำ อาจประมาณได้เท่ากับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (Acceptor) ที่ได้ทำการเจือเข้าไป

$$p_p \cong N_a \quad (2.38)$$

และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนประมาณได้จากสมการ

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (2.39)$$

2.5 ปัจจัยทางโครงสร้างสำหรับแมกนีโตริซิสแตนท์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (Geometrical factor of magnetoresistance)

ในขณะที่ได้มีการกล่าวถึงปรากฏการณ์กลาวโนแมกเนติกในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะของมิติหรือรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปนั้น เรายังสามารถที่จะสังเกตเห็นได้อีกว่าปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ดังกล่าวนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตอีกด้วย โดยสามารถที่จะกล่าวพอสังเขปได้ว่าในกรณีของแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะด้านขนาดซึ่งยาวมากนั้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ามากระทำหรือตัดผ่าน การแยกตัวของพาหะประจุจะเกิดขึ้นในลักษณะที่สอดคล้องกันกับความเร็วตามแนวยาวของแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันกับในค่าความต้านทานนี้ที่เรียกกันว่าปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ทางฟิสิกส์ (หรืออินทรินซิก) และเป็นที่โดดเด่นด้วยความต้านทาน ρ_b ส่วนในอีกกรณีก็จะเป็นส่วนของแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะด้านขนาดซึ่งสั้นมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจะเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมเนื่องจากการเบี่ยงเบนของกระแสทั้งหมด โดยในส่วนของได้กล่าวมานี้เองทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจึงถูกเรียกกันว่าปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ทางมิติรูปร่างเชิงเรขาคณิต ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะด้านขนาดซึ่งสั้นเป็นอนันต์หรือมีความสั้นที่ไม่จำกัดนั้นเป็นลักษณะที่โดดเด่นด้วยสภาพนำไฟฟ้าของคอร์บีโน σ_B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนทีใน “สื่อกลาง” แผ่นสารกึ่งตัวนำเราจึงขอแนะนำเพื่อให้ได้ทราบถึงแพคเตอร์โครงสร้างทางรูปร่างในเชิงเรขาคณิตของแมกนีโตริซิสแดนที ซึ่งแพคเตอร์ดังกล่าวนี้ถูกกำหนดโดยสมการ

$$G_R = \frac{R(B)}{R_\infty(B)} \quad (2.40)$$

ในที่นี้ $R(B)$ เป็นค่าความต้านทานของแมกนีโตริซิสเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิต ได้จากการวัดระหว่างรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contacts) ทั้งสองที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (B) และ $R_\infty(B)$ หมายถึงค่าความต้านทานของส่วนที่เกี่ยวข้องกับของแถบยาวที่เป็นอนันต์หรือแถบที่มีความยาวไม่จำกัด

เพื่อที่จะสร้างความสัมพันธ์ของแพคเตอร์ G_R ก่อนหน้าที่เราจะทำการวิเคราะห์ของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนทีและผลงานด้านการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งถือได้ว่าเป็นความสะดวกในการพิจารณาอัตราส่วน $R(B)/R(0)$ ของอุปกรณ์ในรูปทรงเชิงเรขาคณิตในลักษณะต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นตามที่ตั้งสมการ 2.30

$$\frac{R(B)}{R(0)} = \frac{\rho(B)}{\rho(0)} \quad (2.41)$$

โดยที่ $\rho(B)$ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้ายังผลเฉลี่ยของวัสดุในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะบาง ซึ่งในอุปกรณ์ที่มีลักษณะด้านขนาดซึ่งยาวเป็นอนันต์หรือมีความยาวที่ไม่จำกัดนั้นเราก็จะมีเพียงแค่ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนทีทางฟิสิกส์เท่านั้น $\rho(B) = \rho_b(B)$ และสมการที่ 2.41 ลดลงไปเป็น

$$\frac{R(B)}{R(0)} = \frac{\rho_b(B)}{\rho_b(0)} \quad (2.42)$$

สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะด้านขนาดซึ่งสั้นเป็นอนันต์หรือมีความสั้นที่ไม่จำกัด หรือคอร์ปิโนดิสก์ สภาพต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการกำหนดให้หรือได้รับจากสมการของ $\rho(B) = 1/\sigma_b(B)$ โดยการแทนที่สิ่งดังกล่าวนี้ลงในสมการที่ 2.41 และการใช้ประโยชน์ของสมการสภาพนำไฟฟ้าคอร์ปิโนด ดังนั้นก็จะเป็นดังสมการด้านล่าง

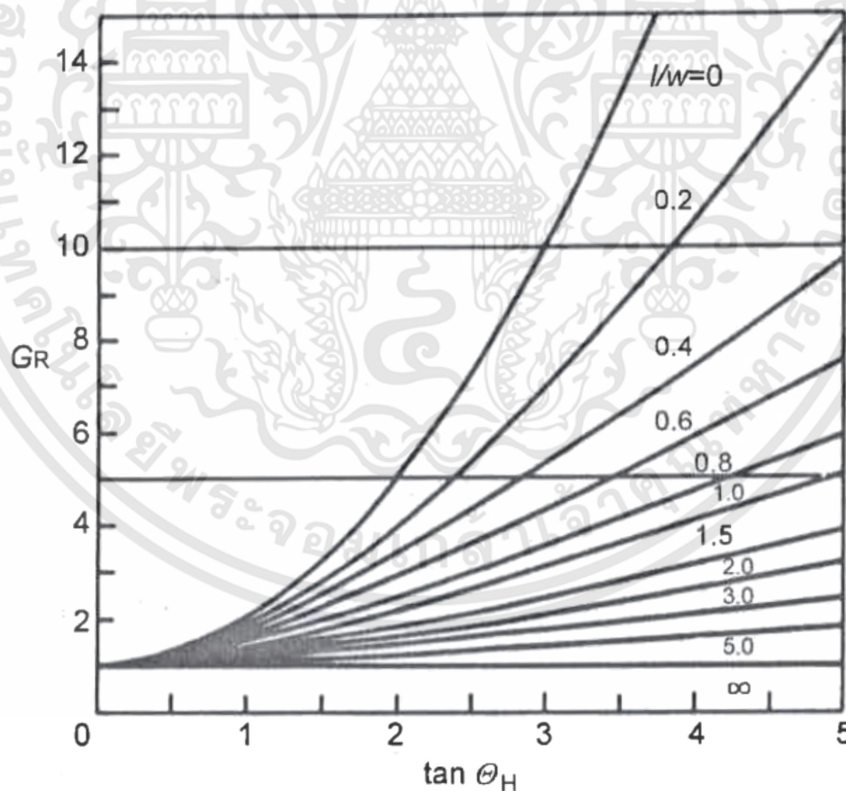
$$\frac{R(B)}{R(0)} = \frac{\rho_b(B)}{\rho_b(0)} (1 + \mu_H^2 B^2) \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอุปกรณ์ซึ่งไม่ใช่ทั้งสองลักษณะดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ซึ่งก็คือในกรณีที่ เป็นทั้งด้านขนาดซึ่งยาวเป็นอย่างมากหรือด้านขนาดซึ่งสั้นเป็นอย่างมาก อัตราส่วน $R(B)/R(0)$ เป็นลักษณะของการโดยประมาณที่อยู่ในช่วงระหว่างค่าที่ได้รับมาด้วยสมการที่ 2.42 และสมการที่ 2.43 การใช้ความคิดวิเคราะห์ของปัจจัยการแก้ไขด้านรูปร่างเชิงเรขาคณิตของแมกนีโตริซิสแตนท์ดังสมการที่ 2.40 อัตราส่วนความต้านทานสำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปร่างอาจจะแสดงออกโดยสมการ

$$\frac{R(B)}{R(0)} = \frac{\rho_b(B)}{\rho_b(0)} (G_R) \quad (2.44)$$

สำหรับตัวต้านทานที่มีรูปร่างเป็นเหมือนลักษณะแผ่น (Plate-Like) เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก $R(B) = (l/wt)\rho(B)$ นอกจากนั้นแล้วตามที่แสดงในสมการที่ 2.42 และตามในสมการที่ 2.43 ถ้า $l/w \rightarrow \infty, G_R \rightarrow 1$ และถ้าหาก $l/w \rightarrow 0, G_R \rightarrow 1 + \mu_H^2 B^2$ ดังนั้นปัจจัยทางด้านมิติรูปร่างเชิงเรขาคณิตของแมกนีโตริซิสแตนท์เป็นจำนวนหนึ่งหน่วยที่ใหญ่กว่าตัวเลขเสมอ



Acti
Go to

รูปที่ 2.16 แพคเตอร์โครงสร้างของแมกนีโตริซิสแตนท์สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เป็นฟังก์ชันมาจากผลของ $\mu_H B$ ซึ่งลาเบลได้แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนในด้านความยาวต่อความกว้าง l/w

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันเป็นการแสดงออกถึงขอบเขตของการพัฒนาของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางมิติรูปร่างเชิงเรขาคณิตในแผ่นสารกึ่งตัวนำ $G_R = 1$ ในที่นี้มีความหมายว่าไม่มีปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางมิติรูปร่างเชิงเรขาคณิตและจะมีเพียงปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางฟิสิกส์เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ถ้า $1 < G_R < 1 + \mu_R^2 B^2$ นอกจากนี้แล้วในการเพิ่มขึ้นปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางฟิสิกส์ ยังมีปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางมิติรูปร่างเชิงเรขาคณิตบางส่วนปรากฏตัวขึ้น และ $G_R = 1 + \mu_H^2 B^2$ หมายความว่าทั้งสองก็คือปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางฟิสิกส์และปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ทางมิติรูปร่างเชิงเรขาคณิตทั้งหมดอยู่ที่โหมดของการทำงาน

ปัจจัยโครงสร้างทางมิติรูปร่างในเชิงเรขาคณิตของแมกนีโตริซิสแดนท์สำหรับตัวต้านทานที่มีรูปร่างเป็นเหมือนลักษณะแผ่น (Plate-Like) เป็นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากของแต่ละอัตราส่วน l/w ต่างๆ เป็นการถูกคำนวณโดยใช้เทคนิควิธีการแมปที่สอดคล้องกันกับมาตราส่วน (conformal mapping) โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.16 แต่ถ้าหาก $\mu_H^2 B^2 \ll 0.45$ และ $l/w \ll 0.35$ ในส่วนของฟังก์ชัน $G_R(\mu_H B, l/w)$ สามารถที่จะหาค่าประมาณโดยสมการ

$$G_R \approx 1 + \mu_H^2 B^2 \left(1 - 0.54 \frac{l}{w} \right) \quad (2.45)$$

พร้อมกับความถูกต้องแม่นยำที่ตีขึ้นกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงออกให้เห็นโดยการประมาณนอกจากดังที่ได้กล่าวมานี้สำหรับ G_R ก็ได้มีการระบุไว้ในบทความเซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กประเภทโซลิตสเตทและการนำไปประยุกต์ใช้งาน นั่นเอง [27]

บทที่ 3

การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

เนื้อหาของบทดังกล่าวนี้จะเป็นการกล่าวถึงเครื่องมืออีกประเภทหนึ่งซึ่งถือได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากที่ใช้ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างและการทำงานรวมไปถึงเพื่อทำให้ทราบเกี่ยวกับพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่อยู่ในกลุ่มจำพวกเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำและของอุปกรณ์แมกนีโทรีซิสเตอร์ ซึ่งเครื่องมือที่ได้นำมาใช้ในการศึกษาค้นคว้ากับงานวิจัยครั้งนี้ก็คือโปรแกรม Sentaurus Technology Computer Aided Design หรือที่เรียกกันว่า Sentaurus TCAD [30] โดยปกติทั่วไปแล้วโปรแกรมดังกล่าวนี้ได้ถูกนำมาใช้ในทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์เพื่อสำหรับการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์หรือเพื่อเป็นการพัฒนาตัวอุปกรณ์ทางด้านเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้นนั่นเอง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เองโปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD จึงได้มีการถูกนำไปใช้งานในบริษัทเซมิคอนดักเตอร์รายใหญ่อันดับโลกที่เป็นอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำด้านการผลิตแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer) ตัวอย่างของบริษัทเซมิคอนดักเตอร์ชั้นนำดังเช่น GlobalFoundries, Microsemi, ON Semiconductor, STMicroelectronics และ Qualcomm เป็นต้น เพื่อที่จะนำไปใช้ในการสร้างชิปประมวลผลหรือไมโครโปรเซสเซอร์รวมถึงชิปเซตหน่วยความจำต่างๆลงไปในบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดังกล่าวนี้จนทำให้กลายมาเป็นวงจรรวม (Integrated circuits) ดังจะพบเห็นได้ในหน่วยประมวลผลเซิร์ฟเวอร์คอมพิวเตอร์นั่นเอง ดังนั้นสำหรับในงานวิจัยดังกล่าวนี้จึงเป็นเหตุผลที่เราได้ทำการเลือกใช้โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินการทดสอบและยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย รวมถึงทั้งตัวโปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD ยังมีข้อดีในด้านที่มีเครื่องมือที่สามารถช่วยใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ได้ในลักษณะที่เป็นเชิงลึก ซึ่งในการลงมือปฏิบัติทำการวัดจริงไม่สามารถที่จะทำได้นั่นเอง

โดยในช่วงตอนต้นของบทดังกล่าวนี้ก็จะเป็นการกล่าวถึงในรายละเอียดอย่างคร่าวๆ ของตัวโปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD [31] ส่วนในลำดับต่อจากนั้นก็จะเป็นการเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองแบบของตัวอุปกรณ์แมกนีโทรีซิสเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบทางมิติรูปทรงหรือโครงสร้างและการจำลองแบบที่เกี่ยวข้องกับลักษณะพฤติกรรมทางไฟฟ้า โดยในทั้งสองส่วนดังที่กล่าวมานี้เองก็จะถูกกล่าวอย่างละเอียดมากขึ้นเพื่อต้องการที่จะให้มีความเข้าใจหรือทราบถึงวิธีการทดลองของงานวิจัยครั้งนี้อีกด้วย

3.1 บทนำ Sentaurus TCAD

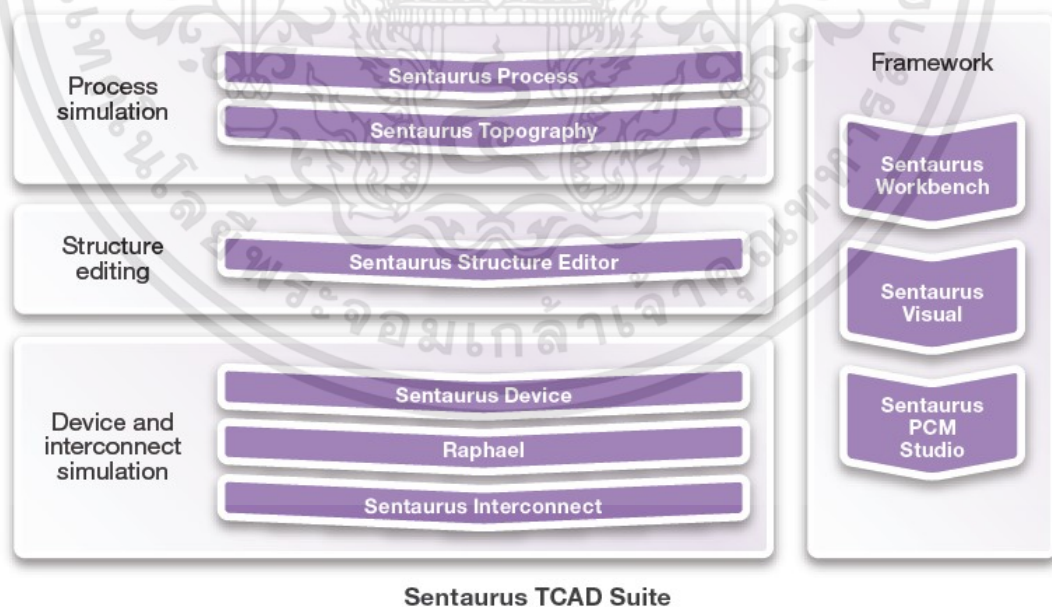
Technology Computer-Aided Design หรือ Technology CAD (TCAD) เป็นเทคโนโลยีการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ ที่เรียกกันย่อๆว่า TCAD หมายถึง การใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์พร้อมกับซอฟต์แวร์มาช่วยในการจำลองแบบ โดยในด้านของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีวัตถุประสงค์หลักก็เพื่อต้องการที่จะพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีกระบวนการผลิตและกระบวนการทำงานอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์นั่นเอง หากพิจารณาในด้านของอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำแล้ว TCAD ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของ Electronic Design Automation (EDA) หรือที่เรียกกันว่า Electronic Computer-Aided Design (ECAD) ซึ่งเป็นหมวดเครื่องมือจำพวกซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมากมาย ตัวอย่างเช่น วงจรรวม (Integrated Circuits), แผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Boards) หรือแผ่น PCB แต่ในกลุ่มของนักอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปนิยมเรียกกันสั้นๆว่า แผ่นปริ้นท์ โดยเครื่องมือดังกล่าวนี้ได้ถูกผู้ที่ต้องการออกแบบไมโครชิป (Microchip) นำไปใช้งานเพื่อช่วยในการออกแบบและทำการวิเคราะห์ชิปที่สร้างจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำทั้งหมด เนื่องจากชิปที่สร้างจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบยุคใหม่นี้สามารถที่จะมีส่วนประกอบได้นับเป็นพันล้านชิ้นซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่สูงอย่างมาก จึงเป็นสาเหตุทำให้เครื่องมือ EDA เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างมากสำหรับในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

การจำลองแบบด้วย TCAD จึงได้มีการถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้เป็นเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากรวมทั้งมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตของแต่ละขั้นตอนที่สูงอีกด้วย ดังนั้นผู้ผลิตตัวอุปกรณ์หรือวงจรรวมทั้งหลายในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำจึงได้มีการเลือกใช้ TCAD เพื่อมาช่วยในการวิเคราะห์ผลของตัวอุปกรณ์หรือวงจรรวมที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ ซึ่งจะใช้ในการตรวจสอบแล้วนำมาวิเคราะห์พร้อมทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างวงจรรวมให้ดียิ่งขึ้นตลอดจนสามารถที่จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบอันเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงกระบวนการสร้างวงจรรวมได้ก่อนที่จะมีการนำไปสร้างเป็นตัวอุปกรณ์หรือวงจรรวมจริงขึ้น หากในกรณีที่เกิดปัญหาขึ้นมาสามารถที่จะรีบดำเนินการแก้ไขได้อย่างทันที เพื่อเป็นการป้องกันข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตรวมทั้งในด้านการวิเคราะห์และออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ส่วนอีกหนึ่งสาเหตุที่นิยมเลือกใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มาช่วยทำการจำลองแบบ (TCAD) แทนการสร้างจริงนั้น ก็เพราะว่าสามารถที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายลงและเพิ่มความรวดเร็วในการวิจัยและการพัฒนาทั้งกระบวนการผลิตและกระบวนการทำงานอุปกรณ์ประเภทเซมิคอนดักเตอร์พร้อมยังส่งผลทำให้เกิดความน่าเชื่อถือในกระบวนการผลิตและออกแบบอีกด้วย โดยในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่ในรูปแบบของ Process TCAD ในขณะที่ส่วนของการจำลองแบบการใช้งานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะอยู่ในรูปแบบของ Device TCAD นอกจากนี้ตัวเครื่องมือเองยังมีความสามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ด้วยการจำลองแบบกระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอน เช่น การยิงฝังประจุ, การแพร่สารเจือ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, การฉีดยาหะ, และการเบี่ยงเบนของพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจักษ์เนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็ก รวมทั้งในส่วนของการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ เช่น มิติรูปทรงหรือโครงสร้าง, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า โดยการอาศัยโมเดลพื้นฐานทางฟิสิกส์นั่นเอง

Sentaurus เป็นอีกหนึ่งซอฟต์แวร์หรือเป็นชุดเครื่องมือการจำลองแบบอีกประเภทหนึ่งที่อยู่ภายใต้ TCAD ซึ่งเป็นการจำลองกระบวนการสร้างและกระบวนการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยชุดเครื่องมือทั้งหมดของ Sentaurus TCAD สามารถที่จะทำการแบ่งออกเป็นกลุ่มๆได้จำนวน 3 กลุ่มหลักดังแสดงไว้ตามรูปที่ 3.1 โดยในกลุ่มที่หนึ่งจะเป็นกลุ่ม Process simulation [32] เป็นกลุ่มที่ใช้สำหรับการจำลองกระบวนการสร้างของในแต่ละขั้นตอนโดยมีจะเครื่องมืออยู่ด้วยกันสองตัวนั่นก็คือ Sentaurus Process และ Sentaurus Topography ส่วนในกลุ่มที่สองจะเป็นกลุ่ม Structure editing [33] เป็นกลุ่มที่ใช้สำหรับขึ้นโครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยจะเป็นในลักษณะลัดขั้นตอนกระบวนการสร้างลงไปซึ่งจะแตกต่างกับในกรณีของกลุ่มแรก ซึ่งในกลุ่มที่สองนี้ก็จะจะมีเครื่องมือคือ Sentaurus Structure editor และในกลุ่มสุดท้ายจะเป็นกลุ่มของ Device and interconnect simulation [34] เป็นกลุ่มที่ใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์โดยใช้โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆ ซึ่งในกลุ่มที่สามนี้ก็จะจะมีเครื่องมือคือ Sentaurus Device, Raphael, Sentaurus Interconnect โดยชุดเครื่องมือที่ได้ทำการกล่าวไปทั้งหมดนี้จะใช้งานผ่านหน้า Framework ซึ่งประกอบไปด้วย Sentaurus Workbench, Sentaurus Visual และ Sentaurus PCM Studio



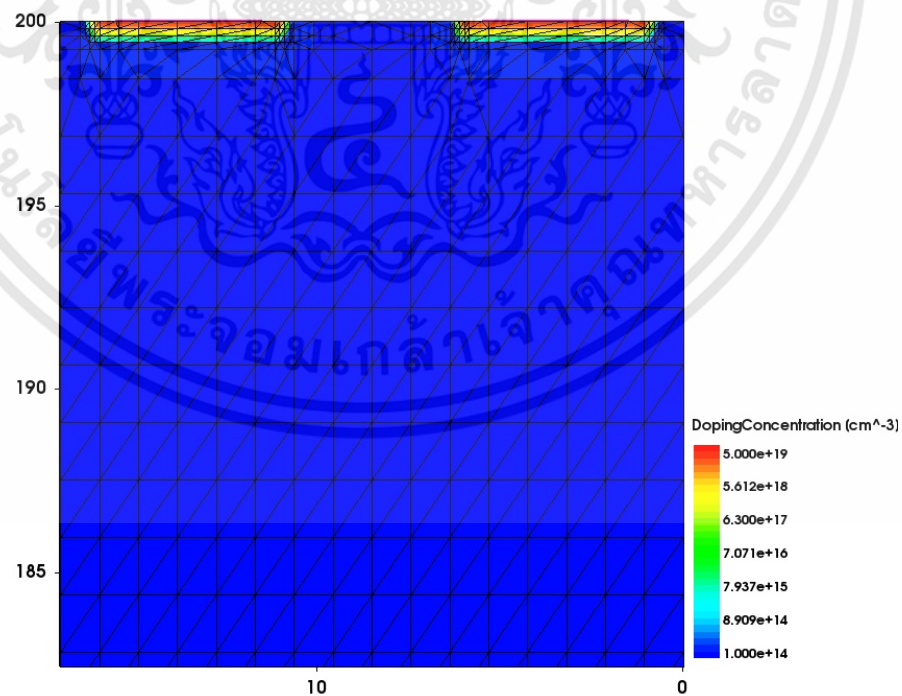
รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือของ Sentaurus TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในการศึกษาวิจัยด้วยการจำลองแบบดังกล่าวนี้เราจะมีการใช้งานเครื่องมือหลักๆ ก็คือ Sentaurus Structure Editor เพื่อที่จะใช้สำหรับขึ้นรูปทรงหรือโครงสร้างของอุปกรณ์และ Sentaurus Device สำหรับใช้ในการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้ารวมถึงพฤติกรรมของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยเราสามารถที่จะใช้งานและดูผลของการจำลองแบบผ่านทาง Sentaurus Workbench และ Sentaurus Visual ดังนั้นเนื้อหาในส่วนที่จะกล่าวในลำดับถัดไปจึงขอกล่าวเน้นถึงส่วนของเครื่องมือที่ได้นำมาใช้งานในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (Process Simulation)

ในส่วนของการจำลองแบบที่มีความเกี่ยวข้องกับขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวนี้ก็จะประกอบไปด้วยกระบวนการหรือขั้นตอนต่างๆอยู่จำนวนหลายขั้นตอนด้วยกัน ตัวอย่างเช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing และ oxidation โดยกระบวนการดังที่ได้ยกตัวอย่างมาเหล่านี้เป็นการจำลองแบบการทำงานที่อาศัยหลักการอยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ซึ่งในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำนี้ก็จะเป็นการสร้างที่อยู่บนแผ่นฐานรอง เช่น แผ่นฐานรองที่เป็นซิลิคอน ลำดับต่อจากนั้นก็จะเป็นในส่วนที่การจำลองแบบของกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะถูกเมส (Mesh) ขึ้นมาหรืออาจจะเรียกว่ากริด (Grid) แล้วจึงถูกแทนที่ด้วย Finite-element structure เพื่อที่จะได้นำไปใช้ดำเนินการคำนวณในลำดับต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2

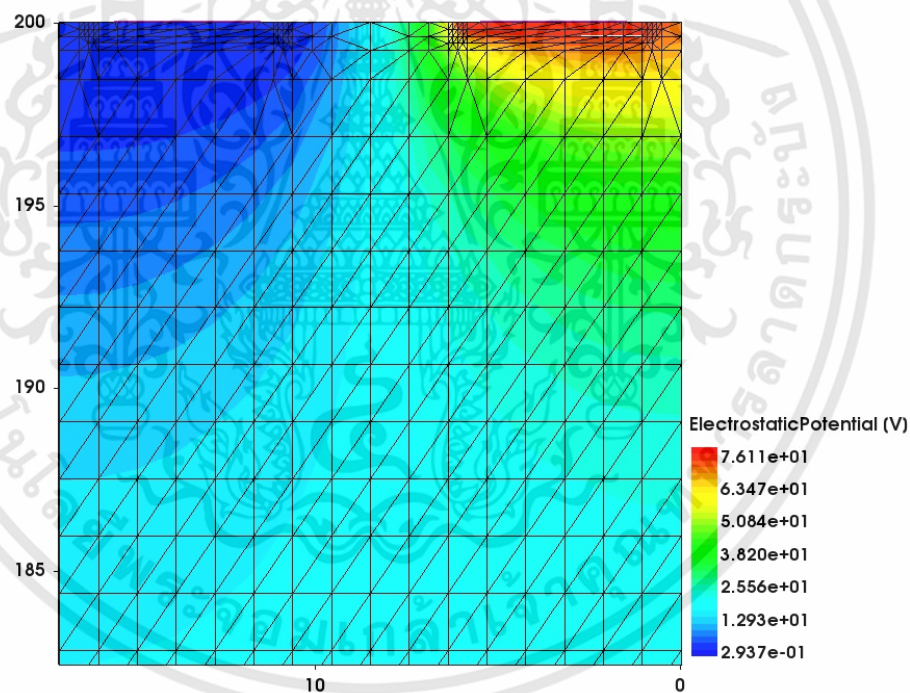


รูปที่ 3.2 โครงสร้างการจำลองแบบกระบวนการสร้างของซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Device Simulation)

ในส่วนของการจำลองแบบที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำนั้นซึ่งจะเห็นได้ว่าในซอฟต์แวร์ของ TCAD ดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถที่จะทำการจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ รวมไปถึงการวัดค่าทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ประเภทเซมิคอนดักเตอร์ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติทางแสงหรือคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยในอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำเหล่านี้หลังจากถูกเมสแล้วจากนั้นก็จะถูกแทนที่ด้วย Finite-element structure ซึ่งหากทำการพิจารณาในแต่ละโหนดของตัวอุปกรณ์ก็จะพบว่ามีคุณสมบัติทางด้านต่างๆที่ร่วมกันอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น ชนิดหรือประเภทของวัสดุ (Material type), ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration), ความหนาแน่นกระแส (Current density), สนามไฟฟ้า (Electric field), อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ (Generation and recombination rates) และคุณสมบัติอื่นๆ โดยในแต่ละโหนดดังที่ได้กล่าวมาก็จะพบคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณซึ่งจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์ด้วย TCAD

ในการศึกษาค้นคว้าด้วยการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำนั้น สำหรับในส่วนของข้อไฟฟ้าตัวอุปกรณ์ก็จะถูกสร้างขึ้นมาพร้อมกับทั้งการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ตัวอย่างเช่น การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางด้านแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการจะไบอัสให้กับตัวอุปกรณ์หรือ อาจจะเป็นเงื่อนไขขอบเขตทางด้านของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการจะไบอัสเป็นต้น โดยการจำลองแบบ

การทำงานของตัวอุปกรณ์ในซอฟต์แวร์ TCAD ดังกล่าวนี้อีกก็จะอาศัยหลักการแก้ปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์ต่างๆมากมายที่มีความเกี่ยวข้องกับการจำลองแบบนั่นเอง ตัวอย่างเช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะประจุ (Carrier continuity equation) และยังมีสมการอื่นๆอีกด้วย ซึ่งลำดับต่อจากนั้นหลังจากที่ได้มีการแก้ปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์เหล่านี้แล้ว ก็จะปรากฏออกมาเป็นผลลัพธ์ในลักษณะรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ ดังแสดงออกมอยู่ในรูปที่ 3.4

3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD

ในกระบวนการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ประเภทเซมิคอนดักเตอร์นั้น โดยทั่วไปแล้วจะต้องเป็นการเริ่มต้นจากส่วนของการสร้างโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ ซึ่งในส่วนของการสร้างโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เองเราสามารถที่จะทำการจำลองแบบของตัวอุปกรณ์ได้ใน 2 ลักษณะ คือ การจำลองแบบของตัวอุปกรณ์ด้วย SProcess หรือ มาจากการจำลองแบบของตัวอุปกรณ์ด้วย SDE ก็ได้ ลำดับต่อจากนั้นก็จะเป็นตามด้วยการสร้าง Mesh ด้วย SDE แล้วจึงได้ทำการ



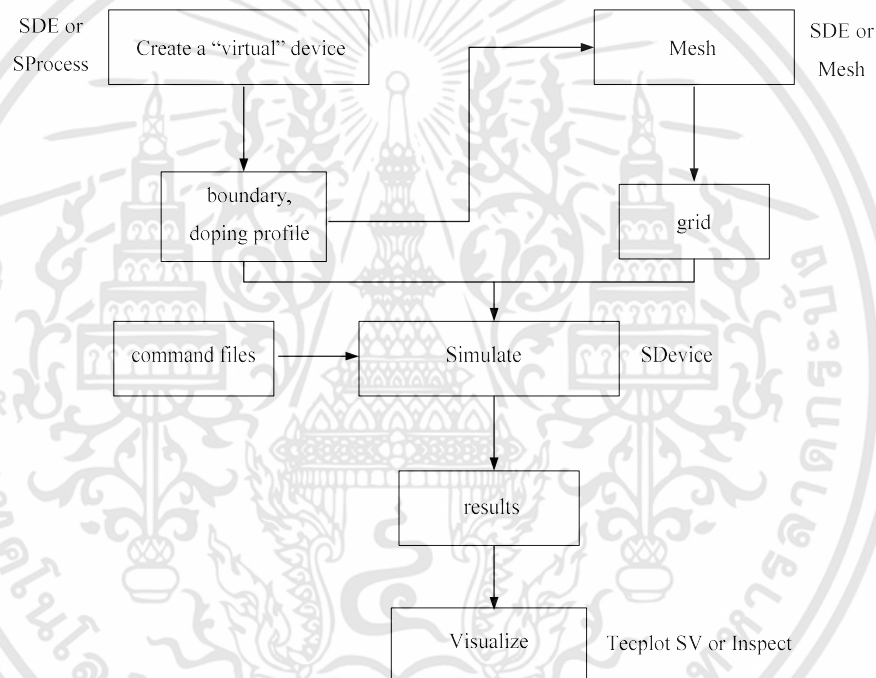
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าจากการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ที่วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำ

นำโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ได้ผ่านกระบวนการ Mesh แล้วนั้นไปทำการจำลองเพื่อต้องการที่จะทราบถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้ด้วยส่วนของ Visualize ซึ่งโปรแกรมโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการถูกสั่งงานจาก Command file (ไฟล์ที่มีนามสกุล .cmd) ซึ่งเป็นในลักษณะของ Text file ปกติ โดยที่เราสามารถที่จะทำการสร้างรวมไปถึงสามารถจะดำเนินการแก้ไขได้ด้วย Text editor ทั่วไปนั่นเอง เพียงแต่ว่าชุดคำสั่งที่ใช้ดังกล่าวนี้ก็จะมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละโปรแกรม ซึ่งในรูปที่ 3.5 จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงภาพรวมของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ประเภทเซมิคอนดักเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ Sentaurus TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD มีส่วนประกอบอยู่ด้วยกัน 5 ส่วนดังนี้

- 3.2.1 Sentaurus Workbench
- 3.2.2 Sentaurus Process
- 3.2.3 Sentaurus Structure Editor
- 3.2.4 Sentaurus Device
- 3.2.5 Sentaurus Visual

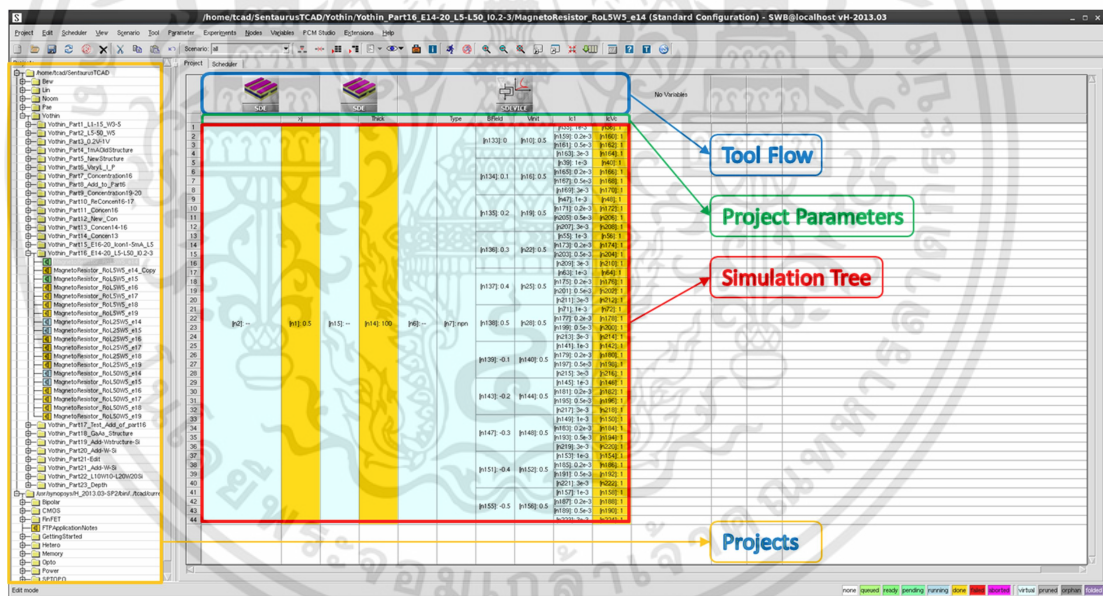


รูปที่ 3.5 ภาพรวมของการจำลองแบบโดยซอฟต์แวร์ Sentaurus TCAD

3.2.1 Sentaurus Workbench

Sentaurus Workbench (SWB) เป็น graphical environment ของ Sentaurus TCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมส่วนหลักที่ทำหน้าที่แสดงการทำงานร่วมกันของส่วนต่างๆ ของโปรแกรมในลักษณะคล้ายกับเป็นศูนย์กลางรวบรวมส่วนต่างๆ ในการจำลองแบบเข้าไว้ด้วยกัน และใช้เพื่อการออกแบบสำหรับสร้าง การจัดการด้าน Simulations รวมทั้งเพื่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยและการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยในส่วนดังกล่าวนี้ยังมีความสามารถที่จะนำมาใช้เป็นตัวจัดการเครื่องมือและการจำลองแบบของ Sentaurus TCAD ช่วยทำให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกมากยิ่งขึ้นในการสร้างการทดลอง, ลำดับการจำลองแบบ และดูผลการจำลอง รวมไปถึงการกำหนดตัวแปรหรือค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแต่ละเครื่องมือซึ่งส่งผลทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วต่อการทดลองนั่นเอง หน้าต่างโปรแกรมจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 3.6 โดยเราสามารถที่จะทำการเลือกใช้เครื่องมือต่าง ๆ ของ Sentaurus TCAD ได้ด้วยการผ่านทางส่วนของ Tool Flow หากพิจารณาจากรูปดังกล่าวจะเห็นว่า ที่ตำแหน่งพื้นที่บริเวณของ Tool Flow นั้นจะใช้สำหรับกำหนดเครื่องมือและลำดับการใช้เครื่องมือซึ่งจะต้องทำการเริ่มจากเครื่องมือทางซ้ายก่อนที่จะไปเครื่องมือทางด้านขวา พร้อมกับจะนำไฟล์เอาต์พุตจากเครื่องมือดังกล่าวนี้มาทำการประมวลผลต่อตามลำดับอีกด้วย จากนั้นเราสามารถที่จะทำการตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ผ่านทาง Project Parameters ซึ่ง Project Parameters นี้จะใช้สำหรับเพื่อเป็นการกำหนดพารามิเตอร์ที่เราสนใจหรือต้องการที่จะทราบรวมไปถึงเพื่อความง่ายต่อการปรับเปลี่ยนค่าในภายหลัง และตัวแปรที่จะสามารถใช้งานได้ในส่วนดังกล่าวนี้จำเป็นต้องผ่านการกำหนดให้เป็นตัวแปรอิสระที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงค่าได้เสียก่อนซึ่งจะได้กล่าวอธิบายใน ส่วนต่อไป โดยเราสามารถที่จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรไปตามแต่ละการทดลองดังที่เราต้องการ จากนั้นในส่วนของ Simulation Tree เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อควบคุมการจำลองแบบและตรวจสอบผลการจำลองแบบที่ได้ โดยสีที่ปรากฏขึ้นในแต่ละช่อง (Node) จะบ่งบอกเพื่อให้ทราบว่า



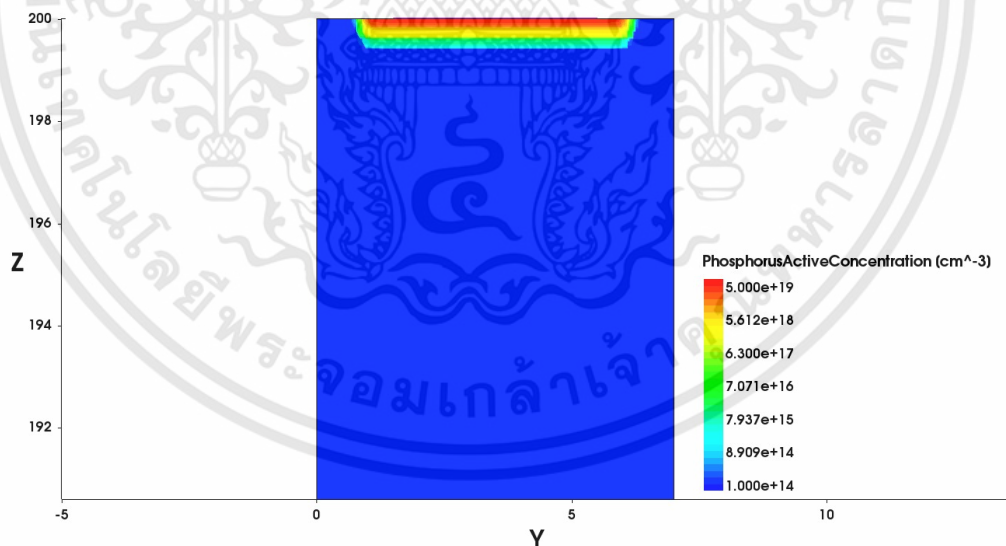
รูปที่ 3.6 หน้าต่างการจำลองแบบการทำงานของ Sentaurus Workbench และส่วนอื่นๆ

อยู่ในขั้นตอนหรือถึงสถานะใดของการจำลองแบบ หลังจากที่ได้ดำเนินการในส่วนของการกำหนดเครื่องมือและตั้งค่าการทดลองเป็นอันเสร็จเรียบร้อยแล้ว Sentaurus Workbench ก็จะถูกนำมาใช้งานเป็นหน้าต่างหลักสำหรับสั่งให้ซอฟต์แวร์เริ่มทำการจำลองแบบ (Run) ได้ทันที เมื่อการจำลองแบบดังกล่าวนี้ดำเนินการเป็นอันเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้วก็จะแสดงสถานะตามสีที่ได้มีการระบุเอาไว้อยู่ในตำแหน่งบริเวณขอบล่างด้านขวาของหน้าต่างดังแสดงในรูปที่ 3.6 นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 Sentaurus Process

Sentaurus Process (SProcess) เป็นโปรแกรมจำลองแบบที่มีความสมบูรณ์รวมทั้งมีความยืดหยุ่นที่สูงมากในการจำลองกระบวนการสร้างแบบหลายทิศทาง (Multidimensional) มีการปรับปรุงที่หลากหลายของข้อมูลการทดลองเพื่อให้มีความทันสมัยมากขึ้น นอกจากนี้แล้วยังมีความสามารถในการจำลองแบบได้ทั้งเทคโนโลยี Silicon และ Nonsilicon จึงทำให้เป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งแต่เดิมได้มีการถูกพัฒนาขึ้นที่ University of Florida ต่อจากนั้นมาจนถึงในปัจจุบันทางบริษัท Synopsys ก็ได้นำมาปรับปรุงและพัฒนาต่อด้วยการเพิ่มคุณสมบัติให้ดียิ่งขึ้น โดยได้ดำเนินการปรับปรุงในหลายๆส่วนด้วยกัน เช่น ส่วนของอินเตอร์เฟซ Sentaurus Structure Editor สำหรับการก๊อปปี้รูปทรงแบบ 3 มิติ, ความสามารถในการ deposition, แบบจำลองความผิดพลาดของโครงสร้างผลึกสำหรับ SiGe และ Strained Silicon, การ implantation แบบ Monte Carlo สำหรับ Crystal-TRIM, แบบจำลองการ implantation เพื่อวิเคราะห์ความเสียหาย เป็นต้น จนในที่สุดทำให้ Sentaurus Process เปลี่ยนจากเครื่องมือวิจัยที่ใช้ทั่วไปให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ที่มีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ส่วนหน้าที่หลักๆของโปรแกรมก็ใช้สำหรับการจำลองแบบการทำงานที่มีความเกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง ตัวอย่างเช่น กระบวนการ etching, deposition, ion implantation, thermal annealing และ oxidation



รูปที่ 3.7 กระบวนการยิงฝังประจุใน Sentaurus Process

ซึ่งในส่วนของ Sentaurus Process ดังกล่าวนี้อจะเป็นในลักษณะของการใช้ชุดคำสั่งในการจำลองแบบการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วยคำสั่งต่างๆ ตัวอย่างเช่น การกำหนดชนิดหรือประเภทของวัสดุที่

จะนำมาใช้ในการสร้างเป็นฐานรองและรวมไปถึงการกำหนดตำแหน่งหรือพิกัดของฐานรอง, กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) และ กระบวนการฝังประจุ (implantation) เป็นต้น โดยสามารถที่จะพิจารณาได้จากในรูปที่ 3.7 ที่แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างกระบวนการจำลองแบบการฝังประจุ

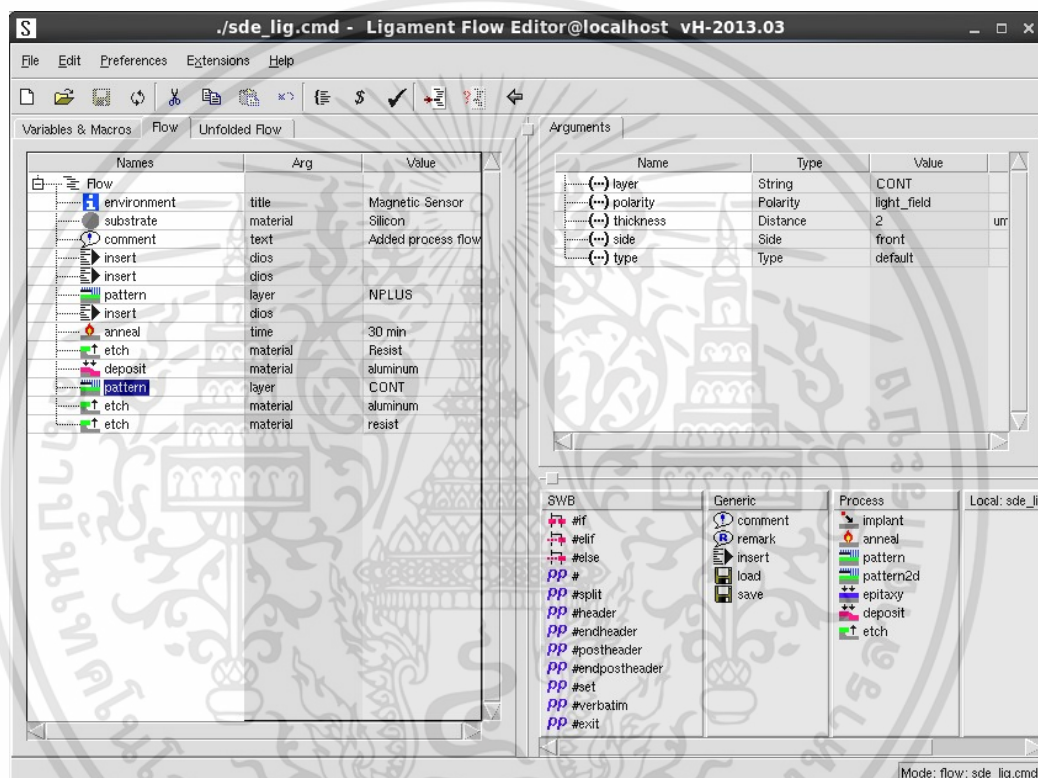
3.2.3 Sentaurus Structure Editor

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการสร้างตัวอุปกรณ์ด้วยการเลียนแบบมิติรูปทรงหรือโครงสร้างอุปกรณ์จริงโดยอาศัยเครื่องมือทางเรขาคณิตมาช่วยในการขึ้นรูปโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ดังกล่าว หากเมื่อมีความต้องการที่จะใช้งานเครื่องมือนี้ โดยเราสามารถที่จะใช้งานเครื่องมือผ่านทาง Graphical User Interface (GUI) หรือที่เรียกว่า GUI ก็คือ เป็นส่วนของการติดต่อกันระหว่างซอฟต์แวร์กับผู้ใช้งานโดยผ่านการโต้ตอบในรูปแบบหรือลักษณะที่เป็นแบบกราฟิก เพื่อที่จะทำการสร้างโครงสร้างขึ้นมา หรือสามารถที่จะใช้วิธีการขึ้นรูปโครงสร้างโดยการใช้คำสั่ง (Command line) ผ่านเครื่องมือได้โดยตรง ในการออกแบบรูปร่างทางโครงสร้างตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วย Sentaurus Structure Editor ทั้งการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ แล้วยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเรียกส่วนของโปรแกรมสำหรับสร้าง Mesh ขึ้นมาเพื่อจะได้นำไปใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ซึ่งเราจะเริ่มจากการขึ้นรูปโครงสร้างด้วยเครื่องมือหรือชุดคำสั่ง แต่สำหรับในการศึกษาทดลองของงานวิจัยครั้งนี้เราจะใช้ Ligament ซึ่งเป็นเครื่องมืออีกตัวซึ่งก็มีความสามารถที่จะใช้สำหรับการขึ้นรูปโครงสร้างผ่านการจำลองแบบกระบวนการสร้างเสมือนจริง (Process emulation) ได้เช่นเดียวกัน

3.2.3.1 Ligament

เป็นเครื่องมือย่อยที่อยู่ภายใต้ในส่วนของ Sentaurus Structure Editor ซึ่งถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่งในตัวช่วยจากหลายๆเครื่องมือเพื่อใช้สำหรับการออกแบบมิติรูปทรงหรือโครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยในส่วนของ Ligament ดังกล่าวนี้อาจยังสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้ คือ Ligament Flow Editor และ Ligament Layout Editor ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทำงานในลักษณะที่ร่วมไปด้วยกันเพื่อที่จะให้ได้โครงสร้างของอุปกรณ์ตามที่ต้องการเอาไว้ นอกจากนี้แล้ว Ligament ยังเป็นส่วนติดต่อทั่วไปสำหรับ TCAD Simulations อีกด้วย ไฟล์อินพุตสำหรับโปรแกรมการจำลองแบบก็จะถูกสร้างขึ้นมาโดยอัตโนมัติรวมทั้งระบบก็จะถูกรวมกันในส่วนของ Sentaurus Workbench ทำงานร่วมกับทุกโปรแกรมของ Sentaurus และนอกจากนี้แล้วในส่วนของตัวเองก็ยังคงเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานดังกล่าวสามารถที่จะดำเนินการแก้ไขปรับแต่งและทำการเพิ่มคำสั่งหรือโมดูลได้อีกด้วย ซึ่ง Ligament จะประกอบไปด้วย

- Ligament Flow Editor เป็นเครื่องมือที่อยู่ภายใต้ในส่วนของ Ligament ที่สามารถนำมาใช้เพื่อช่วยในการกำหนดลำดับกระบวนการสร้างจำลองแบบ (process emulation) ต่างๆของตัวอุปกรณ์ทั้งหมดตามที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ เช่น การยิงฝังประจุ (ion implantation), การปลูกผลึก (epitaxy deposition), การกัด (etching), การใช้อุณหภูมิความร้อนปรับให้อะตอมเคลื่อนกลับเข้าที่ในตำแหน่งแลททิซ (thermal annealing), กระบวนการสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ (oxidation) เป็นต้น นอกจากนี้แล้วในแต่ละกระบวนการผลิตเรายังสามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ได้อีกด้วย



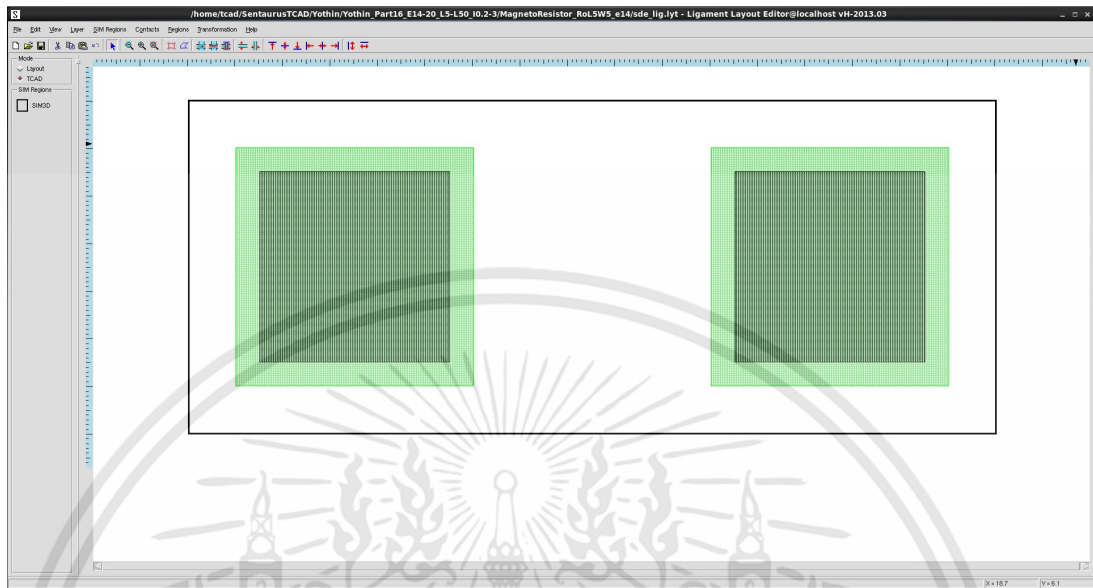
รูปที่ 3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

เช่น พลังงานที่ต้องใช้ในการยิงฝังประจุ, ความหนาของชั้นผลึกที่ทำการปลูก, ระดับของความลึกในการกัดและประเภทของการกัด, การกำหนดระนาบ, ชนิดหรือประเภทของวัสดุ, ขนาดของแผ่นฐานรองซิลิคอน, การกำหนดทิศทางมุมของการยิงประจุ, การกำหนดอุณหภูมิของการแพร่รวมไปถึงกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และระยะความลึกของรอยต่อ เป็นต้น ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8

- Ligament Layout Editor เป็นเครื่องมือที่อยู่ภายใต้ในส่วนของ Ligament อีกรูปแบบหนึ่ง เช่นเดียวกับกับของ Ligament Flow Editor แต่ในส่วนดังกล่าวนี้จะมีความแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงที่ว่ามันเป็นเครื่องมือที่สามารถจะนำมาใช้เพื่อช่วยสำหรับในด้านการออกแบบลวดลาย ส่วนประกอบต่างๆของตัวอุปกรณ์ที่จะถูกนำมาสร้างลงบนฐานรอง (ดังได้แสดงในรูปที่3.9)

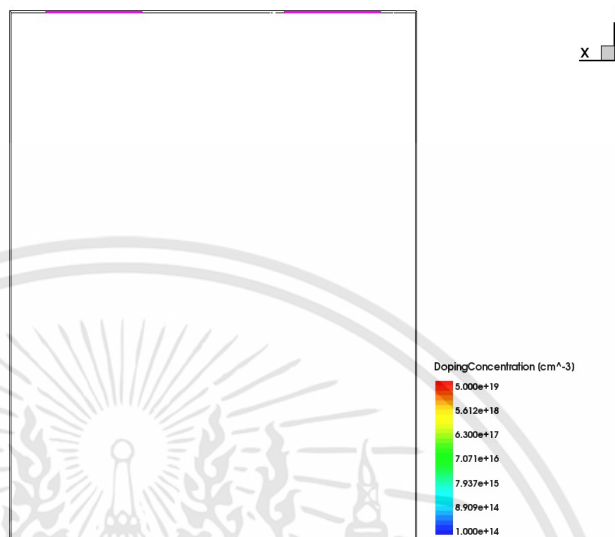


รูปที่ 3.9 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor

โดยลักษณะก็เป็นเสมือนกับการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการ photolithography นั่นเอง ซึ่งหากทำการพิจารณาแล้วจะทำให้เราทราบว่าในส่วนที่เป็น pattern ของ Ligament Flow Editor นั้นจำเป็นที่จะต้องอาศัยการสร้าง pattern จาก Ligament Layout Editor เพื่อที่จะนำมาเป็นตัวกำหนดรูปแบบในการสร้างลวดลายการกัดหรือตำแหน่งบริเวณที่จะเจียรลงไปที่ตัวของอุปกรณ์ นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถที่จะกำหนดขอบเขตของการจำลองได้อีกด้วยว่าจะดำเนินการจำลองแบบในลักษณะที่เป็น 2 มิติ หรือ 3 มิติ รวมไปถึงจนถึงการเปลี่ยนมิติรูปร่างของอุปกรณ์ สามารถที่จะดำเนินการได้ทันทีโดยไม่ต้องจำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบขึ้นมาใหม่เพียงแต่ใช้เส้นพารามิเตอร์ทำการตัดผ่านส่วนที่ต้องการ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงไปในพื้นที่ต่าง Sentaurus Workbench ก็จะส่งผลทำให้มิติรูปร่างของอุปกรณ์ดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามที่เราต้องการ เหมือนดังเช่นที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.9 เป็นการแสดงหน้าต่างการทำงานในส่วนของ Ligament Layout Editor นั่นเอง

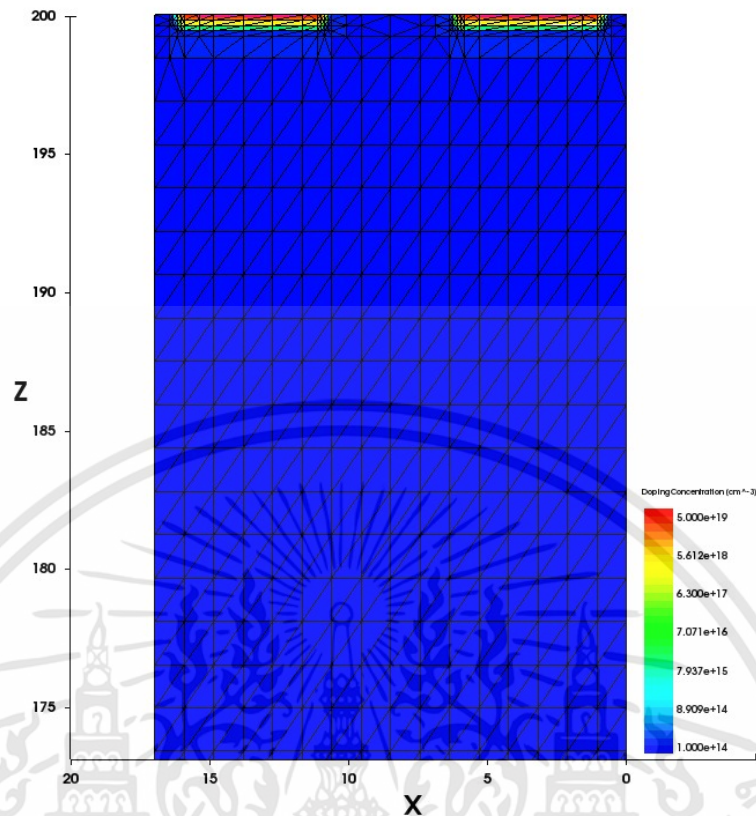
ในส่วนของการจำลองแบบทั้งที่เป็นในลักษณะแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ นั้นเราจะต้องทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ด้วยเพื่อที่จะใช้ในการเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งกำเนิด

กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก โดยหลังจากที่ได้กำหนดหน้าสัมผัสแล้วก็ปรากฏเส้นสีหน้าสัมผัสไฟฟ้าเกิดขึ้นตามคุณสมบัติของหน้าสัมผัสที่ตั้งเอาไว้ที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 หน้าสัมผัสทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

หลังจากที่ได้ดำเนินการขึ้นรูปทรงหรือโครงสร้างพร้อมกับกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ด้วย Ligament เป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น ในลำดับต่อไปก็จะเป็นการกำหนด Mesh หรือ Grid เพื่อที่จะนำไปใช้สำหรับกระบวนการ Finite element โดยในการกำหนด Mesh ดังกล่าวนั้นสามารถที่จะดำเนินการผ่านทาง graphical user interface (GUI) ได้ หรือว่าอาจจะเป็นในลักษณะของการเขียนเป็นชุดคำสั่ง (Command line) ซึ่งเราสามารถที่จะกำหนดในเรื่องของจำนวนความละเอียดขนาด และรูปทรงของ Mesh ได้ โดยจะต้องคำนึงถึงหลักการที่ว่า Mesh ยิ่งมีค่าจำนวนความละเอียดมากขึ้นเท่าใดก็ย่อมที่จะต้องส่งผลต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์มากขึ้นเท่านั้นแต่เราก็จะต้องแลกมาซึ่งกับจำนวนระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่มากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง สำหรับการกำหนดขนาดของ Mesh ในแต่ละแนวแกนอ้างอิงดังกล่าวนั้นก็ควรที่จะกำหนดให้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความยาวในด้านนั้น ๆ นอกจากนี้แล้ว Mesh ก็ยังส่งผลต่อการแสดงความละเอียดของ Doping profile ของตัวอุปกรณ์ได้อีกด้วย เมื่อกำหนด Mesh เสร็จสิ้นแล้วในส่วนของขั้นตอนที่เราต้องดำเนินการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าหรืออาจเรียกว่าขั้วไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อที่จะใช้สำหรับการไบอัสกระแสและแรงดันนั้น โดยขั้วไฟฟ้าที่ได้กำหนดขึ้นมาจะต้องประกาศชื่อตัวแปรดังกล่าวนี้อีกพร้อมกับพิกัดตำแหน่งด้วยเพื่อที่จะนำไปใช้ในเครื่องมือ Sentaurus Device อีกครั้งนั่นเอง



รูปที่ 3.11 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้าง Mesh

3.2.4 Sentaurus Device

เมื่อได้โครงสร้างที่มีการถูกกำหนด Mesh และถูกกำหนดขั้วไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำโครงสร้างดังกล่าวนี้ไปทำการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าโดยใช้ Sentaurus Device ซึ่งจะเป็นการใช้ในรูปแบบของชุดคำสั่ง (Command) เท่านั้น โดยที่ Sentaurus Device ก็เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือที่ใช้สำหรับหากต้องการที่จะดำเนินการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่มีลักษณะขึ้นกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical), ความร้อน (Thermal), แสง (Optical), หรือแม่เหล็ก (Magnetic) เป็นต้น ซึ่งในการจำลองพฤติกรรมของ คุณสมบัติต่างๆดังที่ได้กล่าวมานี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยโมเดลทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมด้วย ดังนั้นในการจำลองแบบอุปกรณ์ต้องคำนึงถึงโมเดลทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์นั้นๆ ด้วยเสมอ Sentaurus Device จึงได้มีการถูกนำมาใช้งานในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อทำความเข้าใจในพฤติกรรมการทำงานของตัวอุปกรณ์ตลอดจนเมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้สถานะที่มีคุณสมบัติต่างๆเพื่อต้องการให้สามารถทำงานได้ดีที่สุดนั่นเอง สำหรับชุดคำสั่งของ Sentaurus Device ประกอบไปด้วย

- *File* เป็นส่วนที่ระบุไฟล์อินพุตและเอาต์พุตสำหรับ Sentaurus Device

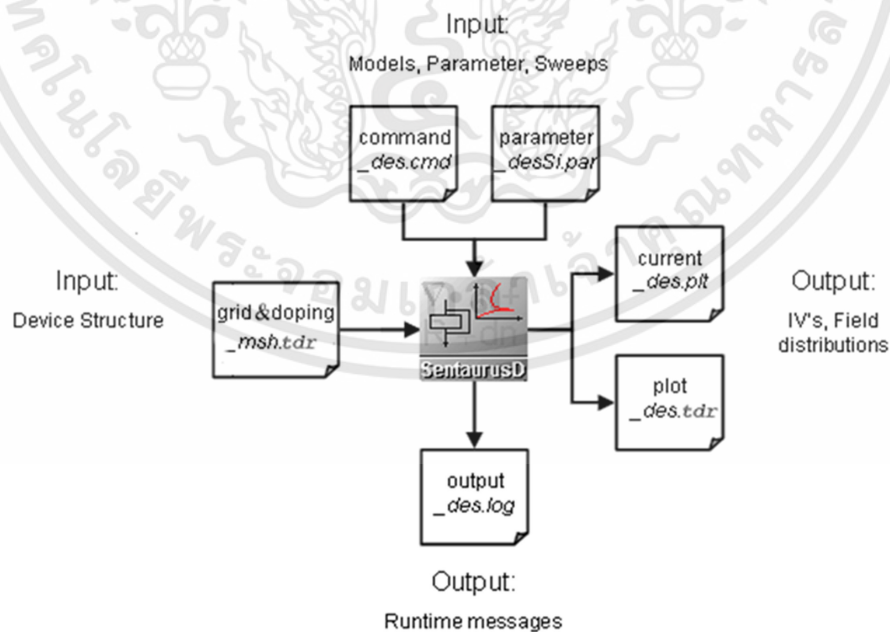
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

File {
* Input Files
Grid = "nmos_msh.tdr"
* Output Files
Current = "n1_des.plt"
Plot = "n1_des.tdr"
}

```

ในส่วนของ Input file จะเป็นไฟล์ _msh.tdr ซึ่งเป็นไฟล์ที่ได้หลังจากดำเนินการสร้างขึ้นมิติ รูปทรงหรือโครงสร้างให้กับตัวอุปกรณ์ด้วย Sentaurus Structure Editor เป็นที่เรียบร้อยแล้วซึ่งใน ส่วนของไฟล์ดังกล่าวนี้เองก็จะเป็นไฟล์ทางด้านโครงสร้างที่ได้ถูกกำหนด Mesh และ Doping เป็นที่ เรียบร้อยแล้ว นอกจากนี้แล้วในส่วนของ Input file ที่เป็นไฟล์ _des.cmd กับ _desSi.par ก็จะเป็น ไฟล์ซึ่งมีหน้าที่ในลักษณะเป็นคำสั่งในการทำการจำลองแบบและเกี่ยวข้องกับค่าตัวแปรหรือ พารามิเตอร์ต่างๆ ของโมเดลทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการจำลองแบบ ตัวอย่างเช่น วัสดุที่เลือกใช้ในการสร้าง ตัวอุปกรณ์, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, ลักษณะการโด๊ป, พิกัดตำแหน่งของหน้าสัมผัสไฟฟ้า และ ขนาดของการแบ่งกริด (Grid) หรือเมส (Mesh) นั่นเอง ต่อจากนั้นพิจารณาในส่วนของ Output file ที่ได้หลังจากดำเนินการจำลองแบบด้วย Sentaurus Device จนเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.12 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตของ Sentaurus Device

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งไฟล์เอาต์พุตเหล่านี้ก็จะประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆที่ผู้ใช้งานนั้นมีความต้องการ ด้วยการคำนวณที่ได้จากโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆ โดยจะประกอบไปด้วยไฟล์ _des.plt ซึ่งเป็นไฟล์สำหรับเพื่อใช้ในการตรวจสอบกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งในด้านของกระแสไฟฟ้ารวมถึงแรงดันไฟฟ้า และไฟล์ _des.tdr ซึ่งเป็นไฟล์ที่ใช้สำหรับเพื่อแสดง contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆโดยสามารถที่จะแสดงให้ผู้ใช้งานได้เห็น (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.12) ในส่วนท้ายสุดเป็นไฟล์ _des.log ซึ่งเป็นไฟล์ที่มีหน้าที่สำหรับเพื่อบ่งบอกถึงสถานะในการจำลองแบบรวมไปจนถึงเพื่อบ่งบอกให้ทราบถึงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นดังกล่าวอีกด้วยโดยจะถูกแสดงออกมาในรูปแบบของ log file นั้นเอง

- *Electrode* เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้าหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นส่วนที่ใช้สำหรับกำหนดขั้วไฟฟ้าเพื่อที่จะทำการจำลองแบบอุปกรณ์ซึ่งในส่วนดังกล่าวนี้เราสามารถที่จะทำการกำหนดคุณสมบัติของขั้วไฟฟ้าเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่แต่ละขั้ว ค่าความต้านทานที่ขั้วไฟฟ้า, รูปแบบหรือประเภของขั้วไฟฟ้ายรวมไปถึงค่าความสูงของกำแพงกั้นที่รอยต่อ (barrier) และคุณสมบัติอื่นๆอีกด้วย

```
Electrode {
{Name="source" Voltage=0}
{Name="drain" Voltage=0 Resistor=100}
{Name="base" Voltage=0 Current=0 WorkFunction=5}
{Name="HEMTgate" Voltage=0 Schottky Barrier=0.78}
}
```

และสิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการกำหนดขั้วไฟฟ้านั้นก็คือ เราจะต้องประกาศชื่อตัวแปรให้สอดคล้องตรงกันกับตอนที่ได้ทำการกำหนดขั้วไฟฟ้าใน Sentaurus Structure Editor อีกด้วย

- *Physics* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่จะถูกนำมาใช้ในการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น โมเดลที่เกี่ยวข้องกับสภาพคล่องของพาหะ (Carrier mobility model), โมเดลการพังทลายแบบอะวาลานซ์, โมเดลการเกิดและการผสมกลับของพาหะ (band-gap narrowing model), โมเดลกับดักพาหะ, การไอออไนซ์เนื่องจากการชน (impact ionization model) เป็นต้น

```
Physics {
Mobility ( DopingDep HighFieldSat )
Avalanche (Okuto)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EffectiveIntrinsicDensity (Slotboom)

Recombination (surfaceSRH)

}

ซึ่งในการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องเลือกโมเดลทางฟิสิกส์ให้มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ในแต่ละชนิด โดยหากขาดโมเดลบางอย่างก็อาจจะส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่แสดงพฤติกรรมบางอย่างออกมาก็เป็นได้ จากในชุดคำสั่งที่อยู่บริเวณด้านบนนี้สามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าตรงส่วนที่เป็นวงเล็บข้างหลังโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆ นั้นจะเป็นตัวบ่งบอกว่าเราได้ทำการเลือกใช้โมเดลรูปแบบใดอยู่ ตัวอย่างเช่น ส่วนสภาพคล่องของพาหะเราจะเลือกใช้โมเดลสภาพคล่องแบบที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ (Doping Dependence) และมีการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High Field Saturation) ดังนั้นในการเลือกโมเดลทางฟิสิกส์ที่จะนำมาใช้ก็จะต้องมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ (CMOS, Diode, BJT ฯลฯ) และยิ่งส่งผลเป็นอย่างมากต่อความแม่นยำของผลลัพธ์รวมถึงเวลาที่ใช้ในการจำลอง เป็นต้น

- Plot เป็นส่วนที่เราใช้สำหรับเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากที่ได้ทำการจำลองแบบในส่วนของ Sentaurus Device จนเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วและเป็นส่วนที่ใช้สำหรับกำหนดการแสดงผล contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ อีกด้วย ซึ่งเราสามารถที่จะเปิดการแสดงผล contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ดังกล่าวนี้ผ่านทาง Sentaurus visual ดังที่ได้กล่าวในลำดับต่อไป โดยเราสามารถที่จะทำการกำหนดในสิ่งที่เราต้องการทราบได้ เช่น ความหนาแน่นกระแสของพาหะอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี, ความเร็วของพาหะประจุ หรือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ ซึ่งสิ่งที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนี้เอง ได้ถูกเก็บไว้ในไฟล์เอาต์พุตในส่วนของ File ที่ได้เคยทำการกล่าวเอาไว้ในตอนต้นแล้ว ซึ่งตัวอย่างชุดคำสั่งในส่วนของ Plot นั้นดังแสดงให้เห็นที่บริเวณด้านล่าง

Plot {

eDensity hDensity eCurrent hCurrent

Potential SpaceCharge ElectricField

eMobility hMobility eVelocity hVelocity

Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

}

ส่วน Plot สามารถกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่ต้องการจะตรวจสอบหลังจากการจำลองแบบเสร็จสิ้นลง เช่น ความหนาแน่นของพาหะแต่ละชนิด สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความเร็วของพาหะ จำนวนสารเจือผู้ให้และผู้รับ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Math* เป็นส่วนที่กำหนดตัวแปรของการคำนวณทางคณิตศาสตร์

```
Math {
  Extrapolate
  RelErrControl
  NotDamped=50
  Iterations=20
}
```

Sentaurus Device จะหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในแต่ละ Mesh ด้วยการวนซ้ำ ซึ่งสำหรับการวนซ้ำในแต่ละครั้งนั้นก็จะมีค่าคำนวณในเรื่องของข้อผิดพลาด (error) ด้วยและ Sentaurus Device จะพยายามมุ่งไปที่ผลเฉลยที่มีข้อผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ ในส่วนนี้เราสามารถที่จะกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญห (solver type) รวมทั้งกำหนดเกณฑ์ข้อผิดพลาด (error criteria) และตัวเลือกอื่นๆ ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น Extrapolate จะเป็นลักษณะการคาดเดาขั้นตอนเริ่มต้นจากการอนุมานผลเฉลยของทั้งสองขั้นตอนก่อนหน้า (ถ้าหากมี) ส่วน RelErrControl ก็จะเป็นการสลับการควบคุมข้อผิดพลาดระหว่างการวนซ้ำจากการใช้ internal error parameter ไปยัง physically meaningful parameter (ErrRef) เป็นต้น

- *Solve* ส่วนดังกล่าวนี้จะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อกำหนดขั้นตอน การวัด และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ต้องการจำลองแบบ โดยสามารถที่จะกำหนดได้ในกรอบของคำสั่ง Solve {...} โดยจะทำการจำลองในลักษณะที่เรียงกันไปตามลำดับดังที่ปรากฏใน Solve {...} รวมทั้งยังทำหน้าที่สำหรับเป็นส่วนที่กำหนดลำดับของผลเฉลยที่ได้รับจากตัวแก้ปัญหและกำหนดสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหอีกด้วย

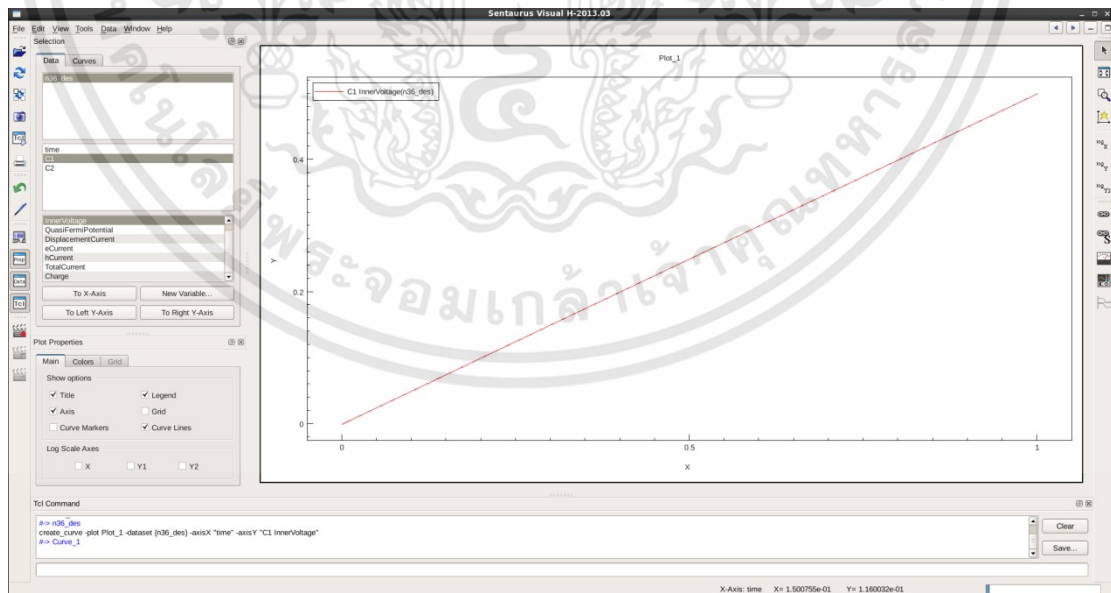
```
Solve {
  Poisson
  Coupled {Poisson Electron}
  Quasistationary (Goal {Name="gate" Voltage=2})
  {Coupled {Poisson Electron}}
}
```

Poisson เป็นส่วนที่สามารถใช้เพื่อสำหรับระบุได้ว่าผลเฉลยเริ่มต้น (initial solution) เป็นของสมการปัวซองที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว Coupled {Poisson Electron} จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแนะนำสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ของพาหะอิเล็กตรอนในขณะที่มีเงื่อนไขการไบอัสเริ่มต้น ซึ่งกรณีนี้ก็จะถูกแก้ปัญหาไปควบคู่ด้วยกันกับสมการปัวซองโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน (Newton Method) คำสั่ง Quasistationary เป็นการระบุว่าเราจะได้รับผลเฉลยที่อยู่ในสภาวะสมดุลคงตัว (steady state 'equilibrium') ส่วน Goal เป็นส่วนของการกำหนดเป้าหมายการไบอัสที่ขั้วไฟฟ้าตัวอุปกรณ์ ซึ่งขั้วไฟฟ้าดังกล่าวนี้จะถูกไบอัสเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่าที่ถูกตั้งไว้โดยใช้สมการความต่อเนื่องและสมการปัวซองในการหาผลเฉลย เป็นต้น

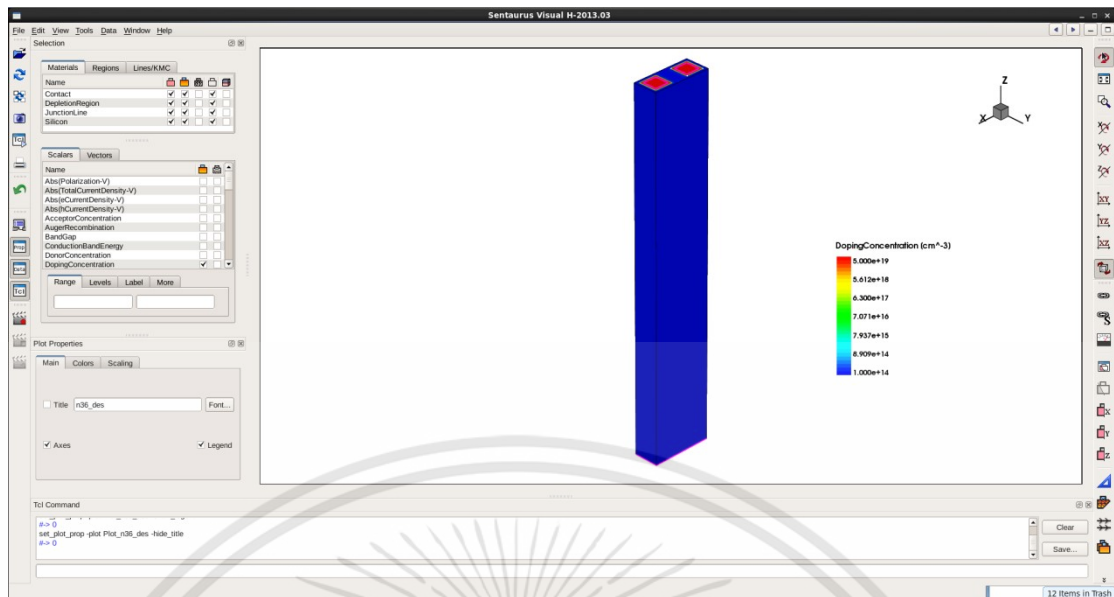
3.2.5 Sentaurus Visual

ในส่วนของ Sentaurus visual [35] ดังกล่าวนี้อจะเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับเพื่อดูผลลัพธ์ของการจำลองแบบ โดยสามารถที่จะแสดงมิติรูปทรงหรือโครงสร้างของอุปกรณ์ทั้งในรูปแบบที่เป็น 2 มิติ และรูปแบบที่เป็น 3 มิติได้ หลังจากที่ได้ทำการจำลองแบบในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จสิ้นลงเรียบร้อยแล้วเราก็จะสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบของแต่ละเครื่องมือ โดยใช้ Sentaurus visual ซึ่งเป็นที่ทราบกันมาบ้างแล้วในเบื้องต้นที่ว่านอกจากจะแสดงถึงมิติรูปทรงหรือโครงสร้างของอุปกรณ์ได้แล้วยังสามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงผลการจำลองแบบที่อยู่ในรูปแบบของกราฟที่เป็นลักษณะ 2 มิติได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น การแสดงผลปริมาณความหนาแน่นของการแพร่, ปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า, ปริมาณแรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่สร้างจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ ตลอดจนคุณลักษณะทางไฟฟ้าทั้งที่อยู่ในรูปแบบของกระแสและแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ (ไฟล์เอาต์พุตจะมีนามสกุลเป็น .plt) ดังที่ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 หน้าต่างของ Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .plt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 หน้าต่างของ Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .tdr

นอกจากนี้แล้ว Sentaurus visual ยังสามารถที่จะใช้ในการแสดงผลที่อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ของ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ได้อีกด้วย (ไฟล์เอาต์พุตนามสกุล .tdr) (รูปที่ 3.14) เช่น สนามไฟฟ้า Electric field), ความหนาแน่นกระแสทั้งหมด (Total current density), ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Potential), และรูปแบบการเจือ (Doping profile) เป็นต้น

3.3 การจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ด้วย TCAD

สำหรับในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ มิติรูปทรงหรือตัวโครงสร้างของอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมบางนั้นมาทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาออกแบบอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่ ด้วยการวางลักษณะโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ให้อยู่ในระนาบแนวตั้งพร้อมกับทำการจัดวางตำแหน่งของขั้วให้มีความเหมาะสม เพื่อให้สามารถที่จะตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ได้ ซึ่งโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ก็จะประกอบไปด้วยขั้วจำนวน 2 ขั้วที่สร้างอยู่บนฐานรอง โดยมีหนึ่งขั้วทำหน้าที่เป็นขั้วสำหรับเพื่อให้กระแสไหลเข้า ส่วนอีกขั้วที่เหลือก็จะทำหน้าที่เป็นขั้วสำหรับเพื่อให้กระแสไหลออก ซึ่งหากพิจารณาดูก็จะทราบได้ว่าลักษณะดังที่กล่าวมาในเบื้องต้นนี้เป็นลักษณะโครงสร้างที่คล้ายคลึงกับของตัวต้านทานธรรมดาทั่วไปนั่นเอง พร้อมทั้งที่ขั้วทั้งสองของอุปกรณ์ก็จะไว้ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นด้วย ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นี้จะทำการไบอัสกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อต้องการที่จะศึกษาผลการตอบสนองแมกนีโตรีซิสแทนท์ที่มีต่อสนามแม่เหล็กของตัวอุปกรณ์ จึงได้ทำการป้อนสนามแม่เหล็กโดยมีทิศทางขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ [37] และตั้งฉากกับทิศทางกระแส จากนั้นก็ทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น วัสดุของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

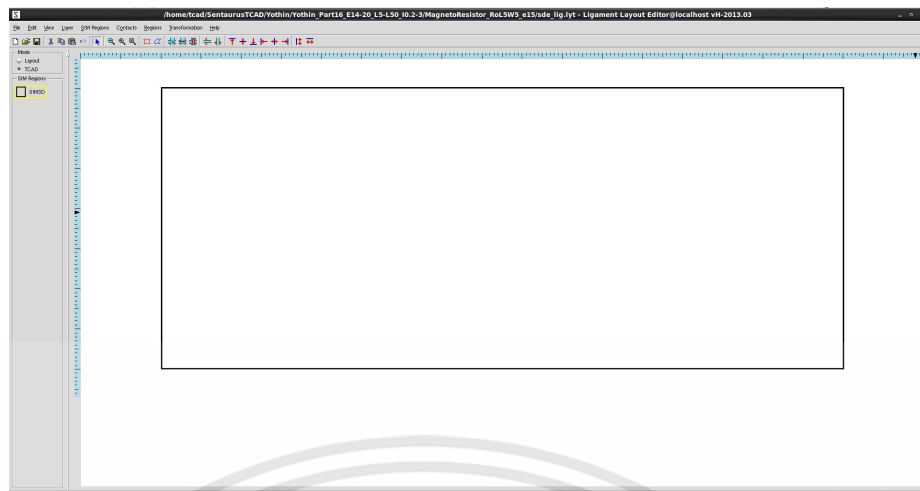
สารเจือ, มิติรูปทรง และ กระแสไบอัส เป็นต้น เพื่อดูผลการตอบสนองที่มีต่อสนามแม่เหล็กแวนอนของอุปกรณ์ว่ามีลักษณะเป็นอย่างไรรวมทั้งมีปริมาณมากน้อยเพียงใดอีกด้วย ดังนั้นสำหรับการศึกษาครั้งนี้จะเน้นไปที่ การตรวจสอบผลเอาต์พุตแมกนีโตริซิสแทนท์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแวนอน ซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งได้จากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส [38] นั่นเอง

ในส่วนของการจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD นี้จะมีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์โดยเราสามารถที่จะทำการแบ่งการดำเนินงานออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการออกแบบมิติรูปทรงหรือการขึ้นโครงสร้างตัวอุปกรณ์และกำหนด Mesh ให้กับตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือของ Sentaurus Structure Editor ซึ่งในการจำลองแบบของส่วนดังกล่าวนี้ ผู้ที่ต้องการใช้งานหรือมีหน้าที่รับผิดชอบในด้านการออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องของกระบวนการสร้างเสียก่อนจึงจะสามารถดำเนินการลงมือออกแบบได้ [35] ต่อจากนั้นหลังจากที่ได้ดำเนินการในส่วนของการขึ้นโครงสร้างอุปกรณ์จนเสร็จสิ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว [36] ก็จะเป็นในส่วนที่สองซึ่งเกี่ยวข้องกับการกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่จะถูกนำมาใช้จำลองแบบพฤติกรรมต่างๆ โดยจะเป็นการดำเนินการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือของ Sentaurus Device แล้วจึงนำข้อมูลหรือผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มาแสดงผลเป็นส่วนสุดท้าย ซึ่งในขั้นตอนการจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์นี้สามารถที่จะอธิบายได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

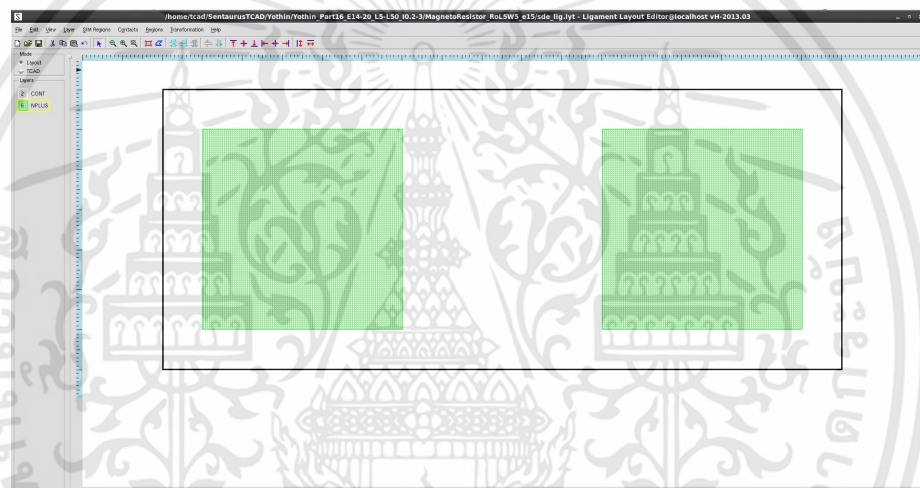
3.3.1 การออกแบบ Layout ของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์

หลังจากที่เราได้ทราบถึงมิติรูปทรงหรือโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่ต้องการจะทำการสร้างขึ้นมาจนเป็นที่แน่ชัดแล้วนั้น ลำดับต่อมา ก็จะเป็นส่วนของขั้นตอนในการจำลองแบบด้วย Layout ก่อนที่จะนำไปสู่กระบวนการสร้างเป็นตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์นั้นขึ้นมา โดยจะต้องเริ่มต้นจากการลงมือออกแบบสร้าง Layout ให้กับตัวอุปกรณ์เสียก่อน ซึ่งในส่วนของการออกแบบ Layout ดังกล่าวนี้สามารถที่จะดำเนินการสร้างโดยใช้เครื่องมือย่อย Ligament Layout Editor ที่อยู่ในส่วนของ Sentaurus Structure Editor ได้นั่นเอง ด้วยการเลือกที่จะใช้งาน Ligament Layout Editor ได้นั้นจะต้องไปเลือกที่ SDE ในหน้าต่างหลักของ Sentaurus Workbench เสียก่อนจากนั้นจึงสามารถที่จะทำการเลือกได้ว่า จะดำเนินการจำลองแบบโครงสร้างอุปกรณ์ในรูปแบบที่เป็นไฟล์ชุดคำสั่งหรือว่าจะเป็นในรูปแบบของการใช้ไฟล์คำสั่ง Ligament พอหลังจากที่ได้ทำการเลือกใช้ไฟล์คำสั่ง Ligament แล้วก็จะทำให้สามารถใช้งาน Ligament Layout Editor ได้นั่นเอง ซึ่งการออกแบบ layout ด้วยการจำลองแบบก็เป็นลักษณะที่คล้ายกันกับการสร้างลวดลายบนกระจกต้นแบบ (Mask) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) และเมื่อได้ทำการเข้าสู่ในส่วนของ Ligament Layout Editor แล้ว สิ่งแรกจะเป็นในส่วนของการกำหนดพื้นที่บริเวณที่ต้องการจะจำลองแบบเป็น 3 มิติขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 3.15(a) ซึ่งจากรูปดังกล่าวนี้จะเห็นได้ว่าเป็นการแสดงให้เห็นถึงมุมมองทางด้านบนของตัวอุปกรณ์ และบริเวณนี้เองก็จะใช้กำหนดเป็นขนาดของตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.15 Layout ของอุปกรณ์แมกนีตริซิสเตอร์ที่สร้างด้วย Ligament Layout Editor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

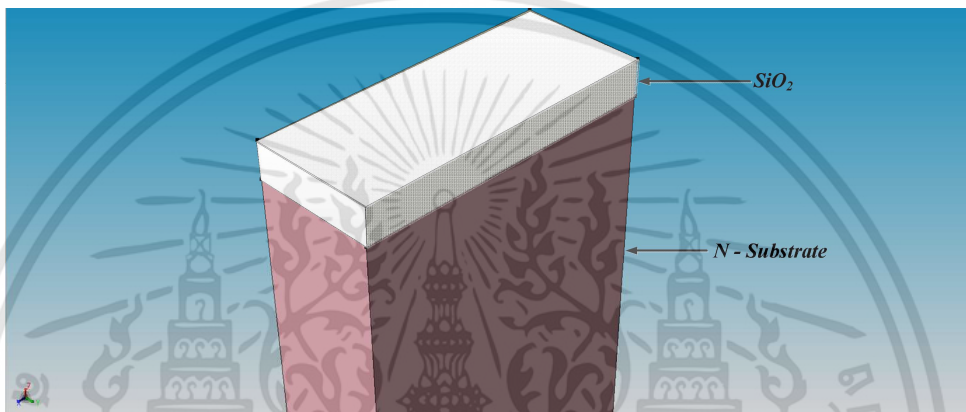
อุปกรณ์รวมทั้งเป็นพื้นที่บริเวณฐานรองของตัวอุปกรณ์ด้วย โดยในเบื้องต้นได้ทำการออกแบบให้มีขนาดความยาวเท่ากับ 17 ไมโครเมตรและมีขนาดความกว้างเท่ากับ 7 ไมโครเมตรพร้อมกับกำหนดชื่อเป็น SIM3D ชั้นตอนต่อมาจะเป็นการทำในส่วนของการออกแบบ Layout พื้นที่บริเวณที่จะสร้างเป็นขั้วทั้งสองของตัวอุปกรณ์ ซึ่งในการออกแบบตรงส่วนนี้ได้ทำการกำหนดพื้นที่บริเวณเงื่อสารเพื่อต้องการทำให้รอยสัมผัสที่อยู่ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นลักษณะรอยสัมผัสแบบโอห์มิก และกำหนดให้เป็น Layer ที่มีชื่อว่า NPLUS ซึ่งได้ทำการออกแบบให้มีขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.15(b) และในเบื้องต้นขั้วทั้งสองนี้จะวางในระยะที่ห่างกันเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วจนไปถึงตำแหน่งขอบด้านข้างรวมทั้งกับตำแหน่งขอบบนและขอบล่างของตัวอุปกรณ์จะถูกกำหนดเป็น 1 ไมโครเมตร จากนั้นจะเป็นการกำหนด Layer ส่วนสุดท้ายขึ้นมาและกำหนดชื่อเป็น CONT เพื่อต้องการที่จะนำมาใช้เป็น Layer สำหรับการสร้างในส่วนของชั้นโลหะตลอดจนการทำเป็นขั้วไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ โดยจะออกแบบให้มีมิติหรือขนาดรูปร่างที่เล็กกว่าขนาดของบริเวณที่ถูกเงื่อสารลงไปและสร้างลงบนพื้นที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.15(c) หลังจากที่ผ่านมาในส่วนของการกำหนดพร้อมกับการวาดโครงสร้างของ Layer ทั้งสองนี้ลงบน Layout แล้วก็จะป็นอันเสร็จสิ้นในขั้นตอนการออกแบบ Layout สำหรับอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ นั่นเอง ซึ่ง Layout ที่ได้จากการออกแบบดังกล่าวนี้ก็จะถูกนำไปใช้ในส่วนของ Pattern ของเครื่องมือย่อย Ligament Flow Editor ดังที่จะได้อธิบายในหัวข้อถัดไปนี้

3.3.2 การกำหนดลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์

หลังจากที่ได้ดำเนินการออกแบบในส่วนของการ layout จนป็นอันเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้วนั้น ลำดับต่อมาจะเป็นการกำหนดลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์โดยใช้เครื่องมือย่อย Ligament Flow Editor มาช่วยนั่นเอง ซึ่งในส่วนดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถที่จะเลือกใช้กระบวนการต่างๆ มากำหนดให้เป็นลำดับขั้นตอนเพื่อที่จะใช้สร้างตัวอุปกรณ์ขึ้นมา โดยลำดับขั้นตอนของกระบวนการที่ใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ด้วย Ligament Flow นี้จะขอกกล่าวลงในรายละเอียดอย่างคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

- *Environment* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการกำหนดชื่อให้กับตัวอุปกรณ์ ซึ่งชื่อที่กำหนดขึ้นมาดังกล่าวนี้น่าจะเป็นที่จะต้องให้ตรงกันกับในเครื่องมือย่อย Ligament Layout (SIM3D) ด้วย โดยการกำหนดพื้นที่บริเวณที่ใช้ในการจำลองแบบทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ รวมไปถึงยังสามารถที่จะดำเนินการกำหนดความหนาของแผ่นฐานรองของตัวอุปกรณ์ได้อีกด้วย และเพื่อป็นในกรณีสำหรับการกำหนดเครื่องมือที่จะใช้ในการจำลองแบบ ซึ่งในที่นี้ได้ใช้การจำลองแบบผ่านทางเครื่องมือย่อย Sentaurus Structure Editor (SDE)

- *Substrate* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการกำหนดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ทำเป็นฐานรองอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น ชนิดหรือประเภทของวัสดุ (Material), อะตอมสารเจือ (Dopant), ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Concentration), สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (Resistivity) และระนาบผลึก (Orientation) ซึ่งในการจำลองแบบดังกล่าวนี้เราได้ใช้ชนิดของวัสดุฐานรองที่เป็นซิลิคอน (Silicon) ที่ถูกเจือด้วยอะตอมฟอสฟอรัส (phosphorus) เพื่อต้องการที่จะทำให้เป็นฐานรองที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด n และเป็นการสร้างขึ้นของชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปกคลุมอยู่ที่บริเวณพื้นผิวด้านบนแผ่นผลึกฐานรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.16



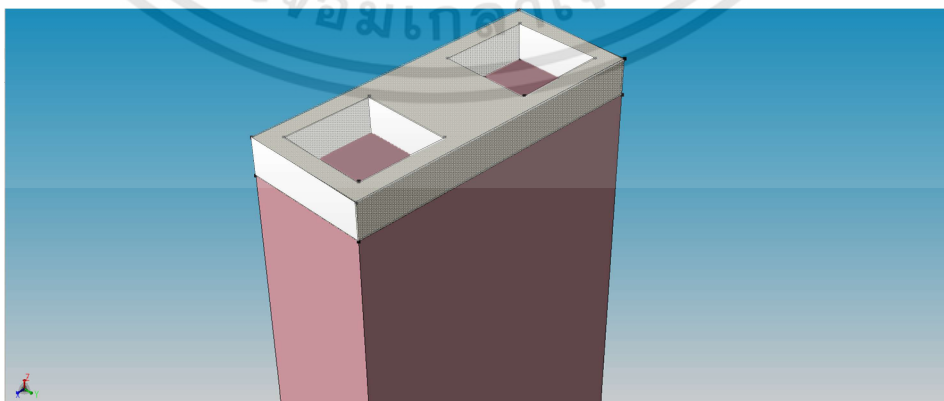
รูปที่ 3.16 Substrate ที่ใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองอุปกรณ์

ในเบื้องต้นฐานรองจะถูกกำหนดให้มีความเข้มข้นเป็น 1×10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขการทดลอง เนื่องจากว่าในการจำลองแบบครั้งนี้ได้ทำการกำหนดฐานรองในรูปแบบของความเข้มข้นเพราะฉะนั้นในส่วนของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดเพราะตัวแปรทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กันอยู่แล้ว

- *Comment* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการระบุข้อความที่ต้องการจะบันทึกเอาไว้หรือเป็นข้อความในลักษณะการบอกถึงรายละเอียดต่าง ๆ ซึ่งในส่วนตรงนี้สามารถที่ทำการจะพิมพ์ลงไปหรือจะไม่พิมพ์ลงไปก็ได้
- *Insert* ส่วนแรกนี้เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อระบุความเข้มข้นของอะตอมสารเจือและความลึกของรอยต่อ ซึ่งเรากำหนดให้ความเข้มข้นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่จะถูกเจือลงไปนั้นมีค่าเท่ากับ 5×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อที่จะสร้างเป็นพื้นที่บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูง (N^+) ส่วนที่ความลึกของรอยต่อนั้น เราได้ประกาศเป็นตัวแปร x_j ใน Sentaurus Workbench โดยกำหนดให้มีความลึกเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

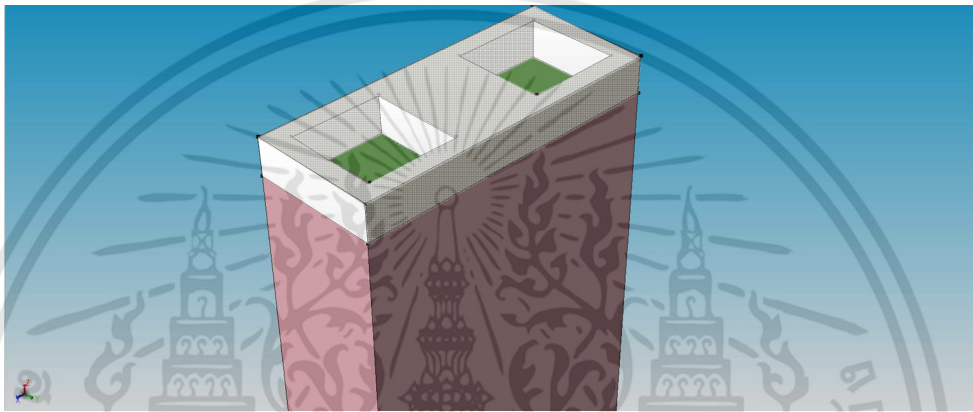
- *Insert* ส่วนต่อมาเป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อระบุรูปแบบการเจือ (Doping profile) โดยเราเลือกที่รูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian profile) ซึ่งเป็นการกระจายตัวในลักษณะการแพร่ที่สมมาตร และมีการระบุประเภทของอะตอมสารเจือเป็นการเจือสารชนิด n โดยใช้ชื่อการเจือเป็น “DP.IMP2” (ActiveConcentration NDopant) มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงสุดเท่ากับ 5×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (PeakVal) เป็นการนำมาจากส่วนที่ประกาศใน Insert ส่วนแรก ส่วนในตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงสุด (PeakPos) ถูกกำหนดเป็น 0 นั่นก็คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงสุดอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองในบริเวณที่ถูกเจือ และค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ค่าความลึกรอยต่อ (ValueAtDepth) ก็จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรอง ซึ่งความลึกของรอยต่อนั้นก็จะถูกกำหนดตามตัวแปรที่ได้ประกาศไปในส่วนของ Insert ก่อนหน้า (xj) และส่วนสุดท้ายเป็นการกำหนดให้แฟกเตอร์การกระจายแบบเกาส์เซียนเท่ากับ 0.8
- *Pattern* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อกำหนดลวดลายของหน้ากากในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีซึ่งอ้างอิงลวดลายจาก layout ที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้วใน Ligament Layout Editor ช่วงตอนต้น โดยจะเริ่มจาก layout ที่เป็น layer NPLUS ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณที่จะทำการเจือสารลงไป ในส่วนดังกล่าวนี้สามารถที่จะกำหนดประเภทของหน้ากากหรือ layout (ตรงส่วน polarity) ว่าจะให้เป็นในลักษณะแบบ light field หรือ dark field ในการสร้างลวดลายตาม layout ที่เราได้ทำการออกแบบมา โดยในส่วนนี้ก็จะมีการสร้างชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวก ลำดับต่อจากนั้นจะเป็นการฉายแสงและกัดน้ำยาไวแสงออกจนทำให้เกิดเป็นลวดลายขึ้น (หลังจบบนชั้นตอนนี้จะเกิดลวดลายขึ้นบนชั้นน้ำยาไวแสง) ก่อนที่นำไปสู่ขั้นตอนการยิงฝิ่งพาหะประจุเข้าไป นอกจากนี้แล้วยังสามารถกำหนดความหนา (Thickness) ของชั้นน้ำยาไวแสงและด้าน (Side) ที่จะทำการสร้างลวดลายได้ด้วย ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 Pattern สำหรับกำหนดพื้นที่บริเวณที่จะถูกเจือสารลงไป

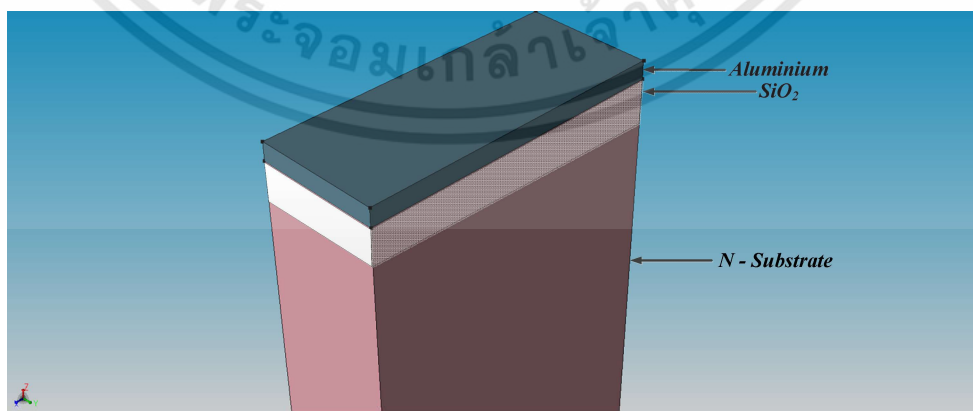
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Insert เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อดำเนินการให้อิงผังพาหะประจุด้วยอะตอมสารเจือชนิด n ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปยังพื้นที่บริเวณแผ่นฐานรองที่ถูกสร้างสวดลายตามขั้นตอนก่อนหน้า (อ้างอิงตามการประกาศชื่อการเจือ DP.IMP2) ดังนั้นในส่วนของพื้นที่บริเวณที่มีชั้นน้ำยาไวแสงปกคลุมอยู่จะทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการเจือสารให้กับฐานรอง และส่วนพื้นที่บริเวณที่ชั้นน้ำยาไวแสงนั้นถูกกัดออกก็จะถูกเจือด้วยอะตอมสารเจือตามที่เรากำลังต้องการ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 Insert ที่ใช้สำหรับเพื่อระบุงการยิงผังประจุ

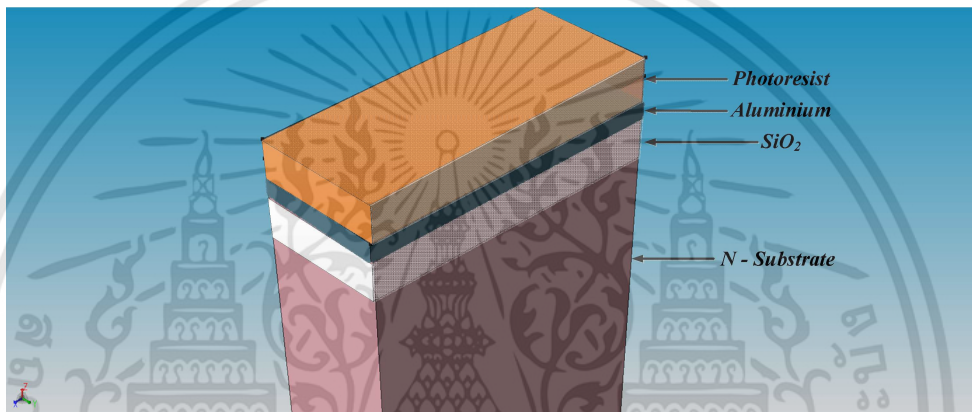
- *Anneal* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับนำแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวไปอบด้วยความร้อนสูง โดยดำเนินการตั้งให้มีการแอนนิลที่ระดับอุณหภูมิเท่ากับ 900°C ซึ่งใช้ระยะเวลาที่นานถึง 30 นาที ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm เพื่อต้องการให้โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายลงไปหลังการยิงผังประจุอะตอมฟอสฟอรัสอย่างเข้มข้นเข้าไปในเนื้อผลึกนั้นเกิดการจับตัวขึ้นมาใหม่นั่นเอง



รูปที่ 3.19 Etch สำหรับเป็นส่วนที่กำหนดการกัดชั้นน้ำยาไวแสงและสร้างชั้นโลหะ

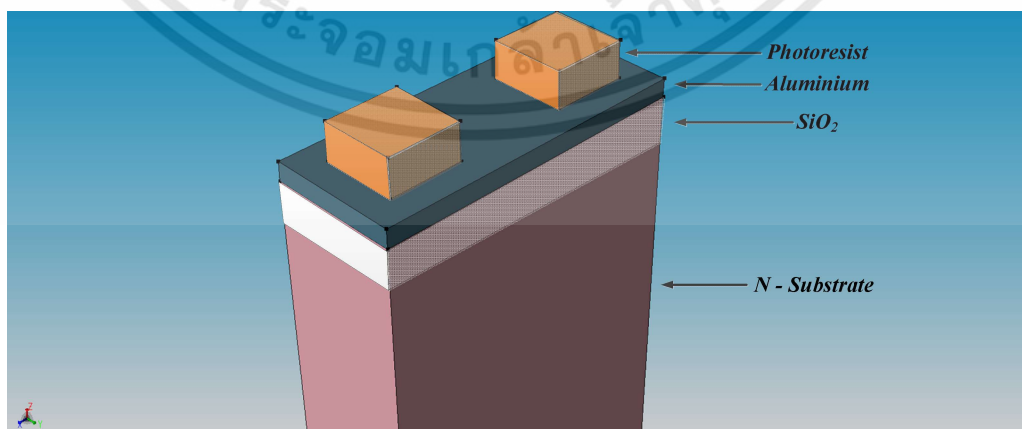
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Etch* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อการกัดชั้นน้ำยาไวแสง (Photo Resist) ที่อยู่บนตำแหน่งบริเวณเหนือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ของพื้นผิวฐานรองออก (Strip) ทั้งหมด รวมถึงเป็นขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิวเพื่อรอกระบวนการขั้นต่อไป ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.19
- *Deposit* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะด้วยกระบวนการ deposition ซึ่งได้ดำเนินการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมที่มีระดับของความหนาเท่ากับ 1 ไมโครเมตร เพื่อเป็นการสร้างการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 Deposit ที่ใช้สำหรับเพื่อเป็นการสร้างชั้นโลหะ

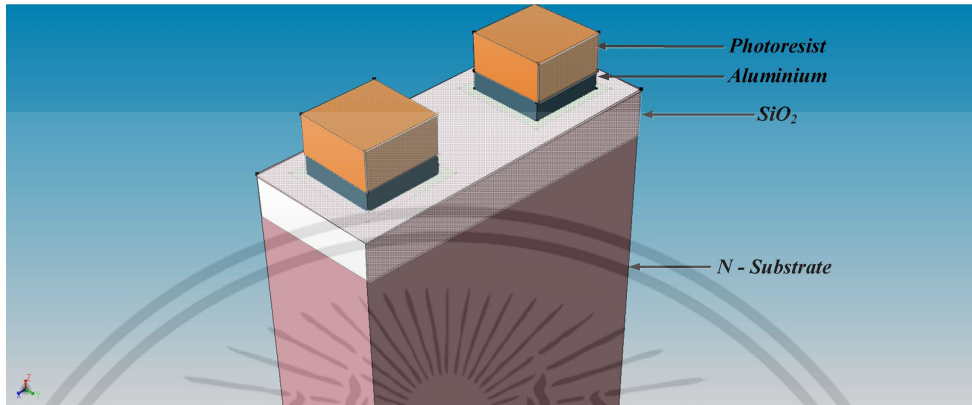
- *Pattern* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อการสร้างลวดลายตาม layer ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวนี้ก็จะเป็นการสร้างในส่วนของชั้นโลหะ (CONT) ขึ้นมา โดยใช้ porality ประเภท light field หรือเทคนิคที่เรียกว่า Photolithography ด้วยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ ดังในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 Pattern สำหรับเป็นการสร้างขั้วไฟฟ้า

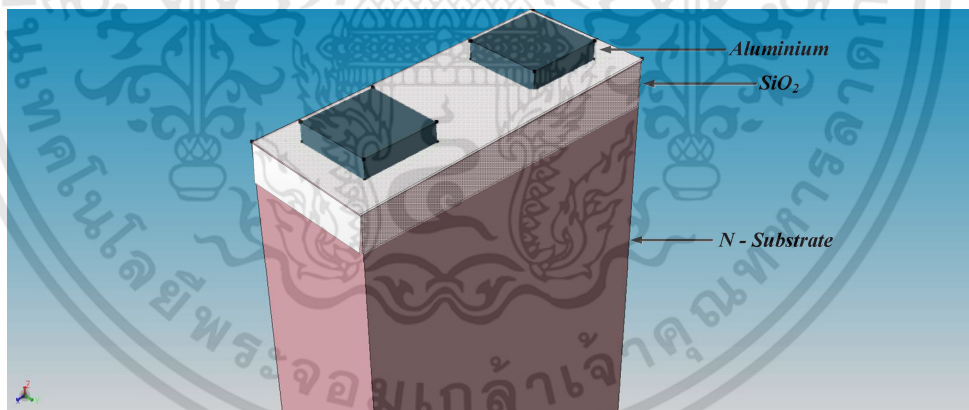
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Etch* เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเพื่อการกัดชั้นโลหะตามลวดลาย (Pattern) ที่ได้ดำเนินการประกาศเอาไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 Etch ที่ใช้สำหรับกัดชั้นของโลหะ

- *Etch* ในส่วนสุดท้ายนี้เป็นส่วนที่ใช้สำหรับการกัดชั้นน้ำยาไวแสงที่บริเวณพื้นที่ผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นฐานรองอุปกรณ์ออกทั้งหมด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.23

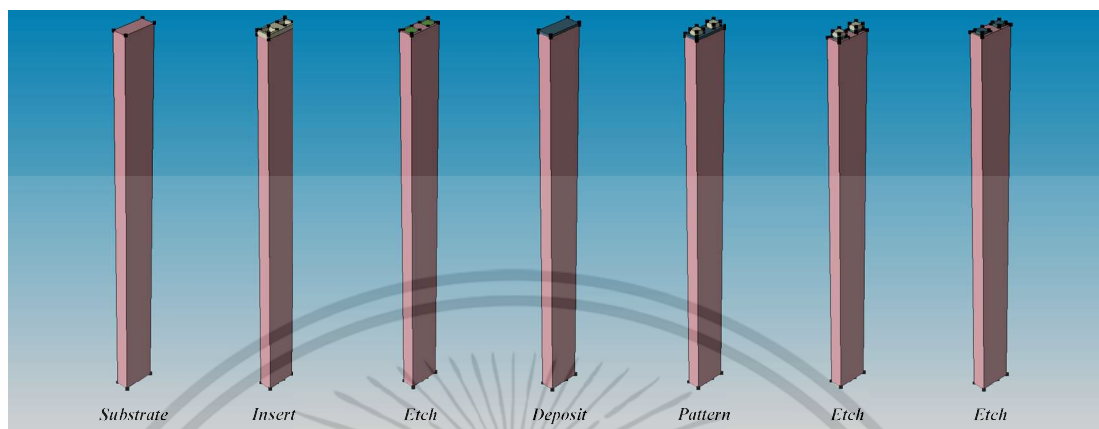


รูปที่ 3.23 Etch ในขั้นตอนสุดท้ายสำหรับกัดชั้นน้ำยาไวแสงที่บริเวณพื้นที่ผิวออกทั้งหมด

หลังจากที่ได้ทำการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้างของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ใน Ligament Flow Editor รวมทั้งได้ดำเนินการ (Run) จนเป็นอันเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้วนั้น ผลที่ได้ก็จะปรากฏมิติรูปทรงของอุปกรณ์พร้อมกับข้อผิดพลาดที่เรานำมาทำการออกแบบไว้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.24 ซึ่งมีมิติรูปทรงดังกล่าวที่ได้นี้เองจะยังไม่ปรากฏ Contour ของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในพื้นที่ยังไม่มีการเจือสารลงไป เนื่องจากว่าเรายังไม่ได้กำหนดในส่วนของ Mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

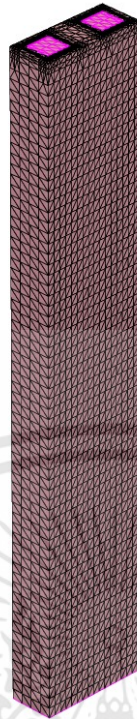
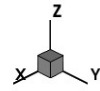
นั่นเอง ดังนั้นในส่วนของขั้นตอนถัดไปจะเป็นการกล่าวถึงในส่วนของการดำเนินการสร้างโครงตาข่าย (Mesh) พร้อมด้วยกับการกำหนดหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าหรือขั้วไฟฟ้า (Contact) ให้กับตัวอุปกรณ์



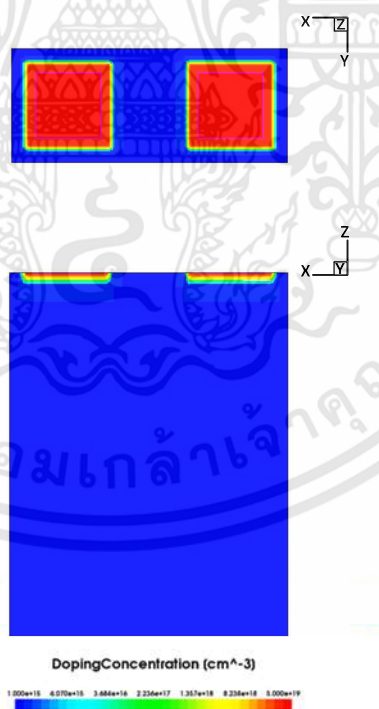
รูปที่ 3.24 การขึ้นรูปโครงสร้างอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ด้วย Ligament Flow Editor

3.3.3 การสร้าง Mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์

ในส่วนของการสร้างโครงตาข่าย (Mesh) สำหรับเพื่อใช้ในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเราสามารถที่จะกำหนดความละเอียดของ Mesh ได้โดยใช้เครื่องมือ Utilities Function ที่เป็นคำสั่งซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อให้การสร้าง Mesh ดังกล่าวนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงความละเอียดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และคำสั่ง Refinement Boxes ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถนำมาช่วยในการกำหนดพื้นที่บริเวณความละเอียดที่ต้องการได้ โดยเราสามารถที่จะกำหนดให้ความละเอียดของ Mesh มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.1 ไมโครเมตร และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2 ไมโครเมตร (สำหรับในทุกแนวแกน x, y, z) เพื่อต้องการให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งในบริเวณของขั้วสัมผัสโลหะหรือขั้วไฟฟ้าและแผ่นผลึกซิลิคอนของตัวฐานรองทั้งหมด ซึ่งในส่วนตรงตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (บริเวณขั้วทั้ง 2) ก็จะถูกกำหนดด้วยรูปแบบการสร้างให้มีความละเอียด Mesh มากที่สุดในทุกแนวแกน ด้วยการกำหนดในส่วน Utilities Function นั่นเอง และเพื่อให้ได้ความละเอียดรวมทั้งในส่วนของความถูกต้องของการประมวลผลทางด้านคณิตศาสตร์หลังจากที่ได้ทำการกำหนด Mesh เสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นในส่วนขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเขียนคำสั่งเพื่อเป็นการระบุหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยจำเป็นที่จะต้องทำการระบุชื่อและตำแหน่งที่เป็นรูปแบบของระบบพิกัดในแต่ละแนวแกนให้อยู่ในส่วน of ขั้วสัมผัสโลหะทั้งสองที่เราได้ทำการสร้างขึ้นมา ซึ่งมีรูปร่างหรือโครงสร้างของตัวอุปกรณ์หลังจากที่ได้ดำเนินการกำหนดโครงตาข่ายและหน้าสัมผัสไฟฟ้าจนเป็นอันเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้นจะทำการแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 3.25 นั่นเอง



รูปที่ 3.25 โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจากกำหนดโครงตาข่ายและหน้าสัมผัสไฟฟ้าแล้ว



รูปที่ 3.26 โครงสร้างของอุปกรณ์แมกนีไตรีซิสเตอร์และภาคตัดขวางที่แสดงบริเวณที่ถูkJเจือสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในส่วนของมิติรูปทรงหรือโครงสร้างที่ได้หลังจากเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ ใน Ligament Flow Editor รวมไปถึงที่ได้ผ่านการกำหนด Mesh และหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ แมกนีโตรีซิสเตอร์แล้วนั้น สามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่ถูกเจือสารลงไปซึ่งแสดง อยู่ในรูปที่ 3.26 นอกจากนี้แล้วหากมีความต้องการดำเนินงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเรายัง สามารถที่จะดูรูปแบบการเจือสาร (Doping profile) ของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ได้ด้วยผ่านทางเครื่องมือใน Sentaurus Visual ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นสารเจือ หรือความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่เกิดขึ้นในพื้นที่บริเวณขั้วไฟฟ้ารวมทั้งตำแหน่งพื้นที่บริเวณตัวแผ่น ผลึกซิลิคอนฐานรองทั้งหมดของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ได้อีกด้วย

3.3.4 การจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์

หลังจากที่ได้มิติรูปทรงหรือโครงสร้างของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในส่วนของขั้นตอนต่อจากนี้ไปก็จะเป็นการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วย Sentaurus Device ซึ่งการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะต้องระบุโมเดลทางฟิสิกส์ ที่จะถูกนำมาใช้ในการจำลองพฤติกรรมต่างๆ โดยโมเดลทางฟิสิกส์ที่จะทำการเลือกนำมาใช้งานกับ ตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั้นก็คือ โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (mobility), และโมเดลทางแม่เหล็ก (galvanomagnetic) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- *Physics { Mobility (DopingDependence (Masetti) HighFieldSaturation (Canali) CarrierCarrierScattering (ConwellWeisskopf)) }*

โดยที่สภาพคล่องของพาหะประจุสามารถที่จะถูกระบุได้ด้วยคำสั่ง Mobility ซึ่งเป็นการระบุ สภาพคล่องของพาหะประจุทั้งที่เป็นอนุภาคอิเล็กตรอนและโฮล โดยในคำสั่งดังกล่าวนี้เองทำให้ สามารถระบุโมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุได้มากกว่าหนึ่งโมเดล ในกรณีหากมีการระบุสภาพ คล่องของพาหะประจุมากกว่าหนึ่งโมเดล ทำให้เกิดสภาพคล่องของพาหะประจุที่แตกต่างกัน (μ_1, μ_2, \dots) สำหรับภายในเนื้อสารของวัสดุ (Bulk), สภาพคล่องของพาหะประจุที่บริเวณพื้นผิว (Surface mobility), และในวัสดุที่มีลักษณะเป็นชั้นบางๆ (Thin layers) จะถูกนำมารวมกันโดยใช้กฎของ Matthiessen (Matthiessen's rule) ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \dots \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในกรณีถ้ามีการใช้งานโมเดลการอิมิตัวที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มในระดับที่สูง (High-field saturation) สภาพคล่องของพาหะประจุในส่วนสุดท้ายจะถูกคำนวณเป็นสองขั้นตอน ซึ่งอันดับแรกเป็นสภาพคล่องของพาหะประจุที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มในระดับที่ต่ำ (μ_{low}) และในลำดับต่อมาสภาพคล่องของพาหะประจุขั้นสุดท้ายจะเป็นการถูกคำนวณจากสูตรที่เป็นฟังก์ชันของแรงขับ (driving force ; F_{hfs}) ตามสมการที่ 3.2

$$\mu = f(\mu_{low}, F_{hfs}) \quad (3.2)$$

โดยที่ในส่วนของโมเดลสภาพคล่องหรือสภาพการเคลื่อนที่ได้ของพาหะประจุตัวแรกที่ได้ทำการเลือกใช้ นั่นก็คือ Doping Dependence ซึ่งเป็นโมเดลการลดลงของสภาพคล่องของพาหะประจุ (mobility degradation) อันมีสาเหตุเนื่องมาจากการกระเจิงกับอะตอมสารเจือหรือสิ่งเจือปน (impurity scattering) จึงได้ทำการเลือกใช้โมเดลสภาพคล่องของ Masetti ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานสำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอน นอกจากนี้แล้วในส่วนของสภาพคล่องของพาหะประจุที่มีการเจือสารในระดับที่ต่ำ (low-doping mobility) μ_{const} ก็จะถูกระบุด้วยโมเดลสภาพคล่องคงที่ (constant mobility model) ซึ่งเป็นโมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุที่มีค่าขึ้นกับในส่วนของ การกระเจิงจากโฟนอนเท่านั้น (phonon scattering) ดังนั้น ตัวโมเดลดังกล่าวนี้เองจึงมีค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของแลตทิซเพียงอย่างเดียว ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 3.3

$$\mu_{const} = \mu_L \left(\frac{T}{300K} \right)^{-\zeta} \quad (3.3)$$

ซึ่ง μ_L เป็นสภาพคล่องของพาหะประจุอันเนื่องมาจากการกระเจิงกับโฟนอนภายในเนื้อสาร (bulk phonon scattering) ค่ามาตรฐานของ μ_L และตัวยกกำลัง ζ จะถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่

Symbol	Electrons	Holes	Unit
μ_L	1417	470.5	cm^2/Vs
ζ	2.5	2.2	-

สำหรับโมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มในระดับต่ำ รวมทั้งในส่วนของโมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุที่มีค่าขึ้นกับความเข้มชั้นอะตอมของสารเจือแล้ว เรายังสามารถที่จะเลือกใช้โมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุอีกโมเดลหนึ่งนั่นก็คือโมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุที่มีค่าขึ้นกับการกระเจิงระหว่างพาหะประจุกับพาหะประจุ (carrier-carrier scattering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกันเอง ดังนั้นโมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุที่ความเข้มข้นไฟฟ้ามีค่าในระดับระดับต่ำจะประกอบไปด้วย โมเดลสภาพคล่องของพาหะประจุที่ขึ้นกับ impurity scattering, carrier-carrier scattering และ phonon scattering โดยการกระเจิงรูปแบบดังกล่าวนี้เองจะถูกกำหนดอยู่ในโมเดลของ impurity scattering อยู่แล้ว ซึ่งจากกฎของ Matthiessen จะทำให้สามารถระบุสภาพคล่องของพาหะประจุที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มข้นในระดับต่ำได้ตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 3.4

$$\frac{1}{\mu_{low}} = \frac{1}{\mu_{dop}} + \frac{1}{\mu_{eh}} \quad (3.4)$$

สำหรับโมเดลการอิมิตัวสภาพคล่องของพาหะประจุที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มข้นในระดับสูง (High-Field Saturation) ซึ่งในสนามไฟฟ้าที่มีค่าความเข้มข้นในระดับที่สูงดังกล่าว ความเร็วลอยเลื่อนของพาหะประจุจะไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าอีกต่อไป แต่ความเร็วจะอิมิตัวสู่ความเร็วจำกัด v_{sat} ทำให้โมเดลการอิมิตัวที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มข้นในระดับที่สูงนั้นจะประกอบไปด้วย โมเดลย่อย 3 โมเดล ก็คือ โมเดลสภาพคล่องจริง (actual mobility model), โมเดลการอิมิตัวของความเร็ว (velocity saturation model) และโมเดลของแรงขับ (driving force model) โดยโมเดลมาตรฐานของการอิมิตัวดังกล่าวที่สนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มข้นในระดับที่สูงจะเป็นโมเดลของ Canali

■ *Physics { MagneticField = (0.0, 0.0, 0.0) }*

สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์ผลกระทบที่ปรากฏขึ้นจากสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จึงได้ทำการเลือกใช้โมเดลการขนส่งพาหะประจุแบบกัลวานิก (Galvanic transport model) ซึ่งโมเดลดังกล่าวนี้เองเป็นโมเดลที่อาศัยสมการความหนาแน่นกระแสการแพร่-ลอยเลื่อนที่เพิ่มในส่วนของเทอมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไป โดยสิ่งที่กระทำต่อสมการขนส่ง (transport equations) ของอนุภาคที่เป็นอิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นโฮลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ เป็นผลอันเกิดมาจากแรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะประจุ [45,46] ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เอง สมการความหนาแน่นกระแสจึงสามารถเขียนเป็น

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1 + (\mu_\alpha^* B)^2} \left[\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha) \right] \quad (3.5)$$

เมื่อ α คือ สารกึ่งตัวนำชนิด n หรือ สารกึ่งตัวนำชนิด p

μ_α คือ สภาพคล่องหรือสภาพการเคลื่อนที่ได้ของพาหะประจุ

\vec{g}_α คือ เวกเตอร์กระแสที่ไม่ขึ้นกับสภาพคล่องของพาหะ (current vector without mobility)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

μ_{α}^* คือ สภาพคล่องพาหะประจุของฮอลล์ (Hall mobility)

\vec{B} คือ เวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (magnetic induction vector)

B คือ ขนาดของเวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

โดยสภาพคล่องของฮอลล์จะสัมพันธ์กับสภาพคล่องขณะลอยเลื่อน (drift mobility) ตามสมการ

$\mu_n^* = r_n \mu_n$ และ $\mu_p^* = r_p \mu_p$ ซึ่ง r_n และ r_p คือตัวประกอบการกระเจิงของฮอลล์ (Hall scattering factors) ในกรณีของเนื้อซิลิคอน (bulk silicon) ค่าโดยทั่วไปจะเท่า $r_n = 1.1$ และ $r_p = -0.7$

3.4 สมมุติฐานในการจำลองแบบ

ในการศึกษาค้นคว้าวิจัยอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ด้วยการจำลองแบบครั้งนี้ ได้เลือกทำการจำลองแบบที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ระหว่างตั้งแต่ 0 จนถึง 0.5 เทสลา ซึ่งเป็นช่วงของการประยุกต์นำไปใช้งานหลักของเซ็นเซอร์สนามแม่เหล็ก รวมถึงทั้งยังเป็นช่วงที่อยู่ในระดับความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นของแม่เหล็กถาวรทั่วไปอีกด้วย เพราะเนื่องจากว่าโดยส่วนมากแล้วอุปกรณ์เซ็นเซอร์สนามแม่เหล็กประเภทแมกนีโตริซิสเตอร์หรือแม่แต่ประเภทฮอลล์นั้นก็มักจะถูกนำไปใช้กับแม่เหล็กถาวรเป็นส่วนใหญ่นั่นเอง นอกจากนี้แล้วตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ก็จะถูกดำเนินการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ให้ดีขึ้น [42,43] โดยเริ่มต้นจากการเปลี่ยนแปลงในส่วนของความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรอง เนื่องจากความสัมพันธ์ของความต้านทานและกระแสที่มีการไหลเบี่ยงเบนเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องต่อปริมาณความเข้มข้นของพาหะประจุรวมทั้งสภาพคล่องของพาหะประจุ ดังนั้นด้วยลักษณะการทำงานอุปกรณ์ที่เป็นในโหมดกระแส ตัวแปรดังกล่าวนี้จึงอาจส่งผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวอนไดเช่นเดียวกันกับในกรณีอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง [44] จึงเป็นสาเหตุทำให้เราสนใจตัวแปรที่ขึ้นกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือและสภาพคล่องของพาหะประจุนั่นเอง ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองแบบอุปกรณ์ให้มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองอยู่ในช่วงระหว่าง 1×10^{14} ถึง 1×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นลำดับต่อมาจะเป็นการหาพารามิเตอร์หรือตัวแปรทางโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในโหมดกระแส เนื่องจากว่าตัวแปรทางโครงสร้างดังกล่าวนี้เองเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กผ่านทาง geometrical factor ไม่ว่าจะเป็นการทำงานในโหมดแรงดันหรือโหมดกระแส ตัวแปรทางโครงสร้างย่อมมีผลต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์อีกด้วย โดยจะเป็นการดูผลการจำลองแบบความกว้างของขั้วกระแส (W) ทั้งสองในทิศทางตามแนวแกน y ของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 ไมโครเมตร ถึง 50 ไมโครเมตร ต่อมาจะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวที่เป็นระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) ในทิศทางตามแนวแกน x ของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

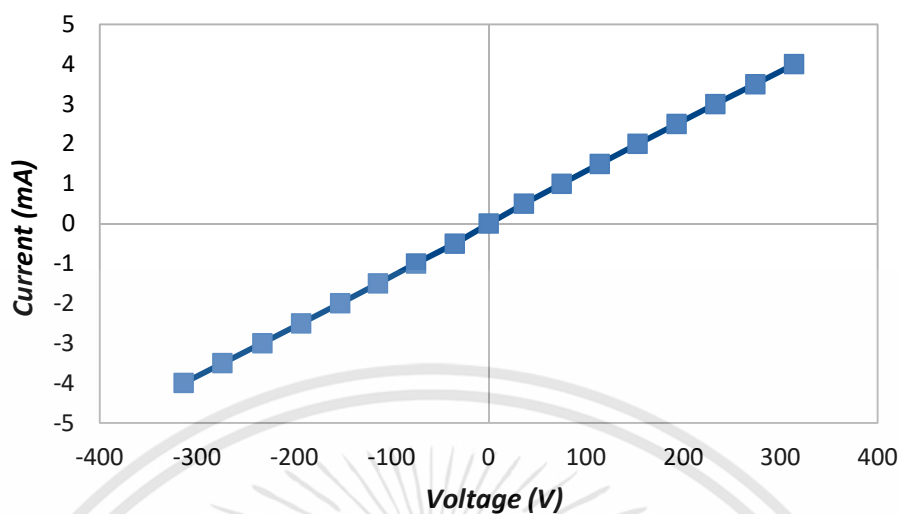
ผลการจำลองแบบ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงผลของการจำลองแบบด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กระดับต่างๆในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ได้จากการดำเนินการจำลองแบบด้วยโปรแกรมเฉพาะทาง Sentaurus TCAD ซึ่งผลการตอบสนองด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละระดับต่างๆจากกรณีที่ได้ทำการไบอัสกระแสคงที่ค่าหนึ่งให้กับอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ โดยสามารถที่จะทำการวัดได้จากในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตำแหน่งบริเวณระหว่างขั้วกระแสทั้งสองของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ รวมไปถึงผลการจำลองแบบที่ได้ยังสามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์อีกด้วย นอกจากนี้แล้วก็จะมีการอภิปรายถึงผลที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์หรือตัวแปรต่าง ๆ พร้อมกับแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ที่มีต่อการทำงานของอุปกรณ์ด้วย

4.1 ผลการจำลองแบบในด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์

ก่อนที่จะได้เริ่มทำการดำเนินการในส่วนของการจำลองแบบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับต่างๆนั้น เราจะขอเลือกดำเนินการตรวจสอบในด้านของคุณลักษณะเฉพาะทางกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ก่อนเป็นอันดับแรก โดยเราได้เลือกที่จะทำการไบอัสกระแสคงที่ในช่วงตั้งแต่ค่าเท่ากับ 0 มิลลิแอมป์ จนถึง 4 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 ซึ่งกระแสดังกล่าวนี้จะมีทิศทางการไหลออกไปสู่ที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC2 ของตัวอุปกรณ์ โดยในลักษณะของการไบอัสกระแสดังกล่าวนี้เราจะเรียกกันว่าเป็นการไบอัสไปข้างหน้าหรือไบอัสตรง (Forward bias) ลำดับต่อจากนั้นก็ทำการไบอัสกระแสคงที่เข้าไปอีกครั้งหนึ่งแต่จะทำการไบอัสเข้าไปที่ตำแหน่งของขั้วกระแส CC2 แทน ทำให้กระแสก็จะมีทิศทางการไหลออกไปสู่ที่ตำแหน่งขั้วกระแส CC1 ของตัวอุปกรณ์ ซึ่งลักษณะของการไบอัสกระแสคงที่อันมีทิศทางที่ตรงกันข้ามกันกับในตอนแรกนี้เราจะเรียกว่าเป็นการไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) และพร้อมกับทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์ที่ตำแหน่งบริเวณระหว่างขั้วกระแส CC1 และขั้วกระแส CC2 โดยผลลัพธ์ด้านคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีติหรือขนาดรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งฐานรองตัวอุปกรณ์ได้กำหนดให้มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) และความกว้างของขั้วกระแส (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร, ความลึกของตัวอุปกรณ์ (T) เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ทำให้ด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) เป็น 7 ไมโครเมตร และด้านความยาวของตัวอุปกรณ์ (L_d) เป็น 17 ไมโครเมตร โดยผลตอบสนองได้ทำการแสดงเอาไว้อยู่ในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



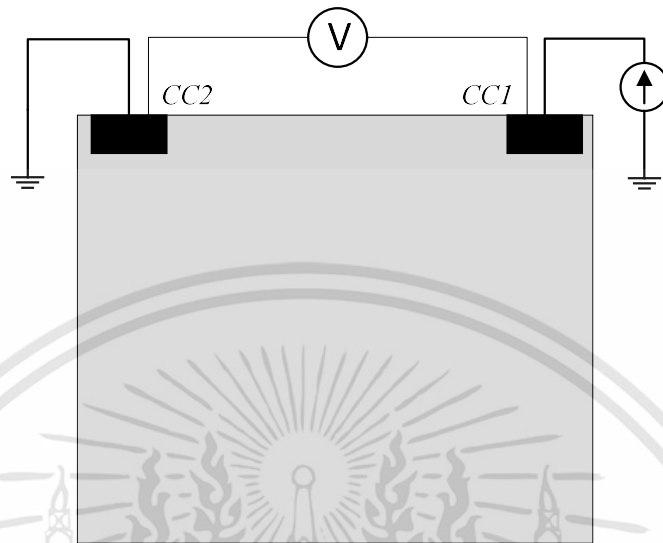
รูปที่ 4.1 ลักษณะเฉพาะด้านกระแส-แรงดันของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์

จะเห็นได้จากผลลัพธ์ของคุณลักษณะเฉพาะทางด้านกระแส-แรงดันของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ได้จากการจำลองแบบดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.1 นั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกับคุณลักษณะของตัวต้านทานธรรมดาทั่วไป อันมีสาเหตุเนื่องมาจากว่าในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ใช้ทำการจำลองแบบดังกล่าวนี้ ที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแสทั้งสองนั้นจะถูกกำหนดให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ (อะลูมิเนียม) และสารกึ่งตัวนำ (ซิลิคอน) ดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก พร้อมกับตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั้นไม่ได้มีการสร้างรอยสัมผัสได้อีกเลยภายในตัวอุปกรณ์ นอกเสียจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่บริเวณขั้วเท่านั้น ดังนั้นทำให้ตัวอุปกรณ์เองจึงมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบตัวต้านทานด้วยนั่นเอง โดยที่ตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวนี้มีค่าความต้านทานอยู่ที่ประมาณ 20.5604 กิโลโอห์ม สำหรับในส่วนของการทดลองด้วยการจำลองแบบทั้งหมดนี้ถึงแม้ว่าตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวจะมีการถูกเปลี่ยนแปลงในด้านตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นแต่คุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งหมดจะยังคงมีลักษณะเช่นเดิมนั่นเอง

4.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์

สำหรับในส่วนของการจำลองแบบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับค่าต่างๆ ของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั้น ตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะถูกดำเนินการไปอัสกระแสคงที่เท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 ทิศทางการไหลของกระแสดังกล่าวก็จะเคลื่อนที่ออกไปในตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC2 ที่ได้ทำการต่ออยู่กับกราวด์เอาไว้ จากนั้นก็จะทำการวัดค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมภายในตัวอุปกรณ์แมกนี

โตรีซิสเตอร์ที่ตำแหน่งระหว่างขั้วกระแส CC1 และขั้วกระแส CC2 ดังได้แสดงให้เห็นในแผนภาพตามรูปที่ 4.2 ประกอบการพิจารณา



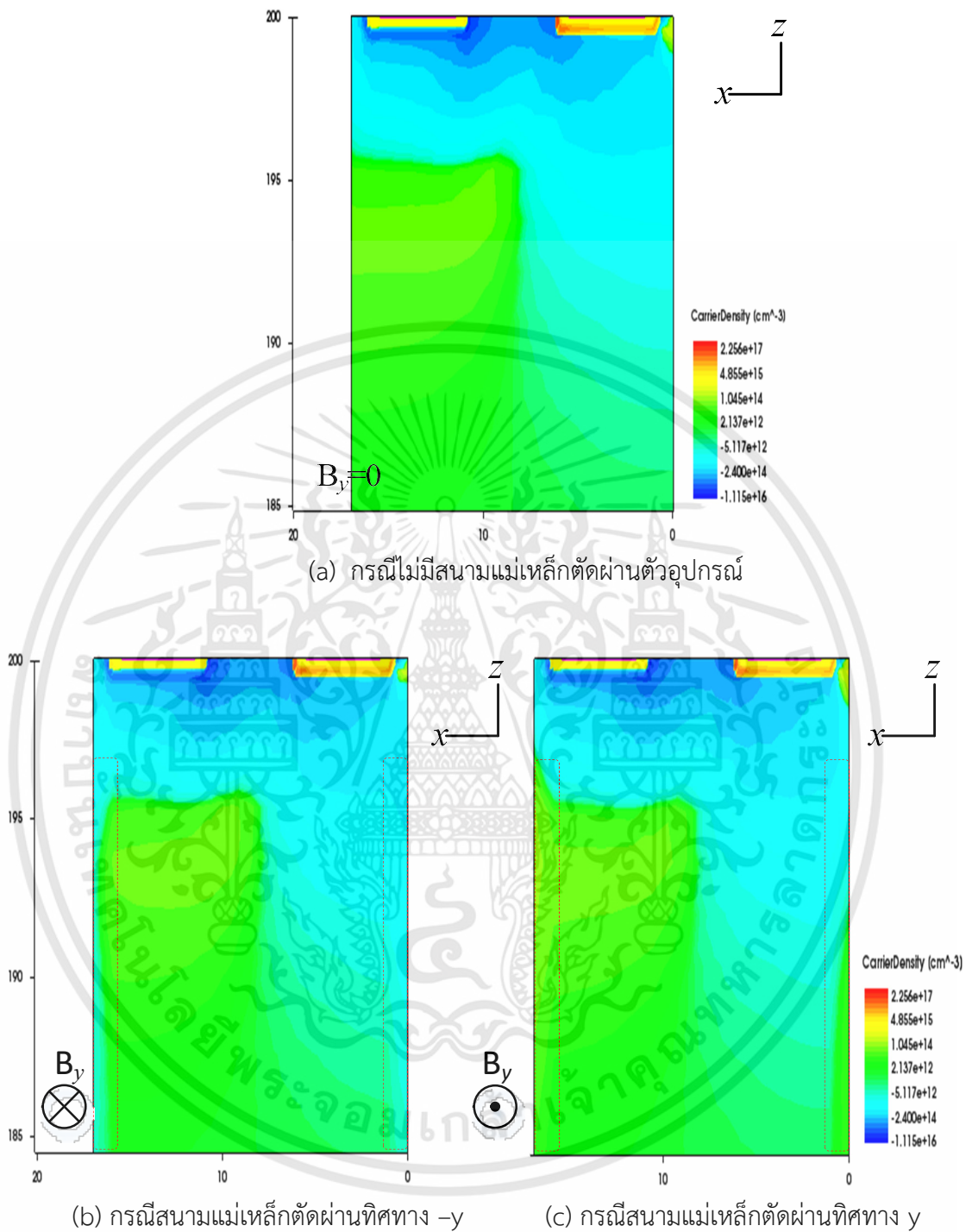
รูปที่ 4.2 การวัดค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์

หากทำการพิจารณาในส่วนของหลักการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั้น จะเห็นได้ว่าโดยปกติแล้วเป็นการทำงานด้วยโหมดของกระแส ซึ่งอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุด้วยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ทำให้พาหะประจุเกิดการเบี่ยงเบนเส้นทางการเคลื่อนที่ไปจากทิศทางแนวการเคลื่อนที่เดิมเป็นผลให้ความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยเราสามารถที่จะทราบผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จากค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นดังกล่าวนี้ด้วยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ได้ในตำแหน่งบริเวณระหว่างขั้วกระแสทั้งสองดังกล่าว ก็คือบริเวณขั้วกระแส CC1 และขั้วกระแส CC2 ดังที่แสดงอยู่ในสมการที่ 4.1 ซึ่งผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD นี้ก็ยังสามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแทนต์ได้ตามหลักการดังกล่าวอีกด้วย ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.3

$$R(B) = \frac{\Delta V}{I} = \frac{V_{CC1} - V_{CC2}}{I_{bias}} \quad (4.1)$$

พิจารณาผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อความเข้มสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ดังเห็นในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นภาพตัดขวางที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกระจายตัวของพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่มีความหนาแน่นของพาหะประจุภายในอุปกรณ์แมกนีโดรีซิสเตอร์ ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

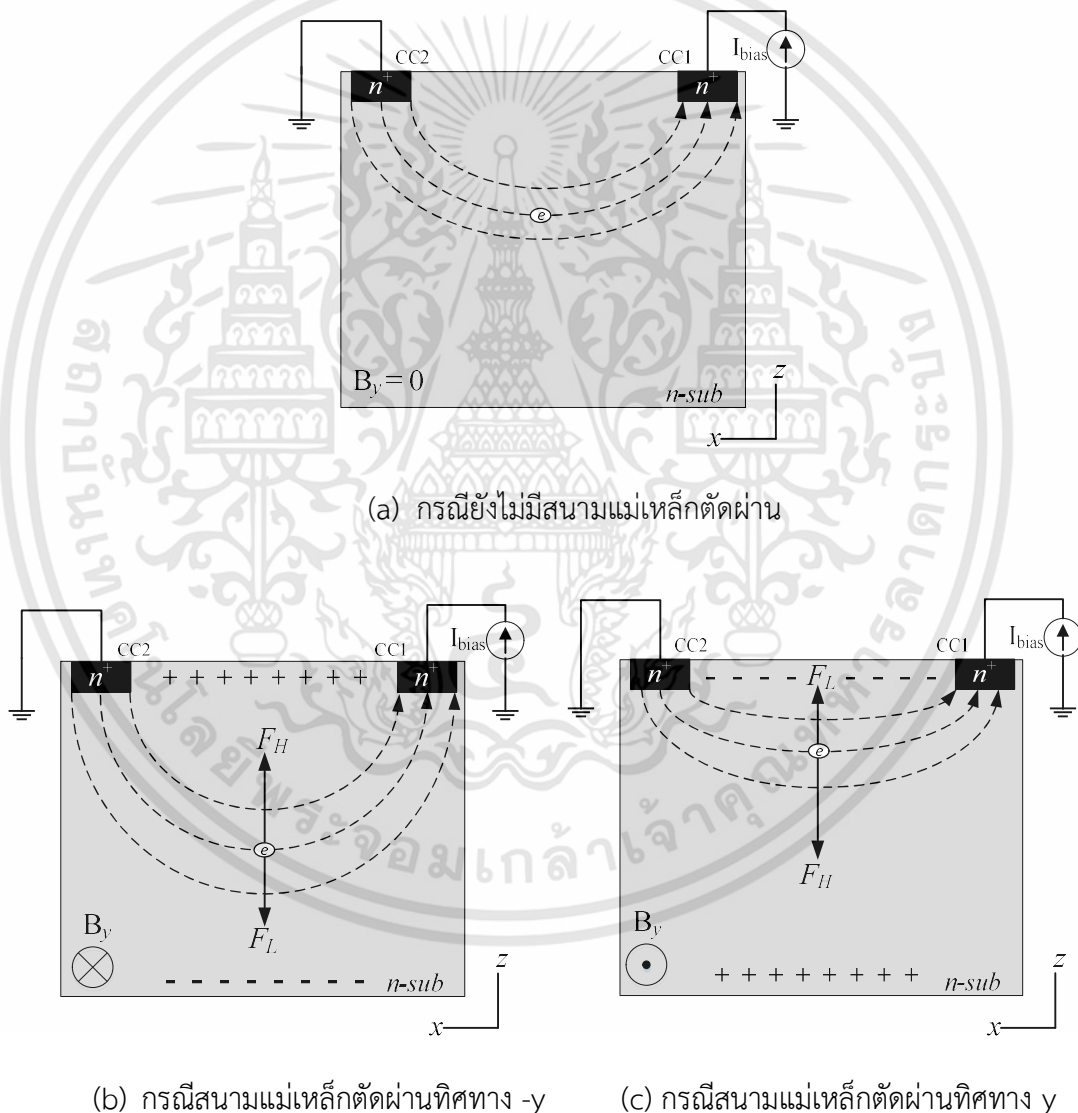
ประจุ หรืออาจจะเรียกว่าเป็น การกระจายตัวของความหนาแน่นกระแส โดยในรูปที่ 4.3 ดังกล่าวนี้อเองเป็นการแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่มีความหนาแน่นของพาหะประจุ (Carrier Density)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.3(a) เราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ฐานรองอุปกรณ์ถูกกำหนดให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) และความกว้างขั้วกระแส (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร, ความลึก (T) เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ทำให้ด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) เป็น 7 ไมโครเมตร และด้านความยาวของตัวอุปกรณ์ (L_d) เป็น 17 ไมโครเมตร ดังกล่าวนี้มีความหนาแน่นของพาหะประจุในตำแหน่งบริเวณพื้นที่ด้านบนของอุปกรณ์ระหว่างขั้วกระแส CC1 และขั้วกระแส CC2 โดยเฉดสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงปริมาณหรือความเข้มข้นที่หนาแน่นของพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนหรืออนุภาคประจุลบในระดับที่สูงมาก ส่วนลำดับต่อมาที่ตำแหน่งบริเวณพื้นที่ตรงกลางของอุปกรณ์เป็นเฉดสีฟ้าแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนที่มีปริมาณหรือความเข้มข้นในระดับที่ต่ำลงมา และที่ตำแหน่งบริเวณพื้นที่ด้านล่างของตัวอุปกรณ์เป็นเฉดสีเขียวแสดงให้เห็นถึงปริมาณความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของพาหะที่เป็นโฮลหรืออนุภาคประจุบวก แต่หากเป็นในกรณีที่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถที่จะแบ่งออกได้เป็นกรณีย่อยอีกสองกรณี ก็คือ สนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูป 4.3(b) และ สนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน y ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูป 4.3(c) เมื่อได้ทำการพิจารณาผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยการสังเกตเฉดสีฟ้าทั้งจากในรูปที่ 4.3(b) และ 4.3(c) จะพบว่าที่ตำแหน่งพื้นที่ตรงกลางบริเวณขอบข้างด้านซ้ายและขวาของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ จะมีความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนโดยมีลักษณะการกระจายตัวของพาหะดังกล่าวเป็นทิศทางที่เบี่ยงเบนลงไปที่ด้านล่างของตัวอุปกรณ์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ รวมไปถึงยังมีลักษณะการกระจายตัวของพาหะอิเล็กตรอนที่เป็นทิศทางที่เบี่ยงเบนขึ้นไปด้านบนของตัวอุปกรณ์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน y เมื่อทำการเปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ดังกล่าวตามลำดับ

จากในส่วนผลของการจำลองแบบที่เกิดขึ้นดังที่ได้แสดงอยู่ในรูป 4.3 ดังกล่าวนี้สามารถที่จะนำมาอธิบายถึงระดับความหนาแน่นของพาหะประจุหรือการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสได้ด้วยรูปแบบกลไกของการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.4 โดยทำการพิจารณาในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(a) เมื่อตัวอุปกรณ์ถูกดำเนินการไบอัสด้วยกระแสคงที่เข้าที่ตำแหน่งขั้วกระแส CC1 ในขณะที่ตำแหน่งของขั้วกระแส CC2 นั้นทำหน้าที่เป็นกราวด์ กระแสคงที่จากการไบอัสดังกล่าวนี้ก็จะไหลผ่านจากตำแหน่งขั้วกระแสทางด้านขวา (CC1) ไปที่ตำแหน่งขั้วกระแสทางด้านซ้าย (CC2) เป็นการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนวแกน x ในส่วนของพาหะอิเล็กตรอนหรืออนุภาคประจุลบดังกล่าวนี้จะมีทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอนด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ไหลผ่านจากตำแหน่งขั้วกระแสทางด้านซ้าย (CC2) ไปที่ตำแหน่งขั้วกระแสทางด้านขวา (CC1) เป็นการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนวแกน $-x$ ซึ่งเป็นลักษณะ

การเคลื่อนที่สวนทางกันกับทิศของกระแสไปอัส อันเนื่องมาจากการกระทำของแรงทางไฟฟ้า F_E หากถ้าเป็นในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(b) สนามแม่เหล็กก็จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก F_L ขึ้นในทิศทางตามแนวแกน $-z$ ในขณะที่สนามไฟฟ้าฮอลล์ก็จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงไฟฟ้าฮอลล์ F_H ขึ้นในทิศทางตามแนวแกน z โดยเป็นทิศทางการเกิดขึ้นที่ตรงข้ามกัน ในกรณีดังกล่าวนี้เองแรงไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าที่น้อยกว่าแรงลอเรนซ์ ($F_H < F_L$) ด้วยเหตุนี้เองจึงส่งผลทำให้พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนหรืออนุภาคประจุลบที่กำลังเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากแรงทางไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน $-x$ ดังกล่าวถูกผลักทำให้เกิดการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปตามแนวแรงลอเรนซ์ซึ่งเป็นแรงลัพธ์ระหว่างแรงทางไฟฟ้าและแรงทางแม่เหล็ก

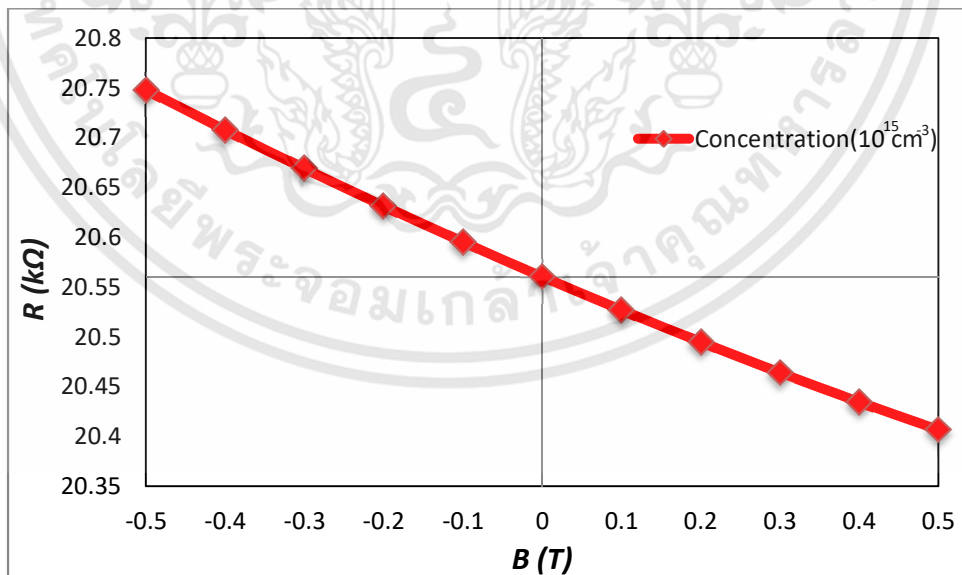


รูปที่ 4.4 แผนภาพแบบจำลองกลไกการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ภายในตัวอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดเป็นกระแสอิเล็กตรอนที่มีลักษณะของกระจายตัวอยู่ลึกลงไปในพื้นที่บริเวณด้านล่างฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ (ทิศทางการตามแนวแกน $-z$) ตามแรงลอเรนซ์ และยังส่งผลทำให้ค่าความต้านทานมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นด้วยนั่นเอง ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะวัดค่าความต้านทานด้วยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 และ CC2 ได้ ในทางกลับกันเมื่อเป็นกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางการตามแนวแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4.4(c) นั้นสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก F_L ขึ้นในทิศทางการตามแนวแกน z ในขณะที่สนามไฟฟ้าฮอลล์ก็จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงไฟฟ้าฮอลล์ F_H ขึ้นในทิศทางการตามแนวแกน $-z$ ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้ แรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ก็ยังคงมีค่าที่น้อยกว่าของแรงลอเรนซ์อีกครั้ง ($F_H < F_L$) จึงส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะที่เป็นอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่ากระแสอิเล็กตรอนในลักษณะกระจายตัวไปตามแนวแรงลอเรนซ์ที่ขึ้นไปสู่พื้นผิวบริเวณด้านบนฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ (ทิศทางการตามแนวแกน z) รวมอีกทั้งก็ยังคงส่งผลต่อค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์ดังกล่าวโดยทำให้มีค่าเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ลดลงไปอีกด้วยนั่นเอง

จากในรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองต่อความเข้มข้นแม่เหล็กในระดับต่างๆของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ทำงานในโหมดกระแส ซึ่งเป็นการอาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของพาหะประจุหรือการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสทิศทางแนวตั้งที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์เพื่อใช้ในการแสดงถึงผลตอบสนองต่อขนาดและทิศทางสนามแม่เหล็กแนวอนันั้น จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ดังกล่าวมีลักษณะการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นเหมือนเช่นเดียวกับอุปกรณ์เช่นเซอร์แม่เหล็กที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสที่อยู่ในทิศทางแนวราบทั่วไป ดังนั้นแล้วปรากฏการณ์การ



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองต่อความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

เบี่ยงเบนของพาหะประจุหรือการเบี่ยงเบนของกระแสที่เกิดขึ้นในทิศทางแนวตั้งอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์นั้น จึงเป็นการพบถึงแนวโน้มและความเป็นไปได้ที่จะนำไปศึกษาค้นคว้าและพัฒนาต่อเพื่อสร้างเป็นตัวอุปกรณ์เซ็นเซอร์เฉพาะด้านที่อาศัยปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางอยู่ในแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ได้อีกด้วยนั่นเอง

ผลการจำลองแบบข้างต้นเป็นผลการจำลองแบบของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีการตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในช่วงระหว่างค่าเท่ากับ 0 เทสลา จนถึง 0.5 เทสลา ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y ซึ่งเป็นทิศที่สนามแม่เหล็กดังกล่าวทำมุมตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสที่ไหลอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์รวมไปถึงพื้นที่ในส่วนตัดขวางแนวตั้งของตัวอุปกรณ์อีกด้วย หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นทิศที่ทำให้ได้ผลของการตอบสนองมีค่าที่สูงที่สุดนั่นเอง โดยในส่วนของการทำงานทดลองหัวข้อถัดไปนั้นจะเป็นการศึกษาเพื่อทำให้ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่อาจจะส่งผลต่อการทำงานของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ เป็นต้น

นอกจากนี้แล้วหากเราทำการพิจารณาในสมการที่ 2.30 ซึ่งเป็นสมการความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่มีมิติด้านความกว้าง (W), ความยาว (L) และความหนา (T) เป็นค่าคงที่หนึ่ง รวมไปถึงในสมการดังกล่าวนี้เรายังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อทำให้ทราบถึงค่าความต้านทานของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับตัวอุปกรณ์ดังกล่าวได้เช่นกัน โดยเป็นที่ทราบกันเป็นอย่างดีแล้วว่าคุณค่าความต้านทานไฟฟ้าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักๆ ก็คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุและมีรูปร่างของวัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นตัวอุปกรณ์แล้วนั้นมันยังสามารถที่จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ได้อีกด้วย ซึ่งหากทำการนำสมการที่ 2.30 ดังกล่าวมาพิจารณาโดยเขียนเป็นสมการใหม่ก็จะสังเกตเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.2

$$R(B) = \rho \left(\frac{L}{W} \right) \frac{1}{\Delta t} \quad (4.2)$$

โดยที่ $R(B)$ คือ ความต้านทานในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน, ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ, L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วกระแส, W คือ ความกว้างขั้วกระแส, Δt คือ ความลึกตัวแทนของกระแสทั้งหมดที่ทำให้เกิดความต้านทานค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่แสดงถึงความลึกที่สอดคล้องกับพื้นที่หน้าตัดที่กระแสเคลื่อนที่ไหลผ่านของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าว

จากในช่วงตอนต้นที่ผ่านมาของผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์นั้นที่ได้เคยกล่าวเอาไว้ถึงความไม่สมดุลกันระหว่างแรงลอเรนซ์ (F_L) และแรงไฟฟ้าฮอลล์ (F_H) นั้น ซึ่งในสิ่งดังกล่าวนี้เองที่ส่งผลต่อการทำให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่

เปลี่ยนแปลงไป (ΔR) ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ดังกล่าวนี้นี้สามารถที่จะนำมาเขียนแสดงได้ด้วยสมการที่ 4.3

$$\Delta R = R(B) - R(0) \quad (4.3)$$

โดยที่ ΔR คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง, $R(B)$ คือ ค่าความต้านทานในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน และ $R(0)$ คือ ค่าความต้านทานในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

เอาต์พุตหรือผลลัพธ์ที่แสดงอยู่ในรูปของความต้านทานไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง (ΔR) และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ($\%MR(B)$) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 4.4

$$\%MR(B) = \% \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \times 100 \quad (4.4)$$

โดยที่ $\%MR(B)$ คือ เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ดังนั้นหากนำสมการที่ 4.4 ดังกล่าวนี้นี้ มาทำการพิจารณาอีกครั้งก็จะสามารถสังเกตเห็นถึงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$R(B) - R(0) = R(0) \left(\frac{\%MR(B)}{100} \right)$$

จากนั้นจึงดำเนินการจัดรูปแบบของสมการใหม่ก็จะได้เป็นดังสมการที่ 4.5 ซึ่งแสดงอยู่ด้านล่าง

$$\Delta R = R(0) \cdot MR(B) = \rho \left(\frac{L}{W} \right) \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (4.5)$$

ซึ่ง $MR(B)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน โดยสมการที่ 4.5 ดังกล่าวนี้นี้เอง เมื่อทำการพิจารณาก็จะสังเกตเห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นดังกล่าวนี้นี้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผลคูณระหว่างสองพารามิเตอร์หลัก ก็คือ ความต้านทานขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าตัดผ่านกระทำกับตัวอุปกรณ์และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงแมกนีโตรซิสแตนซ์ขณะที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าตัดผ่านกระทำกับตัวอุปกรณ์นั่นเอง

นอกจากนี้แล้วกรณีที่เราได้ทำการจำลองแบบด้วยการไปใส่ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับตัวอุปกรณ์ดังกล่าวก็น่าจะทำให้เราสามารถที่จะระบุถึงความไวที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ได้ดำเนินการไปใส่ (current-related sensitivity) ได้อีกด้วย ดังนั้นความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

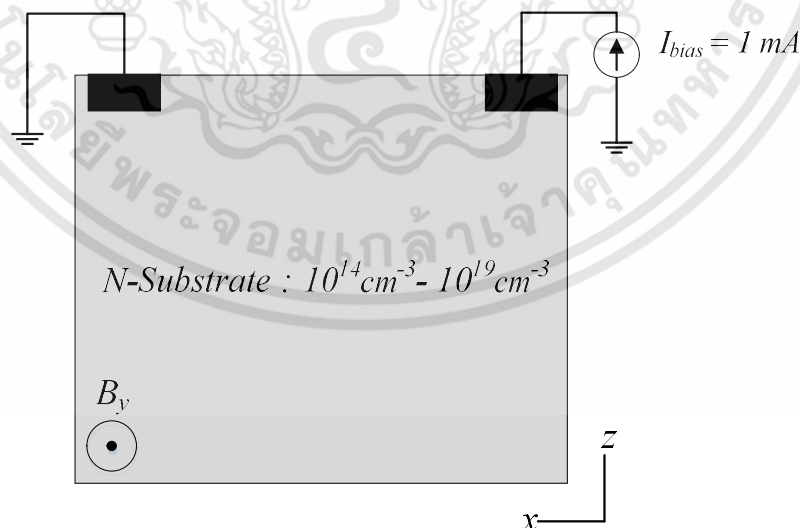
ทิศทางแนวขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวนี้ เราจึงสามารถที่จะนำมาแสดง เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์กับกระแสไบอัสคงที่ได้ด้วยการระบุไว้ตามสมการที่ 4.6

$$S = \frac{\Delta R}{I(\Delta B)} \quad [\Omega / AT] \quad (4.6)$$

ซึ่ง S คือ ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก, ΔB คือ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

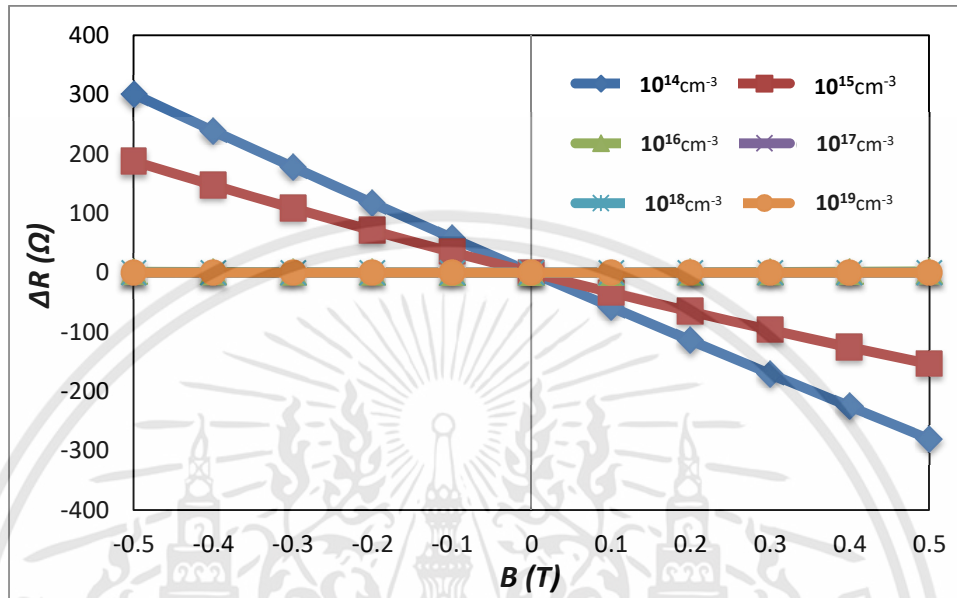
4.2.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีพื้นฐานรองของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกัน

สำหรับในส่วนของการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีพื้นฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกันนี้ ได้กำหนดมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวให้มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) และความกว้างของขั้วกระแส (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร, ด้านของความลึก (T) เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) เป็น 7 ไมโครเมตร และด้านความยาวของตัวอุปกรณ์ (L_d) เป็น 17 ไมโครเมตร พร้อมทั้งทำการไบอัสกระแสคงที่ขนาดเท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 โดยที่ตัวของอุปกรณ์จะถูกจำลองแบบอยู่ภายใต้เงื่อนไขความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่างค่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และ y พร้อมทั้งตัวอุปกรณ์ก็จะถูกเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองตั้งแต่ 1×10^{14} จนถึง 1×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกัน

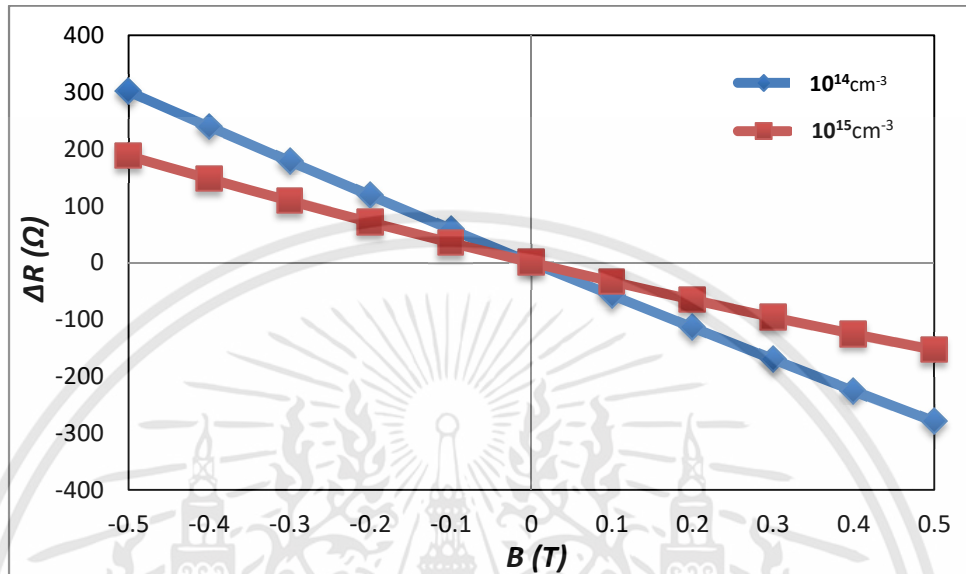
ผลของค่าความต้านทานที่ทำการวัดได้จากการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ด้วยโหมดการเบี่ยงเบนของพาหะประจุหรือการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลกระแสที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกัน ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7



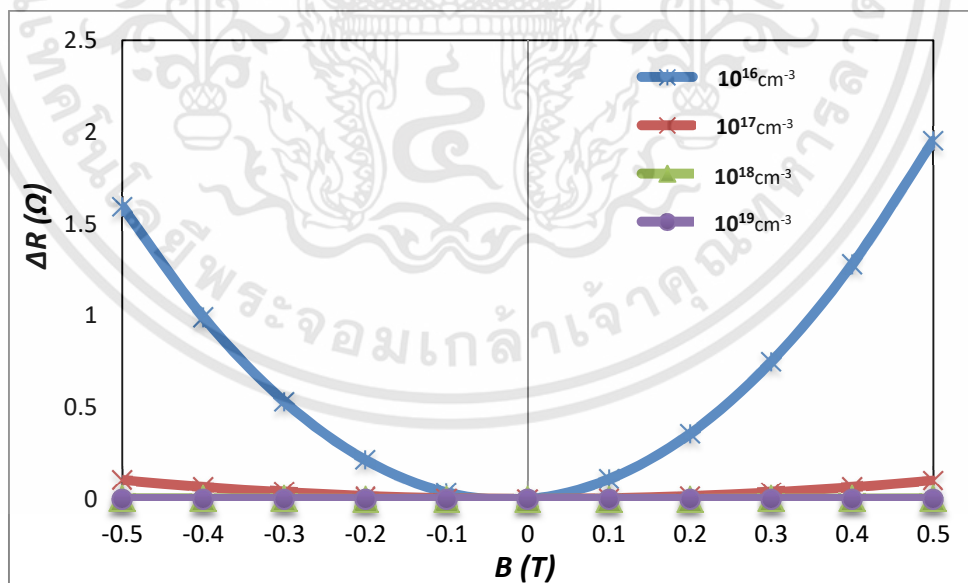
รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง กรณีฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ 10^{14} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไอส์ 1 มิลลิแอมป์

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกันหากพิจารณาจากรูปกราฟที่ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์ดังกล่าว นั้น เราพบว่ามีผลตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นและในเวลาเดียวกันก็พบกับผลที่ไม่ตอบสนองปรากฏขึ้นอีกด้วยเช่นกัน ซึ่งจากผลลัพธ์ของการทดลองดังกล่าวนี้เองทำให้เราสามารถที่จะทำการแบ่งกราฟออกได้ตามลักษณะเป็นสองกลุ่ม เพื่อที่จะได้เห็นลึกไปถึงในรายละเอียดต่างๆพร้อมกับเห็นถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยในส่วนของกลุ่มแรกเป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ระดับต่ำ คือ 10^{14} และ 10^{15}cm^{-3} และในส่วนของกลุ่มที่สองเป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ระดับสูง คือ 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} และ 10^{19}cm^{-3} ดังแสดงให้เห็นได้จากกราฟตามรูปที่ 4.8 และ ในรูปที่ 4.9 ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาในรูปที่ 4.8 จากรูปกราฟดังกล่าวที่แสดงถึงผลตอบสนองด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ได้แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับต่ำนั้นรูปกราฟจะมีลักษณะความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นต่อกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำรวมทั้งกับปริมาณความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กอีกด้วย โดยที่ค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อ

สนามแม่เหล็กดังกล่าวนั้นพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และในทางตรงข้ามกันค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ลดน้อยลงเมื่อสนามแม่เหล็กนั้นพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน y ซึ่งหากทำการพิจารณาในส่วนที่เป็นความ



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ กรณีสถานะที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ คือ 10^{14} และ 10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์



รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ กรณีสถานะที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง คือ 10^{16} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรองระดับสูง ดังที่ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.9 นั้น จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นดังกล่าวจะไม่มีลักษณะความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นทั้งทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำเหมือนดังเช่นในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรองระดับต่ำ โดยที่ค่าความต้านทานจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นโดยตลอดทั้งในกรณีที่สนามแม่เหล็กดังกล่าวนั้นพุ่งตัดผ่านแนวขนานเข้ากระทำกับพื้นผิวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y นั่นเอง

ในขณะที่ผลการตอบสนองของค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือเรียกว่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ ได้แสดงเอาไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งหากทำการพิจารณาข้อมูลจากตารางดังกล่าวแล้ว จะเห็นได้ว่าเมื่อฐานรองของตัวอุปกรณ์มีปริมาณค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะส่งผลต่อค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นด้วย โดยที่เมื่อความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นนั้นก็ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าที่ลดน้อยลงไปด้วย หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันต่อกันระหว่างความเข้มข้นอะตอมสารเจือกับค่าความต้านทานที่เกิดขึ้น ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของปริมาณค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือดังกล่าวนี้ก็มาจากการเติมปริมาณของจำนวนพาหะประจุเข้าไปในฐานรองของตัวอุปกรณ์ด้วยระดับที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง ดังนั้นแล้วจึงทำให้เราได้ทราบถึงความสัมพันธ์ในอีกรูปแบบ

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ ด้วยกระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

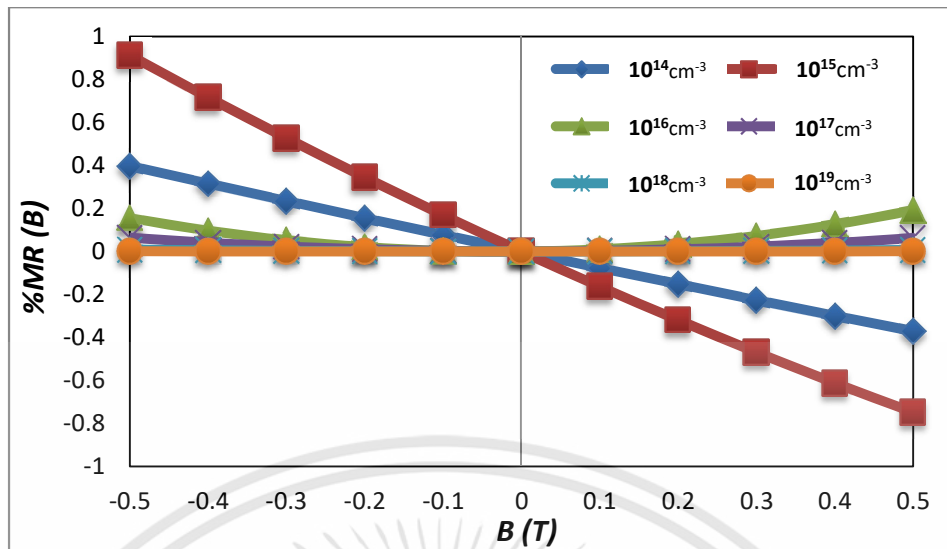
Magnetic field (T)	Doping Concentration					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	$R[B] (\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)	$R[B] (\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)
0.5	75295.32	-280.08	-0.3705	158.5566	0.0995	0.062834
0.4	75349.77	-225.63	-0.2985	158.5206	0.0636	0.040148
0.3	75405.01	-170.39	-0.2254	158.4927	0.0356	0.022520
0.2	75461.03	-114.37	-0.1513	158.4728	0.0157	0.009951
0.1	75517.83	-57.57	-0.0761	158.4609	0.0038	0.002444
0	75575.41	0	6.65E-10	158.4570	0	2.836E-07
-0.1	75633.85	58.44	0.0773	158.4612	0.0041	0.002619
-0.2	75693.24	117.83	0.1559	158.4733	0.0163	0.010301
-0.3	75753.48	178.06	0.2356	158.4935	0.0365	0.023042
-0.4	75814.54	239.13	0.3164	158.5217	0.0647	0.040841
-0.5	75876.42	301.01	0.3982	158.5579	0.1009	0.063693

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งระหว่างจำนวนพาหะประจุและค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ว่าเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันต่อกันอีกเช่นกัน จึงทำให้อุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับสูงนั้นก็จะมีค่าผลตอบสนองของความต้านทานที่เกิดขึ้นและค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับที่ลดน้อยลงไปด้วย ดังข้อมูลในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้แล้ว เพื่อแสดงให้เห็นถึงระดับความแตกต่างที่ชัดเจนของผลตอบสนองด้วยค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อความเข้มข้นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับต่ำนั้นจะมีผลตอบสนองที่สูงมากกว่าในกรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับสูงด้วยการสังเกตเห็นได้จากผลของรูปกราฟที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้น โดยเราสามารถพิจารณาข้อมูลจากในตารางที่ 4.1 ประกอบจะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์ ($R[B]$) ในกรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับต่ำนั้นจะมีผลตอบสนองอยู่ที่ค่าประมาณ 75 กิโลโอห์ม แต่ในทางตรงกันข้ามที่กรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองระดับสูงกลับให้ผลตอบสนองอยู่เพียงค่าประมาณ 158 โอห์ม และในส่วนของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) นั้นจะมีผลตอบสนองอยู่ที่ค่าประมาณ 301 โอห์ม ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ และจะมีผลตอบสนองอยู่ที่ค่าประมาณ 0.1 โอห์ม สำหรับความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง ด้วยกระแสไอศสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ และความเข้มข้นสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา นั่นเอง

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองของค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลง และ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง เมื่ออยู่ภายใต้ระดับปริมาณความเข้มข้นและทิศทางแนวนอนของสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ค่าต่างๆ หลังจากที่เราได้ทำการพิจารณาด้วยลักษณะของรูปกราฟที่ปรากฏขึ้นในด้านผลการตอบสนองที่อยู่ในรูปแบบของความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นดังกล่าว รวมไปถึงได้ทราบถึงปริมาณหรือระดับผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลตัวเลขที่อยู่ในตารางที่ 4.1 แล้วนั้น ลำดับต่อจากนั้นก็จะเป็นในส่วนของการพิจารณาผลตอบสนองที่อยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือที่เรียกว่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าว

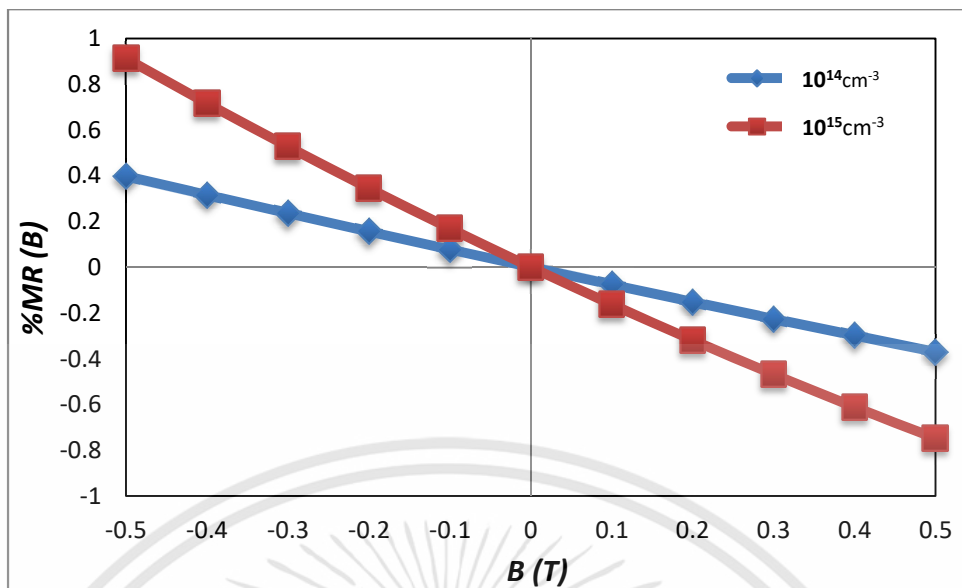
เมื่อทำการพิจารณาจากรูปที่ 4.10 ได้แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นต่อความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กและทิศทางในแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในรูปแบบที่เป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือที่เรียกกันว่า เปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ในฐานรองของตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกันนั้น หากทำการพิจารณาผลตอบสนองที่ได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะผลตอบสนองเช่นเดียวกันกับในกรณีรูปแบบของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงดังที่ได้มีการกล่าวอธิบายไปในก่อนหน้านี้ นั่นเอง ซึ่งสามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าในฐานรองของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ของอุปกรณ์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ 10^{14} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำนั้นเราได้พบกับผลตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นต่อทิศทางแนวนอนรวมทั้งระดับปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านเข้ากับตัวอุปกรณ์และในขณะเดียวกันที่ฐานรองของอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงเราก็จะพบกับผลตอบสนองปรากฏขึ้นซึ่งจะแตกต่างกันกับในกรณีของผลตอบสนองที่แสดงอยู่ในรูปแบบความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงดังที่ผ่านมาที่ลักษณะของเส้นกราฟนั้นไม่แสดงถึงผลตอบสนองปรากฏขึ้นเลย แต่สำหรับผลตอบสนองที่แสดงอยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ดังกล่าวนี้กลับปรากฏผลตอบสนองขึ้นด้วยการพิจารณาจากลักษณะเส้นกราฟที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.10 แต่หากเราสังเกตอย่างละเอียดแล้วก็จะทำให้ทราบว่า เป็นผลตอบสนองที่เป็นเพียงระดับปริมาณที่น้อยเป็นอย่างมากหรืออาจกล่าวได้ว่าแทบจะไม่ปรากฏการตอบสนองขึ้นเลยนั่นเอง โดยจากผลลัพธ์ที่อยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ดังกล่าวนี้เองทำให้เราสามารถที่จะทำการแบ่งผลตอบสนองตามลักษณะของเส้นกราฟออกได้เป็นสองกลุ่มด้วยกัน เพื่อที่จะได้นำข้อมูลดังกล่าวมาพิจารณาให้ลึกลงไปถึงในรายละเอียดต่างๆพร้อมกับเห็นถึงความแตกต่างได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นอีกด้วย ดังที่ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.11 และในรูปที่ 4.12 ตามลำดับ

โดยเมื่อเราทำการพิจารณาจากลักษณะของเส้นกราฟที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.11 แล้วจะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงต่อระดับปริมาณความเข้มรวมทั้งทิศทางในแนวนอนของสนามแม่เหล็กด้วยลักษณะที่เพิ่มมากขึ้น (เป็นบวก) เมื่อสนามแม่เหล็กดังกล่าวพุ่งตัดผ่านเข้ากับกระทำตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และในขณะเดียวกันก็จะพบกับ



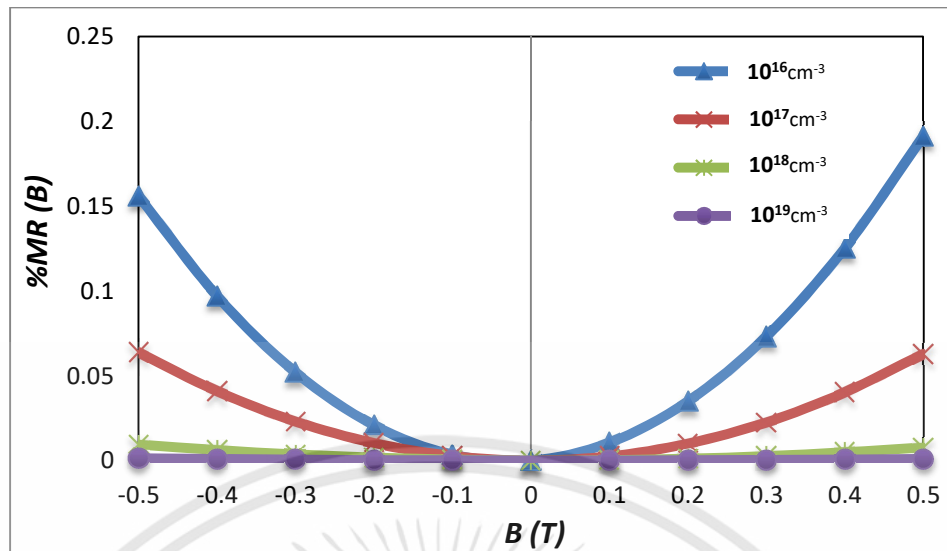
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ คือ 10^{14} และ 10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยลักษณะที่ลดน้อยลง (เป็นลบ) เมื่อสนามแม่เหล็กดังกล่าวนั้นพุ่งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน +y ในกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ

แต่สำหรับในกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงนั้น ซึ่งเราสามารถที่จะทำการพิจารณาได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.12 ประกอบ เราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้จะพบแต่เพียงที่เป็นในลักษณะที่เพิ่มมากขึ้น (เป็นบวก) เท่านั้น ไม่ว่าจะเป็นอย่างนี้ในกรณีที่สนามแม่เหล็กดังกล่าวนั้นพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน -y และกรณีที่สนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน +y ก็ตาม

นอกจากนี้แล้วหากเราได้ทำการพิจารณาถึงค่าตอบสนองสูงสุดของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์จากทั้งสองกรณี ก็คือกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงนั้น โดยเราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้จากข้อมูลในรูปที่ 4.11 และ 4.12 พร้อมกับข้อมูลที่อยู่ในตารางที่ 4.1 ประกอบพบว่ามีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ที่ค่าประมาณใกล้กับ 1% สำหรับในกรณีของฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำและในขณะเดียวกันก็จะพบว่าผลตอบสนองสูงสุดมีค่าอยู่ที่ประมาณใกล้กับ 0.2% สำหรับในกรณีของฐานรองตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

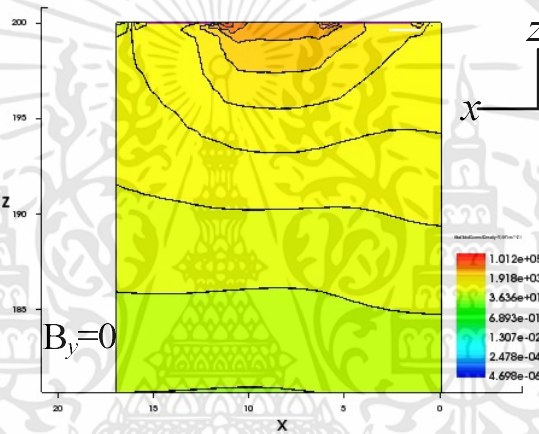


รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง คือ 10^{16} ถึง 10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

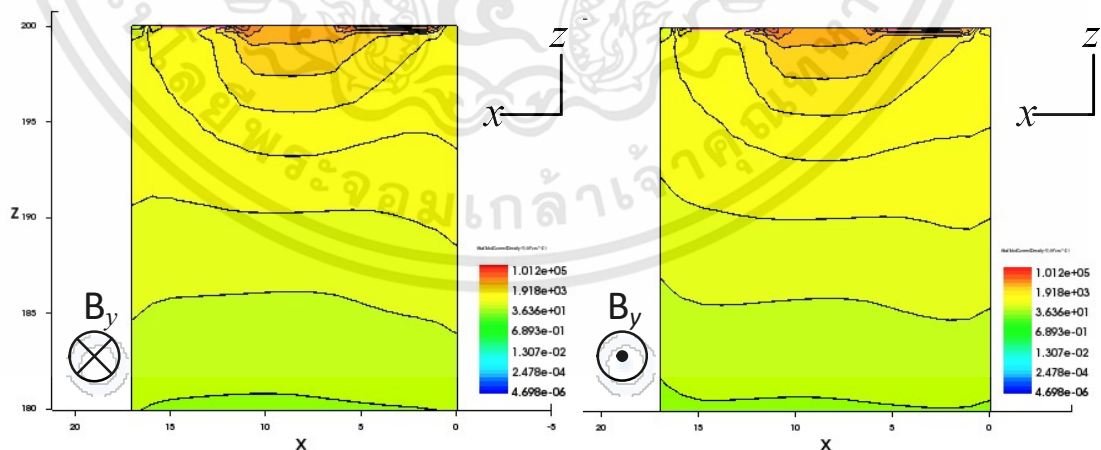
ที่ระดับปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0.5 เทสลา กระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์นั่นเอง ส่วนที่ได้ทำการแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.13 และในรูปที่ 4.14 ดังกล่าวนี้ เป็นการนำเสนอในส่วนของภาพตัดขวางตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์หลักก็เพื่อต้องการที่จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ ซึ่งภาพตัดขวางที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.13 เป็นกรณีของฐานรองตัวอุปกรณ์ที่มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14}cm^{-3}) เมื่อเราได้ทำการพิจารณาจากภาพตัดขวางตัวอุปกรณ์ก็จะสังเกตเห็นได้ว่าพบแนวโน้มการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยการได้รับอิทธิพลจากทั้งระดับปริมาณความเข้มรวมทั้งทิศทางในแนวนอนของสนามแม่เหล็กดังกล่าวที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับพื้นผิวของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ตามแนวแกน $-y$ ดังที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.13(b) ดังกล่าวนี้ โดยเราสามารถที่จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีลักษณะในการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสที่มีทิศทางกระจายลงไปในตำแหน่งพื้นที่บริเวณด้านล่างของฐานรองตัวอุปกรณ์มากกว่าในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13(a) เมื่อได้ดำเนินการเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณี นอกเหนือไปจากนี้แล้วนั้นเรายังสามารถที่จะใช้วิธีอย่างง่ายในเบื้องต้นเพื่อมาช่วยประกอบในการพิจารณานั้นก็คือใช้วิธีด้วยการสังเกตจากเส้นที่อยู่ในแนวนอนหรือตามแนวแกน x พร้อมกับพิจารณาในส่วนองระดับเฉดสีต่างๆที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.13 ตลอดจนในรูปที่ 4.14 ดังกล่าวนี้ด้วย ซึ่งเส้นทึบในแนวนอนบ่งบอกถึงแนวโน้มและทิศทางกระจายตัวของกระแส ส่วนในด้านของการไล่ระดับความเข้มเฉดสีต่างๆก็บ่งบอกถึงระดับความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางกลับกันหากเราได้ทำการพิจารณาการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.13(c) จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความเข้มและทิศทางในแนวนอนของสนามแม่เหล็กซึ่งมีลักษณะทิศทางที่ตรงกันข้ามกันกับในกรณีที่ผ่านมา นั้น ซึ่งในที่นี้จากที่ได้กล่าวมาก็คือทิศทางการพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับพื้นผิวอุปกรณ์ของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y นั้นเอง โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ตรงกันข้ามกันดังกล่าวนี้เองจะเป็นการส่งผลทำให้การกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสมีแนวโน้มในลักษณะที่กระจายขึ้นไปอยู่ในตำแหน่งพื้นที่บริเวณด้านบนของฐานรองมากกว่าในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเข้าพื้นผิวของตัวอุปกรณ์จากที่ได้ทำการเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณี ตลอดจนการใช้วิธีด้วยการสังเกตเส้นทึบที่อยู่ในแนวนอนหรือตามแนวแกน x พร้อมกับพิจารณาเฉดสีต่างๆเช่นกรณีที่ผ่านมานั่นเอง



(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



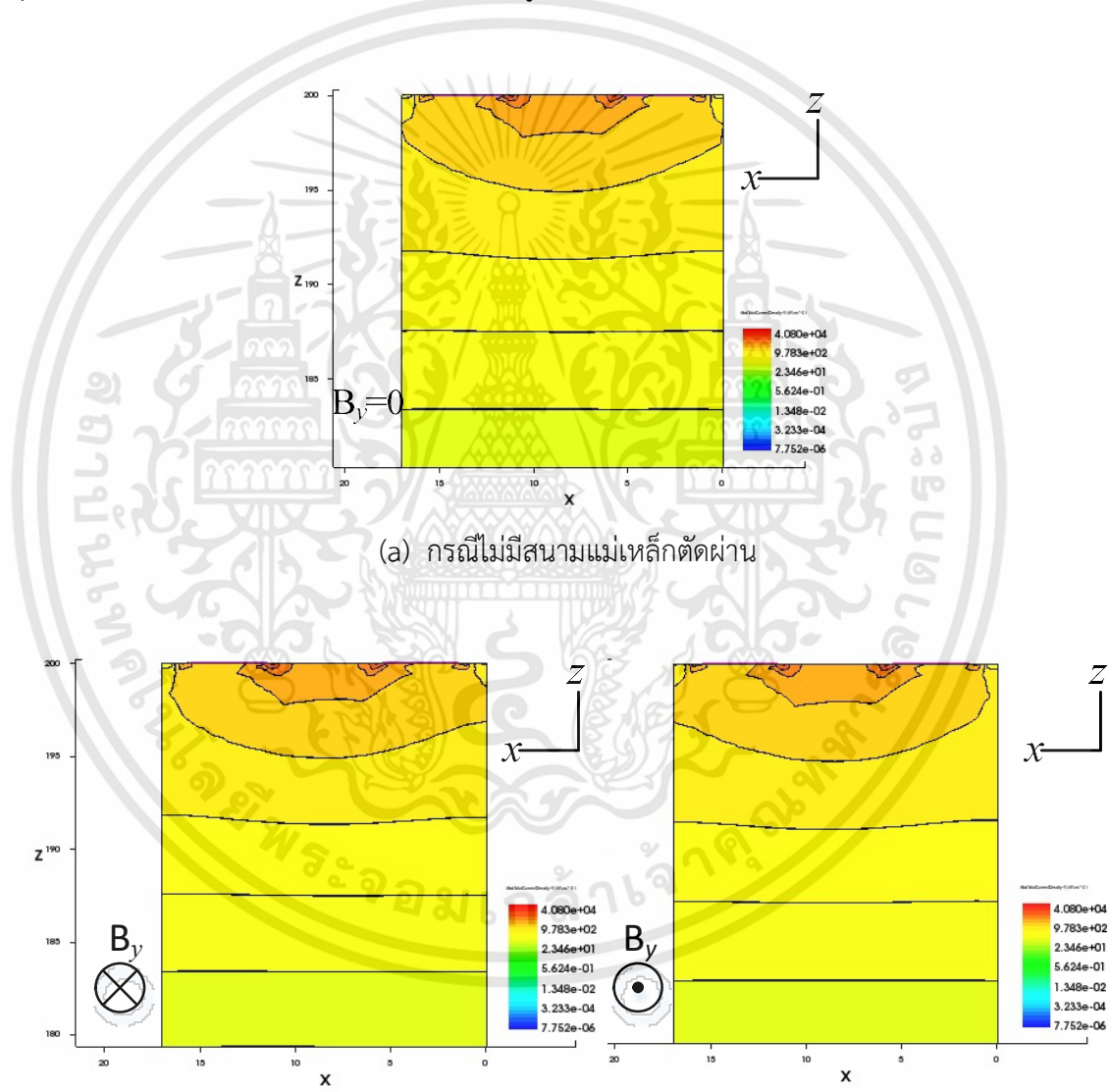
(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$

(c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.13 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในส่วนที่ได้ทำการแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.14 นั้นเป็นกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) เมื่อเราทำการพิจารณาจากรูปภาพตัดขวางดังกล่าวแล้วก็จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสแน้นแทบที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเลยต่อปริมาณความเข้มข้นรวมทั้งทิศทางในแนวนอนของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากับพื้นผิวตัวอุปกรณ์เมื่อเราได้ดำเนินการเปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านของตัวอุปกรณ์โดยผลจากรูปภาพตัดขวางที่แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังที่ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 ดังกล่าวนี้ หากทำการพิจารณามองใน



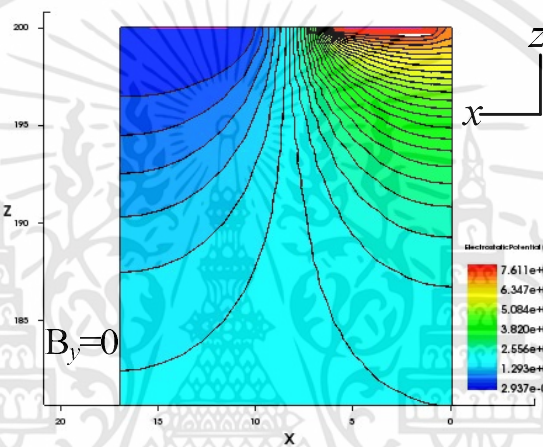
(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง -y (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.14 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

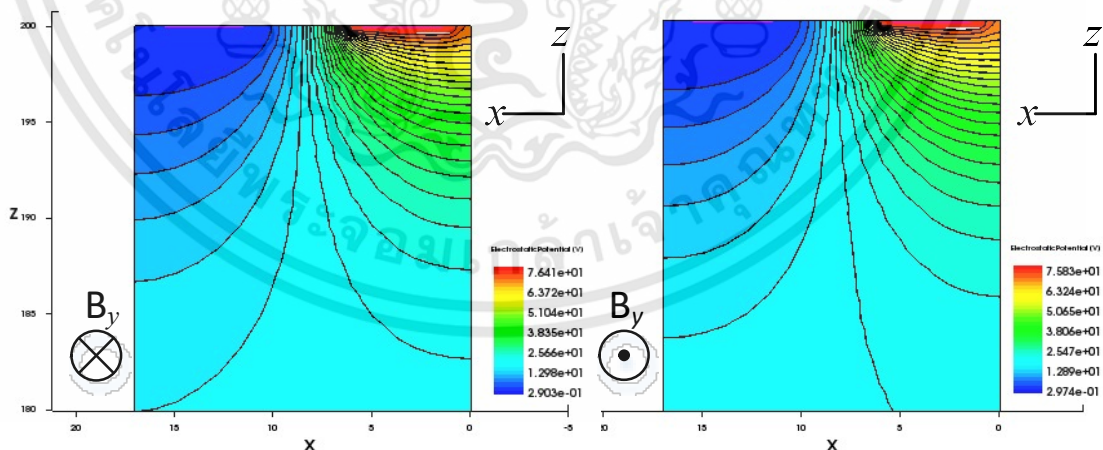
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพรวมแล้วก็จะสังเกตเห็นได้ว่ามีลักษณะที่เหมือนกันเกือบทั้งหมดทั้งในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ หรือแม่แต่กรณีที่ในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์อีกด้วยนั่นเอง

นอกเหนือไปจากนี้แล้วหากเราเลือกทำการพิจารณาในด้านของการกระจายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ด้วยนั้น โดยทำการพิจารณาทั้งในกรณีที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและในกรณีที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงด้วยนั้น ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.15 และในรูปที่ 4.16 ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาจากผลตอบสนองที่ปรากฏขึ้นซึ่งได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปภาพตัดขวางของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวแล้วนั้น ก็จะสังเกตเห็นได้ว่าในกรณีที่ฐานรองอุปกรณ์เป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับ



(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



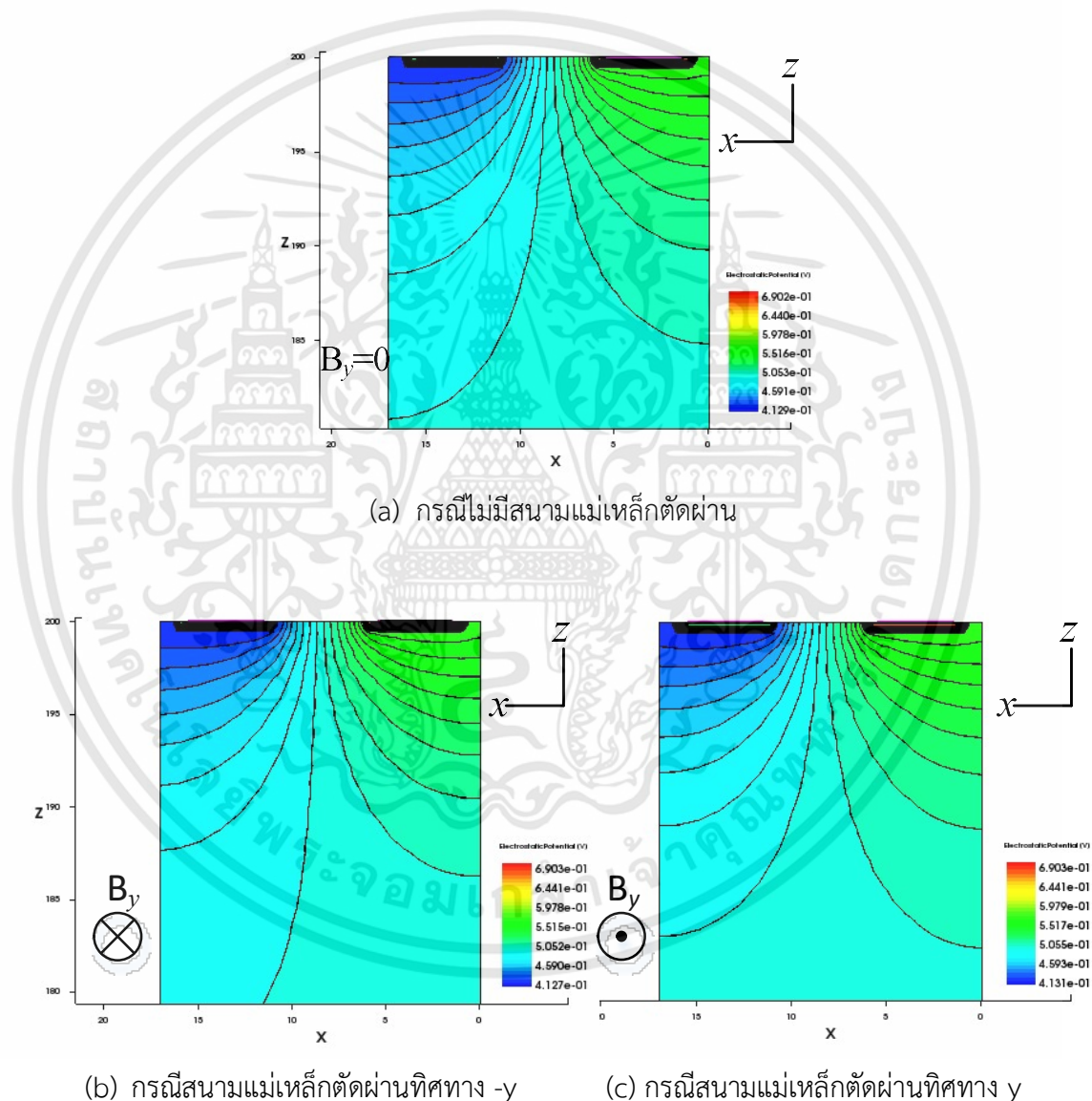
(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$

(c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.15 การกระจายศักย์ไฟฟ้าที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของเส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าต่อทิศทางรวมทั้งขนาดความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กดังกล่าวที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ จากเส้นที่อยู่ในแนวตั้งหรือทิศทางตามแนวแกน z ในขณะที่หากเป็นกรณีพื้นฐานรองอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับสูงนั้นก็พบการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่เล็กน้อยมาก โดยลำดับต่อจากนี้เราจะทำการอธิบายถึงกรณีพื้นฐานรองอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับต่ำก่อนด้วยการเลือกพิจารณาในรูปที่ 4.15(b) ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ แล้วเส้นแสดงศักย์ไฟฟ้านั้นก็จะมีลักษณะที่เอียงไปในทิศทางตาม



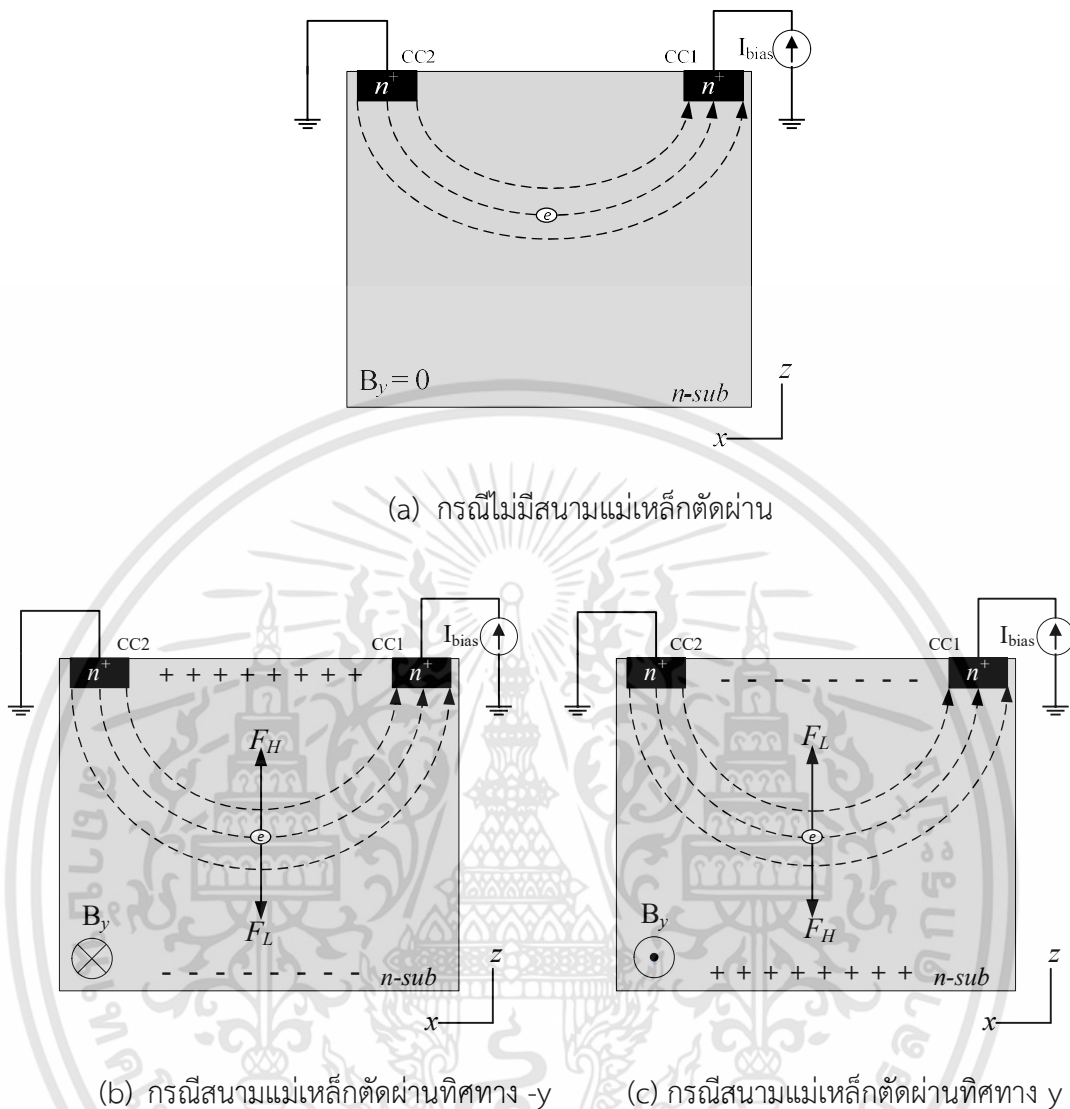
รูปที่ 4.16 การกระจายศักย์ไฟฟ้าพื้นฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน $-x$ เมื่อเราได้ทำการเปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.15(a) และในขณะเดียวกันหากเมื่อมีสนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $+y$ ดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.15(c) แล้วเราก็จะพบได้ว่าเส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าดังกล่าวก็จะมีลักษณะที่เอียงไปในทิศทางตามแนวแกน $+x$ เมื่อเราทำเปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์อีกเช่นเคย ด้านในส่วนกรณีของฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงดังกล่าวนี้ก็จะมีการตอบสนองของเส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเอียงไปในทิศทางตามแนวแกน $-x$ และทิศทางตามแนวแกน x เหมือนดังเช่นในกรณีของฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำเช่นกัน โดยเราสามารถที่จะสังเกตเห็นถึงแนวโน้มความเบี่ยงเบนของเส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าทั้งในสองกรณีได้จากเส้นที่อยู่ในแนวตั้งหรือทิศทางตามแนวแกน z ดังที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 และในรูปที่ 4.16 เป็นต้น รวมไปถึงเรายังสามารถที่จะเลือกพิจารณาได้จากการสังเกตระดับปริมาณการไล่ความเข้มของเฉดสีต่างๆที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ โดยหากทำการเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีของฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและในกรณีของฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงแล้วจะเห็นถึงความแตกต่างของเฉดสีได้อย่างชัดเจน ซึ่งกรณีฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำจะมีการไล่ระดับเฉดสีที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดจนกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีของฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง กล่าวคือที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำจะมีการไล่ระดับปริมาณของเฉดสีเริ่มตั้งแต่เฉดสีแดง(เส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าสูงสุด)ไปจนถึงเฉดสีน้ำเงิน(เส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด) ส่งผลทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในปริมาณที่สูงกว่าในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงที่มีการไล่ระดับปริมาณของเฉดสีเริ่มตั้งแต่เฉดสีเขียว(เส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าระดับปานกลาง)ไปจนถึงเฉดสีน้ำเงิน(เส้นแสดงศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด) โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 75.5754 โวลต์ สำหรับในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำและอยู่ในช่วงประมาณ 0.1584 โวลต์ สำหรับในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงภายใต้กระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ นั่นเอง

นอกจากนี้ผลลัพธ์จากการตอบสนองที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้เอง ซึ่งเราสามารถที่จะนำผลตอบสนองดังกล่าวนี้มาทำการอธิบายได้ด้วยรูปแบบกลไกของการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแทนท์ ดังที่ได้แสดงเอาไว้อยู่ในรูปที่ 4.17 โดยเป็นการแสดงให้เห็นถึงกลไกการเกิดของแมกนีโตริซิสแทนท์ในกรณีที่ฐานรองตัวอุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงนั่นเอง ซึ่งเริ่มทำการพิจารณาจากในรูปที่ 4.17(a) เป็นอันดับแรกจากรูปดังกล่าวเป็นการแสดงให้เห็นถึงเส้นทางการไหลของพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบ โดยในการเคลื่อนที่ของพาหะประจุที่เป็นอิเล็กตรอนดังกล่าวนี้ก็จะส่งผลทำให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนไหลเกิดขึ้นอยู่ทางด้านในของอุปกรณ์จากการไบอัสกระแสคงที่ที่เข้าไป ซึ่งเป็นกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ ในกรณีดังกล่าวนี้เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แผนภาพแบบจำลองกลไกการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์กรณีพื้นฐานที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับที่สูง

จะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้านั้นจะอยู่ใกล้กับตำแหน่งพื้นที่ของบริเวณพื้นผิวด้านบนของตัวอุปกรณ์มากกว่าในกรณีของฐานรองที่มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาสังเกตได้จากรูปภาพตัดขวางที่แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์กรณีพื้นฐานรองที่มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงดังที่ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 ดังกล่าวนั้น จากกรณีดังกล่าวจะเห็นว่าในส่วน

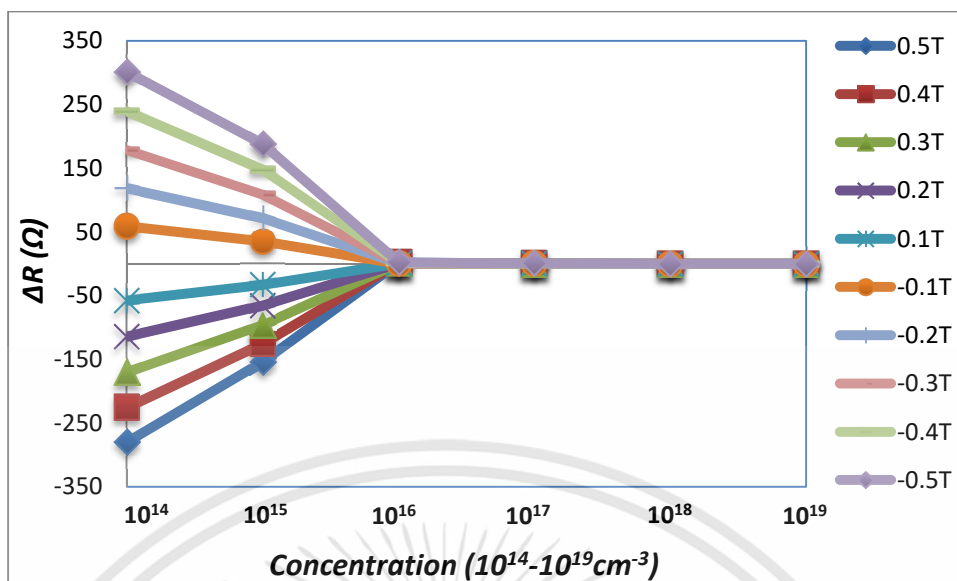
ของระดับปริมาณความเข้มข้นของเจือสารที่ปรากฏตรงตำแหน่งบริเวณพื้นที่ด้านบนใกล้กับขั้วกระแสทั้งสองจะมีสีเเดดอยู่ในโซนแดงถึงส้ม(เส้นแสดงความหนาแน่นกระแสที่ระดับสูงสุด)เป็นบริเวณกว้างกว่าในกรณีของฐานรองที่มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ จากนั้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในแนวขนานทิศทางตามแนวแกน $-y$ ดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.17(b) แรงลอเรนซ์ก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในแนวตั้งหรือทิศทางตามแนวแกน $-z$ และในขณะเดียวกันนั้นเองทางด้านของแรงไฟฟ้าฮอลล์ก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกน z เช่นเดียวกันแต่ว่าเป็นทิศทางที่ตรงข้ามกัน โดยที่ปริมาณขนาดของแรงไฟฟ้าฮอลล์นั้นจะมีค่าที่เกือบเท่ากับขนาดของแรงลอเรนซ์ ซึ่งเราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้นที่แสดงอยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนท์ ($\%MR(B)$) นั้นว่ามีค่าที่เป็นบวกดังข้อมูลประกอบในตารางที่ 4.1 ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถที่จะเข้าใจได้มากยิ่งขึ้นว่าแรงลอเรนซ์มีค่าที่มากกว่าแรงไฟฟ้าฮอลล์เพียงเล็กน้อย ($F_H < F_L$) เท่านั้น ในทางกลับกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในแนวขนานหรือทิศทางตามแนวแกน y ดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.17(c) แรงลอเรนซ์ก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกน z และในส่วนของแรงไฟฟ้าฮอลล์ก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในทิศทางตามแนวแกน $-z$ ซึ่งเป็นทิศทางที่ตรงข้ามกันอีกเช่นเคย โดยที่ปริมาณขนาดของแรงทั้งสองดังกล่าวนี้ก็ยังคงมีค่าที่เกือบจะเท่ากันอีกครั้ง แต่ถ้าหากเราทำการพิจารณาด้วยการสังเกตที่ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในตารางที่ 4.1 ประกอบก็จะทำให้เราทราบได้ว่าผลของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนท์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสแตอร์นั้นก็ยังคงเป็นบวกอีกเช่นเคยเหมือนกับในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ ดังนั้นจึงทำให้เราเข้าใจได้ว่าแรงไฟฟ้าฮอลล์มีค่าที่มากกว่าแรงลอเรนซ์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ($F_H > F_L$) นั่นเอง

จากนั้นเมื่อเราดำเนินการนำผลตอบสนองในรูปแบบของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตริซิสแตนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวที่ระดับความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาทำการพล็อตลงโดยเทียบกับค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองที่ระดับต่างๆ ก็จะทำให้ได้ลักษณะของเส้นกราฟดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.18 จากนั้นเมื่อเราได้ทำการพิจารณาลักษณะของรูปกราฟดังกล่าวแล้วก็จะเห็นได้ว่าเมื่อฐานรองตัวอุปกรณ์มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์ไปด้วย ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้เองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองดังกล่าวมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นนั้นก็เป็นผลโดยเกิดมาจากการที่เราได้ทำการเติมปริมาณความเข้มข้นของสารเจือหรือกล่าวได้ว่าเป็นการเติมจำนวนของพาหะประจุเพิ่มลงไปภายในฐานรองของตัวอุปกรณ์จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าที่ตีมากขึ้นตามไปด้วยหรือกล่าวได้อีกนัยว่าทำให้ค่าความต้านทานอุปกรณ์มีค่าที่ลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นอะตอมสารเจือหรือจำนวนพาหะประจุและค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นของตัวอุปกรณ์ว่าเป็นความสัมพันธ์แบบผกผันต่อกัน จึงทำให้อุปกรณ์แมกนีโตริซิสแตอร์ที่มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองสูงก็จะมีผลตอบสนองด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในของตัวอุปกรณ์ซึ่งทำให้มีค่าที่ลดน้อยลงตามไปด้วย รวมไปถึงในส่วนของผลตอบสนองค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตลอดจนค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสแตอร์อีกด้วยนั่นเอง

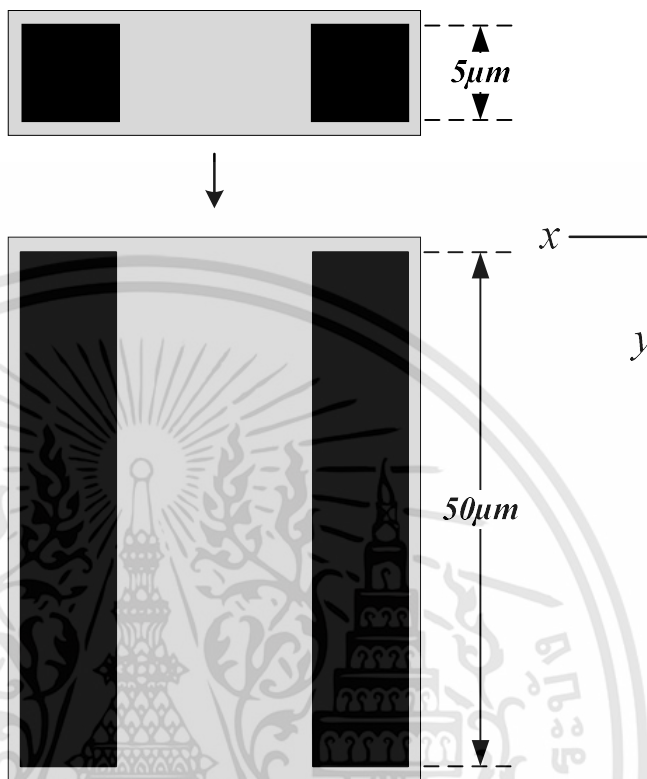
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ฐานรองมีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่างๆ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ดังนั้นจากผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดจึงทำให้เราสามารถที่จะสรุปผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่ดำเนินการปรับเปลี่ยนตัวแปรทางด้านความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองที่ค่าต่างๆ ($10^{14} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) ได้ว่า ค่าที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในโหมดการเบี่ยงเบนของกระแสในทิศทางแนวตั้งที่ดีที่สุดนั้นจึงควรเลือกกำหนดให้ตัวอุปกรณ์มีฐานรองที่เป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจืออยู่ในช่วงระดับที่ต่ำ ($10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) เนื่องจากทำให้ผลการตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นต่อระดับปริมาณความเข้มและทิศทางในแนวนอนของสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงยังให้ผลตอบสนองทั้งในด้านของค่าความต้านทาน ($R(B)$), ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ได้ดีกว่าในกรณีที่ฐานรองของอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับที่สูง ด้วยการเปรียบเทียบผลตอบสนองของทั้ง 2 กรณีดังกล่าวซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 75 กิโลโอห์ม และ 158 โอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน, ที่ค่า 301 โอห์ม และ 0.10 โอห์ม สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง และที่ค่า 0.39 เปอร์เซ็นต์ กับ 0.06 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ที่กระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา รวมทั้งผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวสรุปนี้ก็แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการหลักที่ 4.5 อีกด้วย จะเห็นได้จากพารามิเตอร์ $\rho \propto \Delta R$ และ $1/\Delta t \propto \Delta R$ กล่าวคือ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำจะมีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่สูงและเกิดค่าระยะความลึกตัวแทนของกระแสทั้งหมดที่ส่งผลทำให้เกิดความต้านทานด้วยค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เป็นต้น

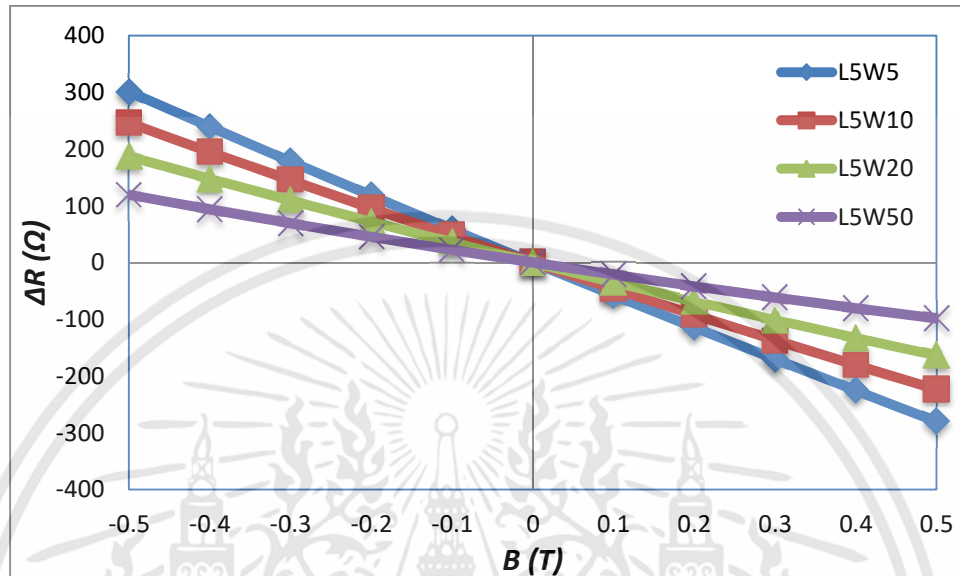
4.2.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์
ในกรณีที่ตัวอุปกรณ์มีค่าระยะของความกว้างที่แตกต่างกัน ($W/L > 1$)



รูปที่ 4.19 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์
กรณีที่ตัวอุปกรณ์มีค่าระยะของความกว้างแตกต่างกัน

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีขนาด
ทางด้านความกว้างซึ่งแตกต่างกันนั้น เราได้ดำเนินการจำลองแบบภายใต้เงื่อนไขของการกำหนดให้
มิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวให้มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร,
ด้านความยาวตัวอุปกรณ์ (L_d) เป็น 17 ไมโครเมตร และ ด้านความลึก (T) เท่ากับ 100 ไมโครเมตร
ด้วยการไบอัสกระแสคงที่ขนาด 1 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งขั้วกระแส CC1 โดยที่ตัวอุปกรณ์ได้ถูก
จำลองอยู่ในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ค่า 0 เทสลา จนถึง 0.5 เทสลา ในทิศตามแนวแกน $-y$
และทิศตามแนวแกน y ตามลำดับ ซึ่งตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั้นจะถูกกำหนดค่าความ
เข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองที่ระดับต่ำ ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) และความเข้มข้นอะตอมสารเจือของ
ฐานรองที่ระดับสูง ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ด้วย ต่อจากนั้นก็เริ่มดำเนินการเพิ่มขนาดความกว้างของตัว
อุปกรณ์จากค่า 5 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นจนถึงค่า 50 ไมโครเมตร ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 หรือที่
เรียกว่าพารามิเตอร์ อัตราส่วนรูปทรง ซึ่งประกอบด้วย ($L5W5, L5W10, L5W20, L5W50$) โดยที่ผล

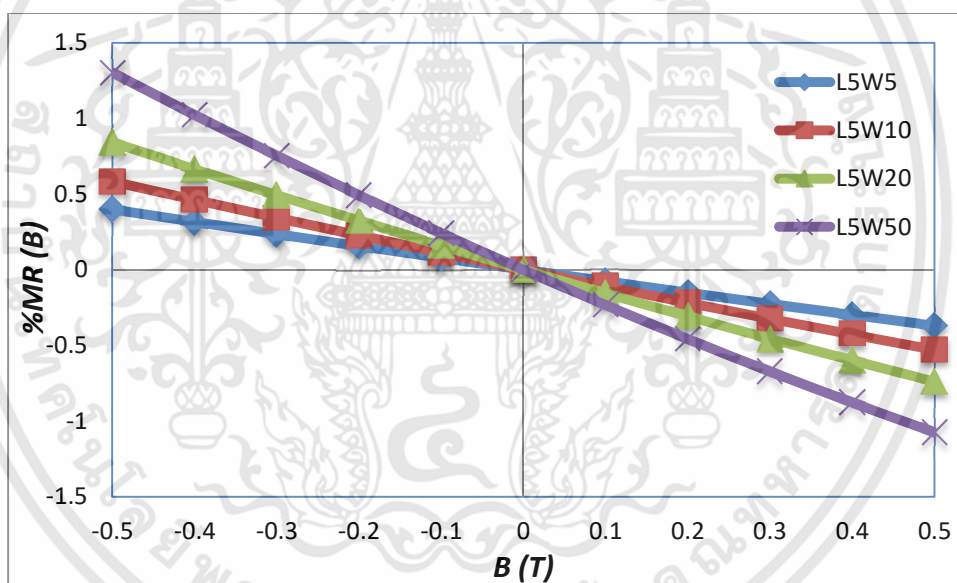
การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.20 และ 4.22 ส่วนผลของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ที่ได้จากการจำลองแบบก็จะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.21 และ 4.23 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

จากผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีที่มีการปรับอัตราส่วนมิติรูปทรงด้านความกว้างที่มากกว่าความยาวตั้งแต่ค่า 5 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นจนถึงค่า 50 ไมโครเมตร หรือเรียกว่าเป็นกรณีที่รูปทรงของตัวอุปกรณ์มีขนาดรูปทรงสั้น ($W/L > 1$) ที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำหรือมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง เมื่อทำการพิจารณาจากรูปกราฟที่ 4.20 และ 4.21 ได้แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ ซึ่งพบว่าเมื่อผลตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กดังกล่าว เหมือนดังที่ได้เคยกล่าวเอาไว้ในการจำลองแบบที่ผ่านมาในกรณีที่ฐานรองของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกัน โดยที่ระดับค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะมีผลลัพธ์ที่ต่ำกว่าทั้ง 2 กรณีจากที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งในกรณีที่กำลังทำการกล่าวอยู่นี้ ($W/L > 1$; L5W50) ผลตอบสนองของค่าความต้านทานจะอยู่ที่ค่าประมาณ 9 กิโลโอห์ม จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ได้แสดงให้เห็นถึงข้อมูลอัตราส่วนมิติรูปทรงด้วยความกว้างเท่ากับ 50 ไมโครเมตร และด้วยความยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (หรือเขียนย่อด้วย ; L5W50) ก็คือน้อยกว่าในกรณีของ

อัตราส่วนมิติรูปทรงความกว้างเท่ากับความยาว ($W/L = 1$; L5W5) ผลตอบสนองของค่าความต้านทานจะอยู่ที่ค่าประมาณ 75 กิโลโอห์ม และกรณีของอัตราส่วนมิติรูปทรงความกว้างน้อยกว่าความยาว ($W/L < 1$; L5W5) ผลตอบสนองของค่าความต้านทานจะอยู่ที่ค่าประมาณ 875 กิโลโอห์ม ด้วยผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่ต่ำจึงส่งผลทำให้ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ของตัวอุปกรณ์มีค่าที่ต่ำลงไปด้วย โดยค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 300 ถึง 100 โอห์ม จากการเพิ่มขนาดขึ้นไปของด้านความกว้างตัวอุปกรณ์จากค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร จนถึงค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นกราฟที่อยู่ในรูปที่ 4.20 ประกอบ รวมถึงทั้งหากทำการสังเกตก็จะทำให้เราทราบว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ของตัวอุปกรณ์จะลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนมิติรูปทรงด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์หรือกล่าวได้ว่าเมื่อตัวอุปกรณ์มีขนาดด้านความกว้างที่มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะที่แปรผกผันต่อกันระหว่างมิติรูปทรงด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์และค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าว

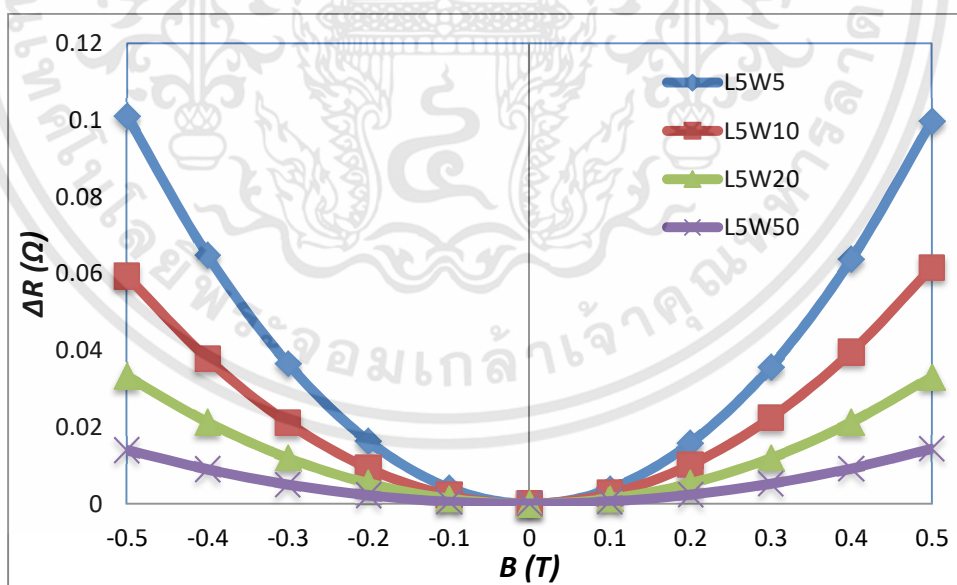


รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

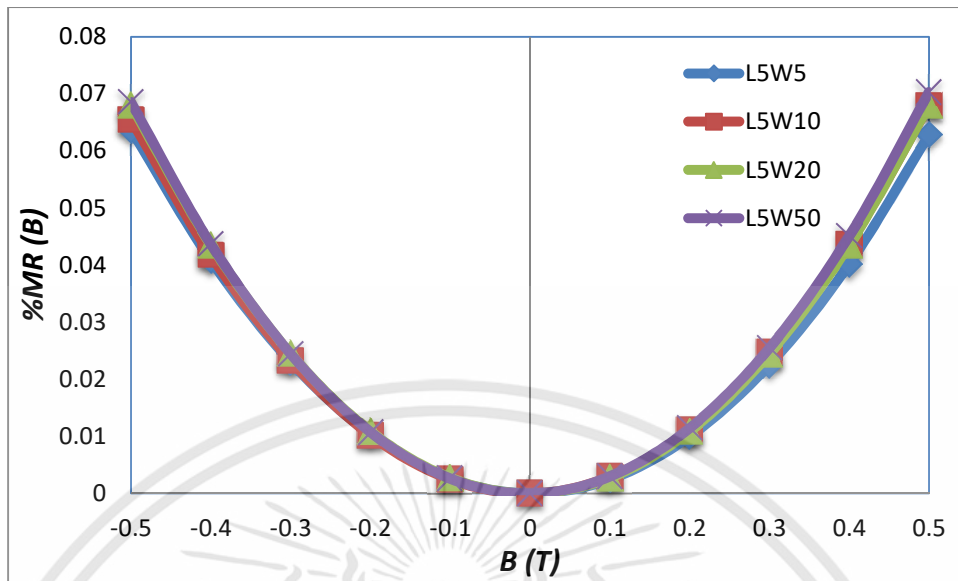
ส่วนผลตอบสนองที่แสดงอยู่ในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ($\%MR(B)$) ของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ได้แสดงผลลัพธ์ออกมาด้วยลักษณะที่ตรงกันข้ามกับกรณีของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) โดยค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ($\%MR(B)$) ของตัวอุปกรณ์จะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนมิติรูปทรงด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ใน

ลักษณะที่แปรผันตรงต่อกันระหว่างมิติรูปทรงด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนที่ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าว ตลอดจนช่วงของผลตอบสนองค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนที่ดังกล่าวนี้ก็ยังคงอยู่ในช่วงเดียวกันกับทั้งกรณีของอัตราส่วนมิติรูปทรงความกว้างเท่ากับความยาว ($W/L = 1$; L5W5) ค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 0.4 เปอร์เซ็นต์ และกรณีของอัตราส่วนมิติรูปทรงความกว้างน้อยกว่าความยาว ($W/L < 1$; L50W5) ค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 0.6 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น โดยกรณีดังกล่าวนี้ ($W/L > 1$; L5W50) ค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 0.4 ถึง 1.3 เปอร์เซ็นต์ จากการเพิ่มขนาดขึ้นไปของด้านความกว้างตัวอุปกรณ์จากค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร จนถึง ค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่อยู่ช่วงระดับของผลตอบสนองที่สูงมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ผ่านมาในการจำลองแบบครั้งนี้

ในส่วนกรณีพื้นฐานของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงหรือมีสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำนั้น เมื่อทำการพิจารณาผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จากรูปกราฟที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.22 และ 4.23 จะสังเกตเห็นได้ถึงผลที่ไม่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนปรากฏขึ้น จากค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนที่ดังกล่าวนี้ได้แสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อยเป็นอย่างมาก โดยที่ค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 0.1 ถึง 0.02 โอห์ม สำหรับความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนจะอยู่ที่ช่วงระดับประมาณ



รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์



รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของตัวอุปกรณ์ ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ในระยะความกว้างที่แตกต่างกัน ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

0.06 ถึง 0.07 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา หรืออาจกล่าวได้ในอีกลักษณะว่าไม่มีการตอบสนองกับขนาดความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก แนวนอนเกิดขึ้นเลย สาเหตุเนื่องมาจากปรากฏการณ์ฮอลล์จะไม่ค่อยปรากฏขึ้นในวัสดุที่มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้เองจึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์อีกด้วยถึงแม้ว่าจะมีการปรับเปลี่ยนในส่วนพารามิเตอร์ของอัตราส่วนทางมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์แล้วก็ตาม เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.2 ประกอบ

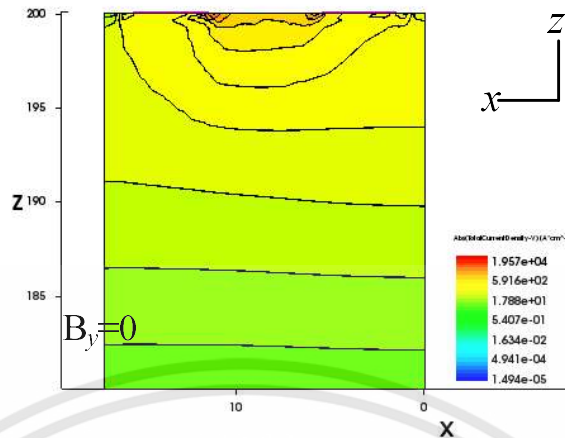
สำหรับในส่วนของมิติตัวอุปกรณ์ที่มีขนาดรูปทรงสั้น ($W/L > 1$) ดังกล่าวนี้นี้ ด้วยผลตอบสนองของค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ที่สูงมากนั้นเป็นผลอันเกิดมาจากการที่ภายในตัวอุปกรณ์มีปริมาณความหนาแน่นของกระแสในระดับที่สูงนั่นเอง โดยเราสามารถที่จะทำการพิจารณาได้จากรูปที่ 4.24 ประกอบการทำความเข้าใจ ซึ่งจากในรูปภาพส่วนตัดขวางของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้นี้ได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในฐานรองของตัวอุปกรณ์ โดยเราสามารถเลือกใช้วิธีการสังเกตจากเส้นที่อยู่ในแนวนอนหรือเส้นตามแนวแกน x พร้อมกับพิจารณาระดับความเข้มของเฉดสีต่างๆที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.24 ซึ่งเส้นที่บในแนวนอนเป็นการบ่งบอกถึงแนวโน้มและทิศทางกระจายตัวของกระแส ส่วนในด้านระดับความเข้มของเฉดสีต่างๆก็บ่งบอกถึงระดับความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวของ

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนด้านขนาดความกว้างมากกว่าความยาว ด้วยกระแสไอซ์สคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

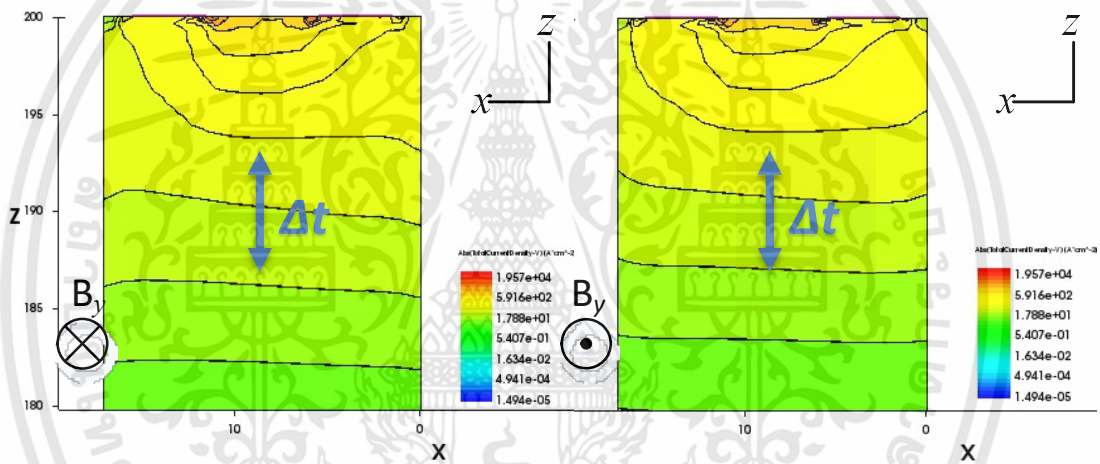
Magnetic field (T)	W/L >1 (50/5)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	R[B] (Ω)	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)	R[B] (Ω)	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)
0.5	9068.5557	-98.5045	-1.0745	20.460811	0.014365	0.070261
0.4	9086.5789	-80.4813	-0.8779	20.455669	0.009223	0.045110
0.3	9105.4413	-61.6189	-0.6721	20.451660	0.005214	0.025504
0.2	9125.1428	-41.9174	-0.4572	20.448786	0.002341	0.011449
0.1	9145.6828	-21.3774	-0.2331	20.447048	0.000602	0.002947
0	9167.0603	0	0	20.446445	0	0
-0.1	9189.2732	22.2129	0.2423	20.446978	0.000533	0.002606
-0.2	9212.3192	45.2589	0.4937	20.448647	0.002201	0.010767
-0.3	9236.1951	69.1348	0.7541	20.451450	0.005005	0.024479
-0.4	9260.8972	93.8369	1.0236	20.455389	0.008943	0.043740
-0.5	9286.4211	119.3608	1.3020	20.460460	0.014014	0.068544

อุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยกลไกการเกิดขึ้นของผลตอบสนองต่อขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงรวมทั้งเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ดังกล่าวนี้สามารถที่จะอธิบายได้ด้วยความไม่สมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในทิศทางแนวตั้งระหว่างแรงลอเรนซ์ (F_L) และ แรงไฟฟ้าฮอลล์ (F_H) ซึ่งในกรณีที่ฐานรองของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำดังกล่าวนี้ โดยที่เคยได้ทำการกล่าวถึงหลักการของกลไกดังกล่าวนี้เอาไว้แล้ว ในช่วงตอนต้นของการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นกลไกที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก นั่นก็คือ ผลของแรงลอเรนซ์จะมีค่าที่มากกว่าแรงไฟฟ้าฮอลล์ ($F_L > F_H$) ทั้งในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y นั่นเอง

โดยจากในรูปภาพที่ 4.25 เป็นภาพส่วนตัดขวางซึ่งแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสที่อยู่ภายในของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ซึ่งมีมิติรูปทรงที่สั้น ($W/L > 1$) โดยในกรณีดังกล่าวที่ฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงการกระจายตัวของกระแสโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะหนาแน่นที่บนตำแหน่งบริเวณพื้นผิวด้านบนและจะไม่กระจายตัวสม่ำเสมอถึงกลางเข้าไปในตำแหน่งบริเวณพื้นที่ด้านล่างของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยว่า กรณีที่ฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในของตัวอุปกรณ์ซึ่งมีลักษณะของความ



(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



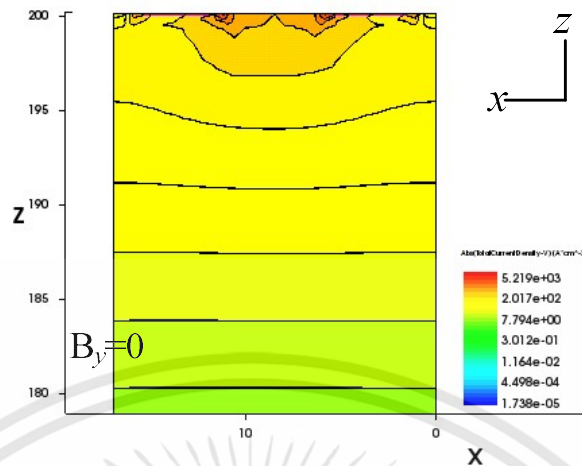
(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง -y

(c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

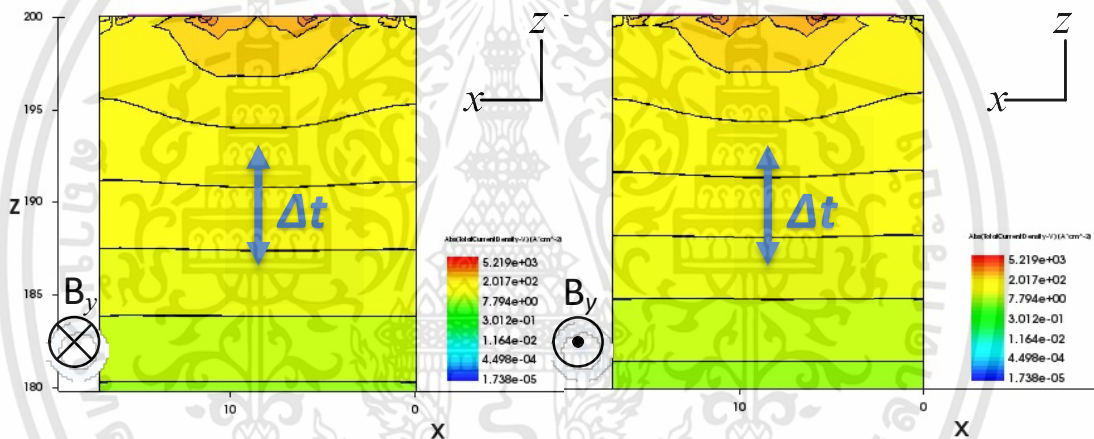
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโทรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตรและความยาว 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

เป็น uniform มากกว่ากรณีฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ สังเกตได้จากระดับปริมาณความเข้มของเขตสีด้วยลักษณะที่เหมือนกันโดยตลอดและความลึกตัวแทนของกระแสทั้งหมด (Δt) ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 4.25 ในภาพรวมส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในโซนที่เป็นสีเหลืองทั้งในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กรวมทั้งกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ด้วย ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์แมกนีโทรีซิสเต้นท์ดังกล่าวนี้มีค่าที่น้อยกว่านั่นเอง ในทางกลับกันหากพิจารณากรณีของฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ ดังในรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ถึงรูปแบบการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในของตัวอุปกรณ์ซึ่งจะมีลักษณะของความเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



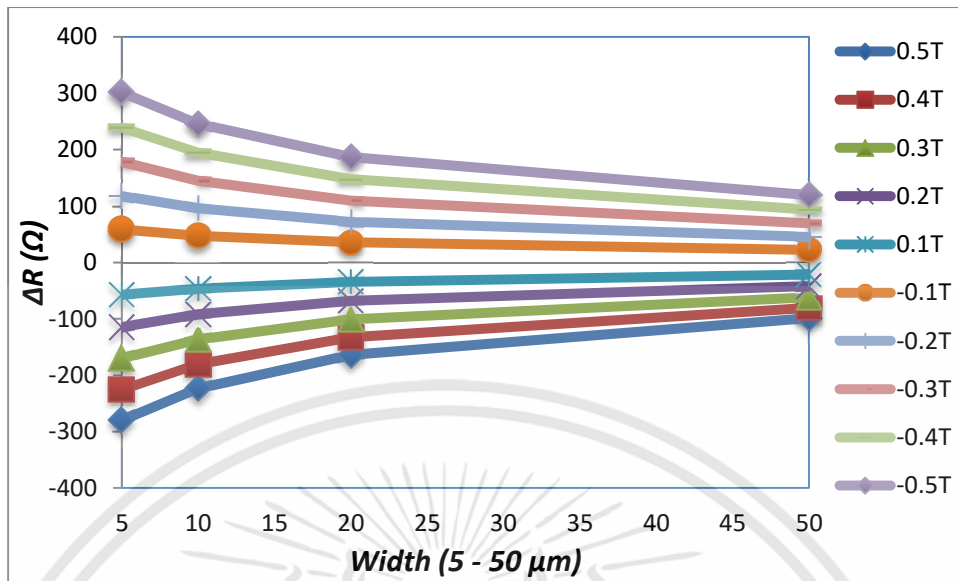
(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.25 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโทรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตรและความยาว 5 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

non-uniform มากกว่ากรณีฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง สามารถพิจารณาได้จากระดับปริมาณความเข้มของเฉดสีและความลึกตัวแทนของกระแสทั้งหมด (Δt) ที่ปรากฏด้วยลักษณะที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งหากสังเกตในภาพรวมส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในโซนที่เป็นสีเหลือง-เขียวทั้งในกรณีที่ไม่มีส่วนแม่เหล็ก รวมไปถึงกรณีที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ด้วย ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์แมกนีโทรีซิสเต้นต์ดังกล่าวนี้มีค่าที่มากกว่านั่นเอง โดยค่าที่อยู่ประมาณ 1.30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในกรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ และ 0.06 เปอร์เซ็นต์ สำหรับในกรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่มีมิติรูปทรงด้านความกว้างมีค่าแตกต่างกัน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

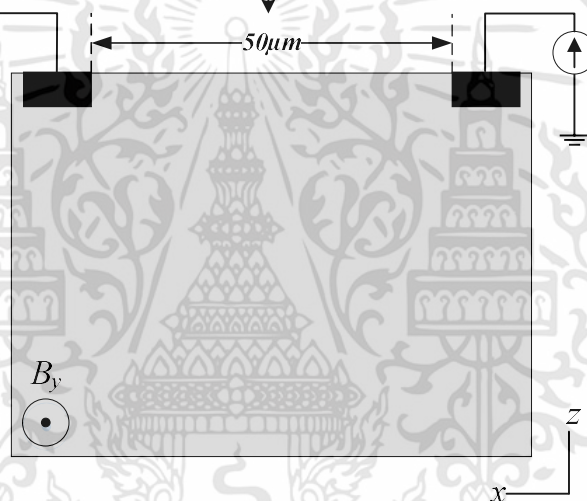
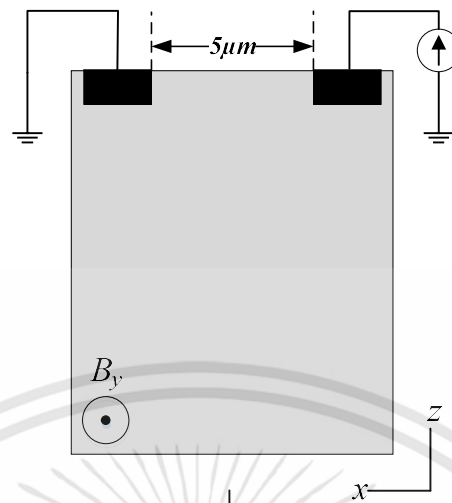
จากนั้นเมื่อนำผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับในแต่ละขนาดความกว้างของฐานรองตัวอุปกรณ์ก็จะทำให้ได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.26 ดังนั้นจากผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนด้วยการจำลองแบบของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรมิติรูปทรงด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ที่ค่าต่างๆ (L5W5 – L5W50) และด้วยการวิเคราะห์จากที่กล่าวมาในเบื้องต้นจึงสามารถที่จะสรุปผลการตอบสนองได้ว่า ค่าที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในโหมดการเบี่ยงเบนของกระแสในทิศทางแนวดิ่ง นอกจากที่จะต้องทำการเลือกใช้ฐานรองของตัวอุปกรณ์ให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ เนื่องจากให้ผลตอบสนองปรากฏขึ้นต่อปริมาณความเข้มและทิศทางแนวนอนของสนามแม่เหล็กด้วยลักษณะที่เป็นเชิงเส้นแล้วนั้น ในด้านการออกแบบมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์จึงสมควรเลือกใช้พารามิเตอร์ของขนาดด้านกว้างที่แคบ เนื่องจากว่าให้ผลตอบสนองที่สูงมากกว่าในกรณี que เลือกใช้พารามิเตอร์ขนาดด้านกว้างของมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ที่กว้าง ทั้งในด้านของผลตอบสนองด้วยความต้านทาน ($R[B]$) และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากทั้งสองกรณีระหว่างพารามิเตอร์ของขนาดด้านกว้างที่แคบและกว้าง จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองดังกล่าวจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 75 กิโลโอห์ม และ 9 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน ส่วนที่ค่าอยู่ในช่วงประมาณ 301 โอห์ม และ 119 โอห์ม สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง รวมไปถึงที่ค่าประมาณ 0.39 เปอร์เซ็นต์ และ 1.30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ

เปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ ตามลำดับ ภายใต้กระแสไบอัสคงที่เท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 0.5 เทสลา เป็นต้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้จากลักษณะของเส้นกราฟที่แสดงให้เราทราบถึงผลการลดลงของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตริซิสแทนท์เมื่อขนาดด้านความกว้างของฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวสรุปมาในเบื้องต้นนี้ก็แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการหลักที่ 4.5 อีกด้วย จะเห็นได้จากพารามิเตอร์ $1/W \propto \Delta R$ ที่เป็นลักษณะของการแปรผกผันต่อกัน กล่าวคือด้วยการพิจารณาเลือกใช้ฐานรองของตัวอุปกรณ์ให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ต่ำทำให้มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่สูงส่งผลทำให้เกิดค่าความต้านทาน ($R[B]$) ที่มากขึ้นด้วยแล้วนั้น แต่ถ้าหากมีการดำเนินการปรับเปลี่ยนในส่วนของพารามิเตอร์ด้านความกว้างด้วยแนวโน้มในทิศทางที่เพิ่มมากขึ้นแล้วก็จะส่งผลกระทบต่อทั้งค่าความต้านทาน ($R[B]$) และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยลักษณะที่ลดน้อยลงอย่างมากนั่นเอง

4.2.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในกรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแส CC1 และขั้วกระแส CC2 มีค่าแตกต่างกัน ($W/L < 1$)

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในกรณีที่มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไบอัสทั้งสองที่แตกต่างกันนั้น โดยเราได้ดำเนินการจำลองแบบด้วยการกำหนดมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวให้มีค่าระยะความกว้างของขั้วกระแส (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร, ด้านของความลึก (T) เท่ากับ 100 ไมโครเมตร และด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) เป็น 7 ไมโครเมตร ในฐานรองของตัวอุปกรณ์กำหนดให้มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) และให้มีค่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ด้วย พร้อมทั้งทำการไบอัสกระแสคงที่ขนาดเท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 โดยที่ตัวของอุปกรณ์จะถูกจำลองแบบอยู่ภายใต้ระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในแนวขนานด้วยค่าที่อยู่ระหว่างตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y จากนั้นก็จะเป็นในส่วนของการกำหนดมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ในด้านขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไบอัสทั้งสอง (ขั้ว CC1-CC2) โดยจะมีค่าระยะห่างเริ่มต้นเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ต่อจากนั้นก็ดำเนินการเพิ่มในส่วนของขนาดระยะห่างดังกล่าวนี้ขึ้นไปจนถึงค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร หรือที่เรียกว่าเป็นพารามิเตอร์ทางด้านอัตราส่วนรูปทรงซึ่งจะประกอบไปด้วย การกำหนดให้ค่าทางด้านความกว้างของขั้วกระแส (W) คงที่ตลอดคือ 5 ไมโครเมตร แต่จะทำการปรับเปลี่ยนในส่วนที่เป็นค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไบอัสทั้งสอง (L) ด้วยการเพิ่มค่าของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไบอัสทั้งสองที่แตกต่างกันออกไปคือ 5-50 ไมโครเมตร โดยสามารถที่จะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปแบบสัญลักษณ์แบบย่อก็คือ ($L5W5, L10W5, L25W5, L50W5$) สำหรับที่จะนำมาใช้ในการจำลองแบบภายในกรณีดังกล่าวนี้ ดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.27 ประกอบ

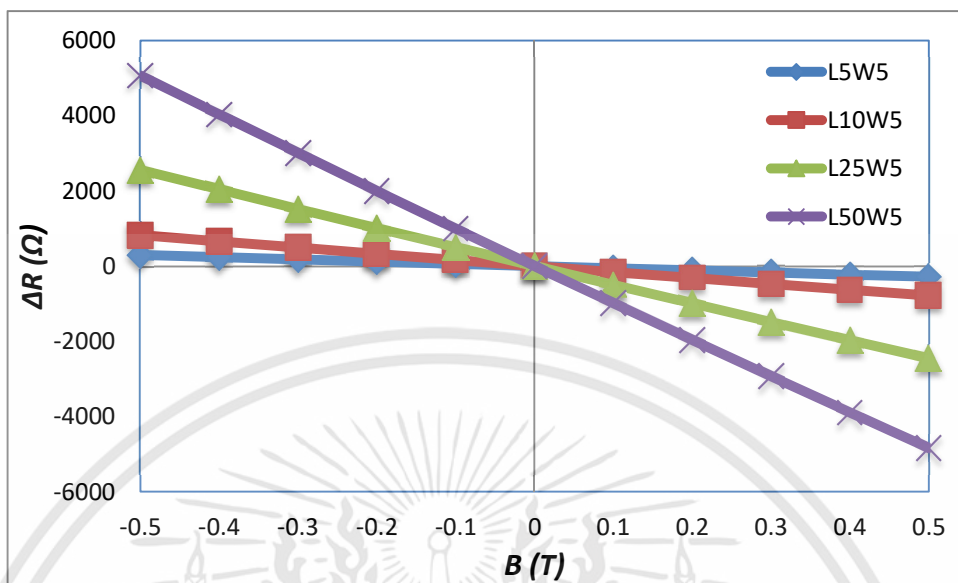
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองมีค่าแตกต่างกัน

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่มีขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไบอัสทั้งสองที่ต่างกันออกไปนั้นจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.28 และรูปที่ 4.30 และในส่วนที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.31 ก็จะเป็นผลตอบสนองที่แสดงอยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน หรือที่เรียกว่า เปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ซึ่งผลตอบสนองที่อยู่ในทั้งสองรูปแบบดังที่กล่าวมานี้ไม่ว่าจะเป็นค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของอุปกรณ์ ทั้งในกรณีฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำและสูงจะแสดงเป็นข้อมูลประกอบเอาไว้ในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



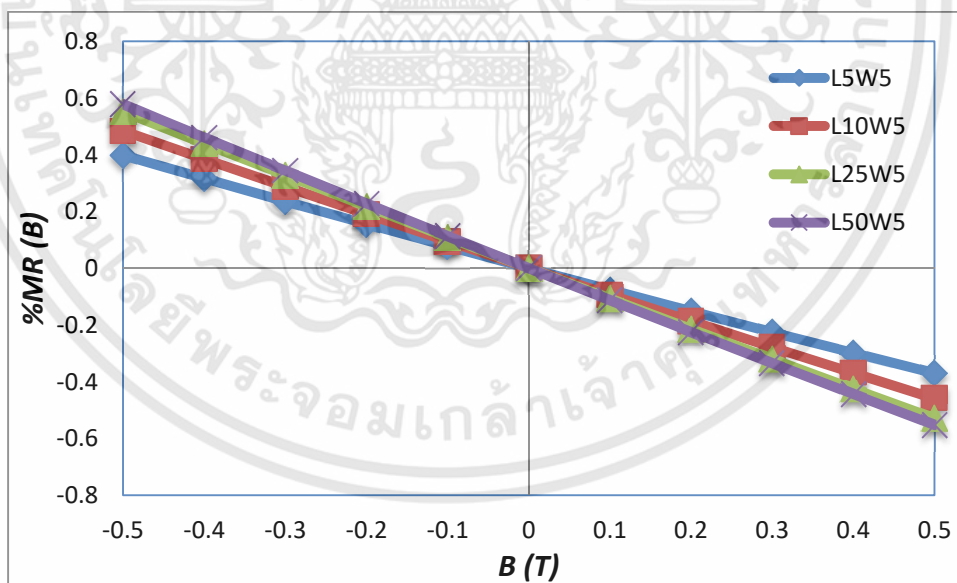
รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไปอัส 1 มิลลิแอมป์

จากผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่มีการปรับอัตราส่วนทางมิติรูปทรงด้านความยาวตั้งแต่ค่า 5 ไมโครเมตรเพิ่มขึ้นจนถึงค่า 50 ไมโครเมตร หรือเรียกว่าเป็นกรณีที่รูปทรงของตัวอุปกรณ์มีขนาดรูปทรงยาว ($W/L < 1$) ที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ เมื่อทำการพิจารณาจากรูปกราฟที่ 4.28 และ 4.29 จะแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้จะมีผลลัพธ์ที่สูงกว่าทั้งในกรณีของอัตราส่วนมิติรูปทรงที่ความกว้างเท่ากับความยาว ($W/L = 1$; L5W5) และในกรณีของอัตราส่วนมิติรูปทรงที่ความกว้างมากกว่าความยาว ($W/L > 1$; L50W5) หากสังเกตจากข้อมูลในตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแทนท์ประกอบ ซึ่งในกรณีที่กำลังทำการกล่าวอยู่นี้ ($W/L < 1$; L50W5) เป็นการแสดงให้เห็นถึงข้อมูลอัตราส่วนมิติรูปทรงด้วยความกว้างเท่ากับ 5 ไมโครเมตร และด้วยความยาวเท่ากับ 50 ไมโครเมตร (หรือเขียนย่อด้วย ; L50W5) จะเห็นได้ว่ามีผลตอบสนองของค่าความต้านทาน ($R[B]$), ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ที่เกิดขึ้นภายในของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในระดับของค่าที่สูงเป็นอย่างมาก โดยค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 875 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทานซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในส่วนของการเพิ่มขึ้นทางด้านขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองนั้นนอกจากจะ

เป็นการเพิ่มขึ้นของขนาดความยาวทางด้านมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์แล้วนั้นยังจะเป็นการเพิ่มขึ้นในส่วนของเส้นทางการไหลกระแสไฟฟ้าหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของระยะทางการเคลื่อนที่พาหะประจุภายในตัวอุปกรณ์ที่มากขึ้นด้วยนั่นเอง จึงส่งผลทำให้ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

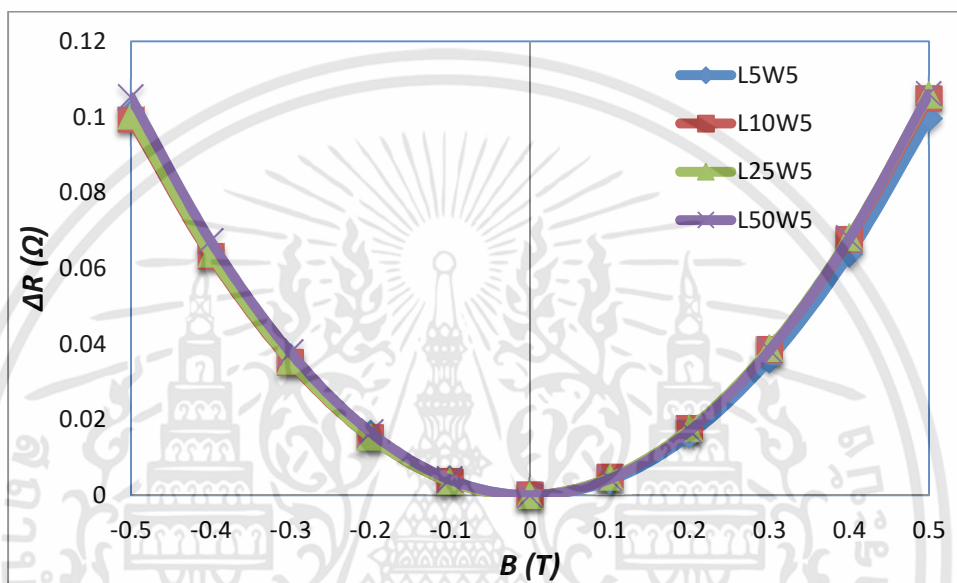
นอกจากนี้แล้วหากสังเกตจากในรูปกราฟที่ 4.28 จะทำให้เราได้ทราบว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นพร้อมกับการเพิ่มของอัตราส่วนทางมิติรูปทรงด้านความยาวของตัวอุปกรณ์หรือจะกล่าวได้ว่าเป็นการลดลงตามอัตราส่วนทางมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ ซึ่งในลักษณะดังกล่าวนี้เป็นความสัมพันธ์ที่แปรผกผันตรงต่อกันระหว่างค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงกับระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง โดยค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 75 ถึง 880 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน และค่าในช่วงระดับประมาณ 301 โอห์ม ถึง 5 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง จากการเพิ่มขนาดขึ้นไปของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสของตัวอุปกรณ์จากค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร จนถึงค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ที่กระแสไป้อัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา

ในรูปที่ 4.29 เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองในด้านของค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ด้วยการแสดงผลที่ออกมาในลักษณะที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับในกรณีของค่าความต้านทาน ($R(B)$) และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) นั้น



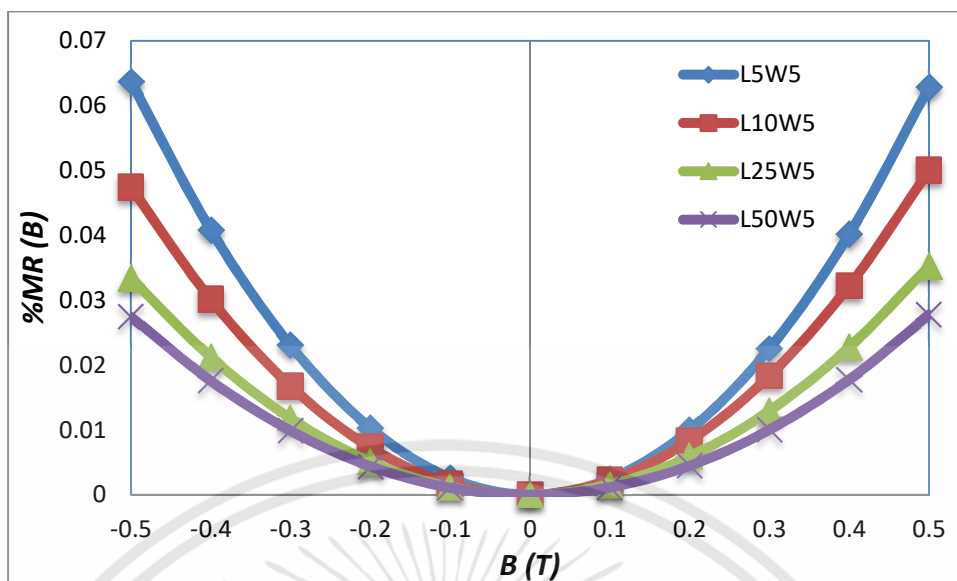
รูปที่ 4.29 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไป้อัส 1 มิลลิแอมป์

หมายถึงว่าเป็นความสัมพันธ์ที่แปรผันตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนทางมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ด้านความยาว เพียงแต่ว่าผลลัพธ์การตอบสนองที่เกิดขึ้นในรูปของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ (%MR(B)) ของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะมีค่าที่ต่ำกว่าในกรณีของรูปทรงตัวอุปกรณ์ที่มีขนาดรูปทรงสั้น ($W/L > 1$) โดยค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 0.39 ถึง 0.57 เปอร์เซ็นต์ จากการเพิ่มขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสของตัวอุปกรณ์ขึ้นไปจากค่า 5 ไมโครเมตร ถึงค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา นั่นเอง



รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ในส่วนของการรองรับอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงนั้น เมื่อทำการพิจารณาจากในรูปกราฟที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นได้ถึงผลที่ไม่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กปรากฏขึ้นทั้งในรูปแบบของผลการตอบสนองด้านค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงรวมถึงที่เป็นรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ดังกล่าว เมื่อทำการสังเกตจากลักษณะของเส้นกราฟได้แสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเป็นอย่างมาก เหมือนกับที่ได้เคยกล่าวเอาไว้แล้วในช่วงการจำลองแบบของพารามิเตอร์การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือฐานรอง โดยค่าจะอยู่ในช่วงระดับประมาณ 0.1 โอห์ม สำหรับความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ (%MR(B)) จะอยู่ที่ช่วงระดับประมาณ 0.03 ถึง 0.06 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่มีการตอบสนองกับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กเลยนั่นเอง เมื่อทำการพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.3 ประกอบ

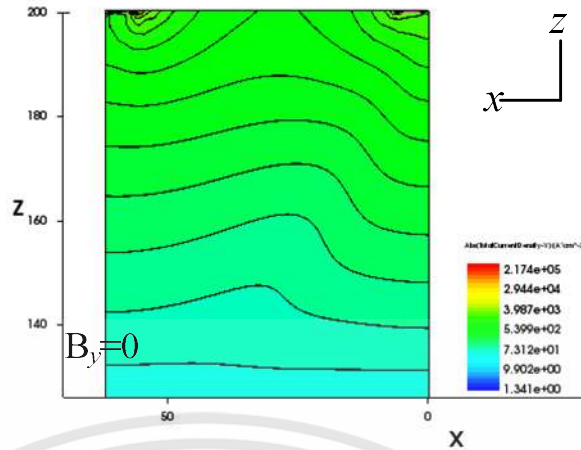


รูปที่ 4.31 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองแตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

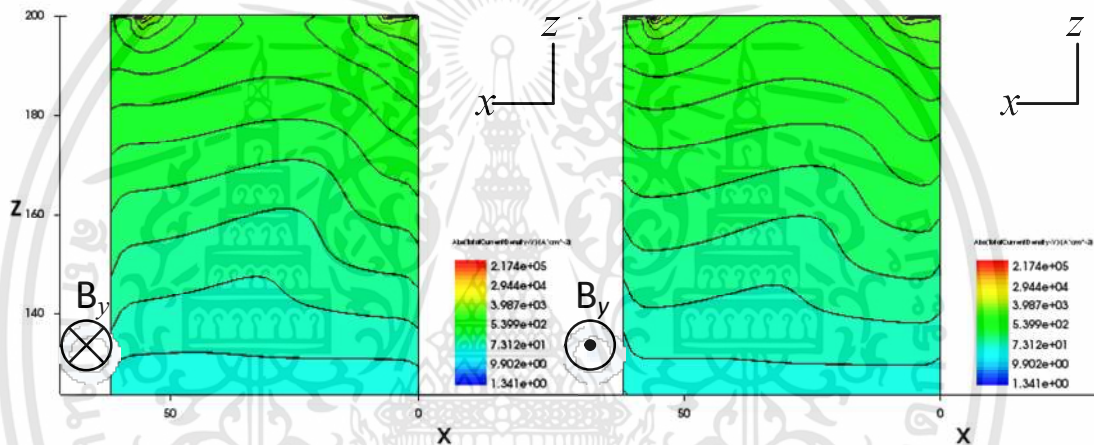
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนด้านขนาดความกว้างน้อยกว่าความยาว ด้วยกระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

Magnetic field (T)	W/L < 1 (5/50)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	R[B] (Ω)	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)	R[B] (Ω)	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)
0.5	870965.50	-4835.02	-0.5520	382.70035	0.106016	0.027709
0.4	871913.70	-3886.83	-0.4438	382.66227	0.067929	0.017754
0.3	872871.31	-2929.22	-0.3344	382.63262	0.038278	0.010005
0.2	873838.32	-1962.20	-0.2240	382.61141	0.017071	0.004461
0.1	874814.73	-985.794	-0.1125	382.59865	0.004311	0.001126
0	875800.53	0	0	382.59434	0	0
-0.1	876795.77	995.2438	0.1136	382.59848	0.004138	0.001081
-0.2	877800.45	1999.921	0.2283	382.61106	0.016726	0.004371
-0.3	878814.53	3014.002	0.3441	382.63210	0.037759	0.009869
-0.4	879837.98	4037.456	0.4610	382.66157	0.067234	0.017573
-0.5	880870.78	5070.253	0.5789	382.69948	0.105144	0.027481

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

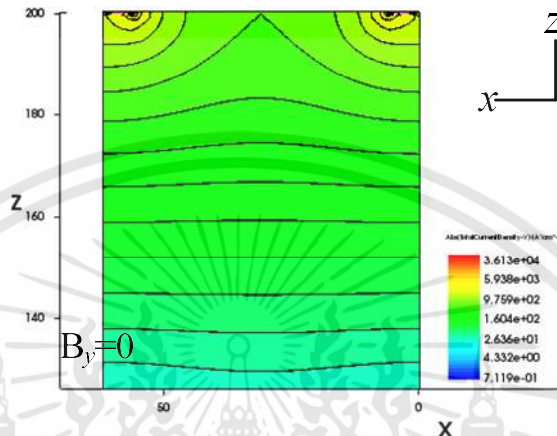
(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.32 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโทริซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm⁻³) ด้วยความกว้าง 5 ไมโครเมตรและความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1$ mA , $B = 0.5$ T

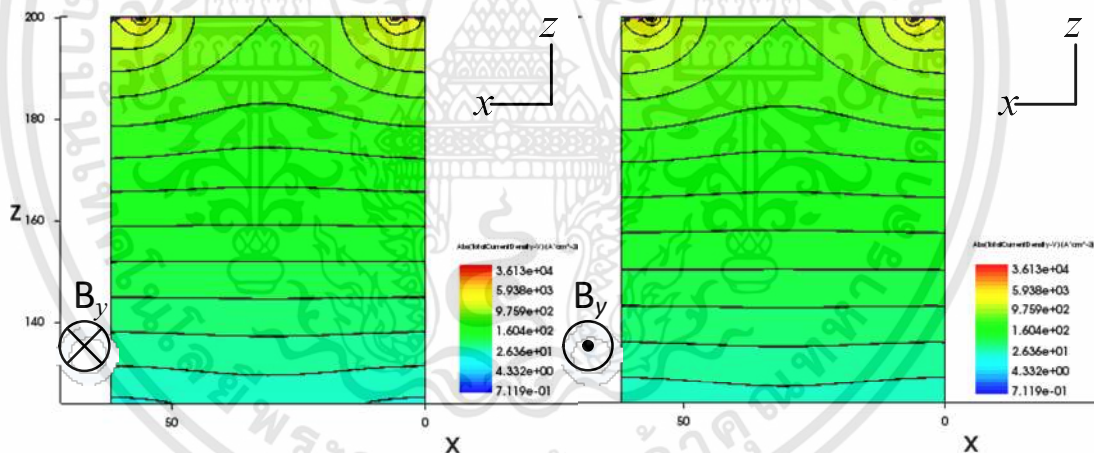
โดยจากในรูปภาพที่ 4.32 รวมทั้งในรูปภาพที่ 4.33 จะเป็นภาพส่วนตัดขวางซึ่งแสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสของรูปทรงตัวอุปกรณ์แมกนีโทริซิสเตอร์ที่มีขนาดรูปทรงที่ยาว ($W/L < 1$) ซึ่งเราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้ว่าความหนาแน่นกระแสจะมีลักษณะของการกระจายตัวสม่ำเสมอเล็กน้อยลงในตำแหน่งบริเวณพื้นที่ด้านล่างฐานรองของตัวอุปกรณ์ โดยระยะของความลึกที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปดังกล่าวนี้อยู่ที่ค่าประมาณ 80 ไมโครเมตร จากพื้นผิวที่ความหนาแน่นกระแสมีความสม่ำเสมอทั้งพื้นที่กับในตำแหน่งบริเวณพื้นที่ซึ่งไม่มีการแออัดของความหนาแน่นกระแสด้วยผลที่ปรากฏขึ้นในกรณีที่รูปทรงของตัวอุปกรณ์มีขนาดรูปทรงยาว ($W/L < 1$) การตอบสนองต่อขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กแวนอนดังกล่าวนี้นี้สามารถอธิบายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกลไกการของความไม่สมดุลของแรงในทิศทางแนวดิ่ง ซึ่งก็เหมือนกับในกรณีที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ โดยแรงลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ก็ยังคงมีค่าที่มากกว่าแรงไฟฟ้าฮอลล์ ($F_L > F_H$) จากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าฮอลล์ ทั้งในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y ในกรณีที่ฐานรองของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำนั่นเอง



(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

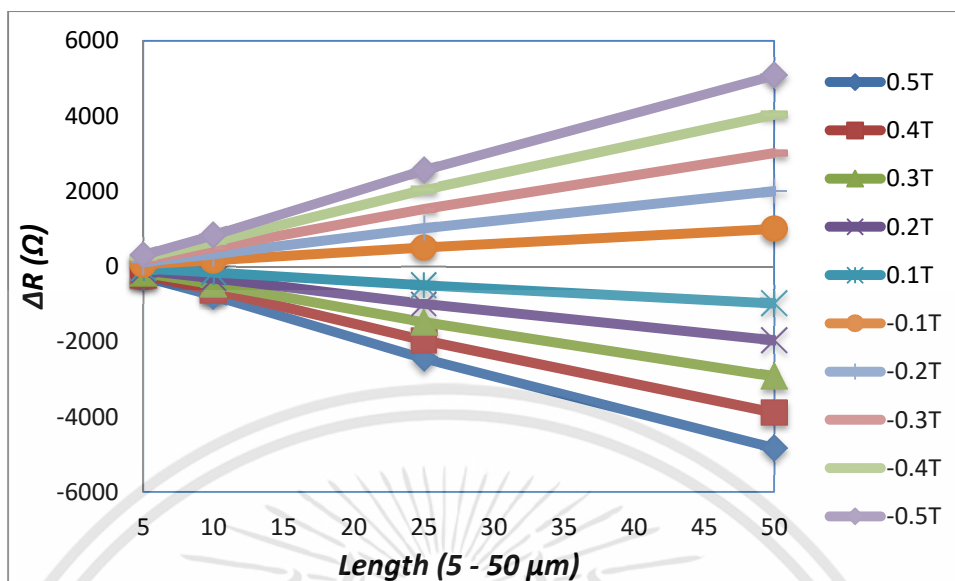


(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.33 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm $^{-3}$) ด้วยความกว้าง 5 ไมโครเมตรและความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1$ mA , $B = 0.5$ T

ดังนั้นเมื่อเราทำการนำผลตอบสนองจากการจำลองแบบและการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดที่ได้จากการตอบสนองต่อความเข้มข้นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในระดับความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่าขนาดของระยะห่างหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตรซิสเตอร์ ที่มีรูปร่างตรงด้านความยาวมีค่าแตกต่างกัน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ความยาวระหว่างขั้วกระแส (CC1-CC2) ทั้งสองที่แตกต่างกันออกไป (L5 - L50) ของฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตรซิสเตอร์นั้น ก็จะทำให้ได้รูปกราฟดังที่ได้แสดงตามรูปที่ 4.34 ซึ่งหากพิจารณาจากลักษณะเส้นของรูปกราฟดังกล่าวนี้เป็นการแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทาน ($R(B)$), ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรซิสเตอร์ เมื่อขนาดทางด้านความยาวหรือค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองของอุปกรณ์มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เราสามารถที่จะสรุปผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนหรือขนานกับพื้นผิวอุปกรณ์ได้ว่าค่าที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในโหมดการเบี่ยงเบนของกระแสในทิศทางแนวตั้งของอุปกรณ์ดังกล่าวนี้นอกจากที่จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ ($10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) แล้วนั้นควรเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะมิติรูปทรงที่ยาวหรือมีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองที่มากอีกด้วย (L50W5) เนื่องจากว่าให้ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าในกรณีที่ตัวอุปกรณ์มีลักษณะมิติรูปทรงที่สั้นหรือมีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองที่น้อย (L5W5) ทั้งในด้านของค่าความต้านทาน ($R(B)$) และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรซิสเตอร์ โดยผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวมานี้จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 880 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน, และค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง ส่วนค่าประมาณ 0.57 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรซิสแตนซ์ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา นอกจากนี้แล้วจากผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวสรุปมาในเบื้องต้นนี้ก็ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการหลักที่ 4.5 อีกด้วย จะเห็นได้จากพารามิเตอร์ $L \propto \Delta R$ ที่เป็นลักษณะของการแปรผันตรงต่อกัน กล่าวคือ ด้วยการพิจารณาเลือกใช้ฐานรองของตัวอุปกรณ์ให้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ต่ำแล้วจึงทำให้มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่สูงส่งผลทำให้เกิดค่าความต้านทาน ($R[B]$) ที่มากขึ้นด้วยแล้วนั้น แต่ถ้าหากได้กระทำการปรับเปลี่ยนในส่วนของพารามิเตอร์ด้านความยาวด้วยแนวโน้มในทิศทางที่เพิ่มมากขึ้นแล้วก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อทั้งค่าความต้านทาน ($R[B]$) และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ตลอดจนเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นด้วยลักษณะที่เป็นการเสริมเพิ่มมากขึ้นอีกนั่นเอง

4.2.4 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ในกรณีที่มีอัตราส่วนของขนาดมิติรูปทรงแตกต่างกัน ($W/L = 1$)



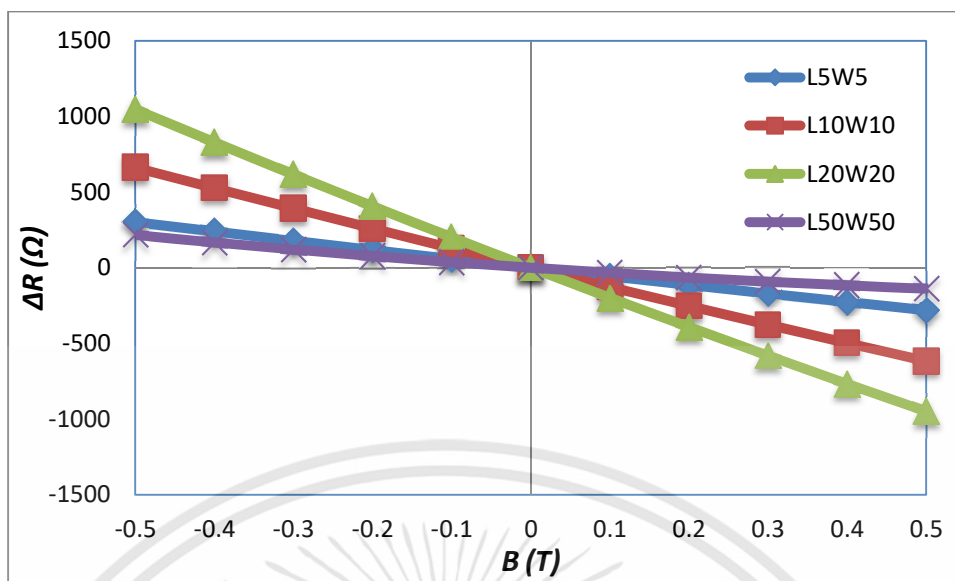
รูปที่ 4.35 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่มีอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีที่มีค่าอัตราส่วนทางด้านขนาดมิติรูปทรงที่แตกต่างกันออกไปนั้น โดยเป็นการดำเนินการจำลองแบบด้วยการให้ฐานรองของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับที่ต่ำ ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) และที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับที่สูง ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ด้วย ซึ่งเราก็คงจะใช้มิติรูปทรงเบื้องต้นดังแสดงในรูปที่ 3.27 โดยการกำหนดให้ขนาดของความลึกมีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเมตร ส่วนขนาดของระยะห่างเริ่มต้นระหว่างขั้วกระแสไป้อัสทั้งสอง (ขั้ว CC1-CC2) จะมีค่าระยะห่าง (L) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร และในส่วนของค่าขนาดด้านความกว้างของขั้วกระแสไป้อัสก็จะมีค่าความกว้าง (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร เช่นเดียวกัน ซึ่งในส่วนของพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ นั่นก็คือ W และ L จะเป็นพารามิเตอร์หลักในการจำลองแบบด้านมิติระนาบของรูปทรงที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการแสดงถึงอัตราส่วนทางด้านมิติรูปทรงหรือโครงสร้างอุปกรณ์ (W/L) ที่แตกต่างกันออกไป สำหรับในการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทิศทางแนวนอนจากการศึกษาออกแบบมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ในครั้งนี้นั่นเอง ลำดับต่อจากนั้นเราก็จะดำเนินการเพิ่มในส่วนของขนาดอัตราส่วนทางด้านมิติรูปทรงอุปกรณ์ (W/L) ดังกล่าวขึ้นไปจนถึงค่าขนาดความกว้างของขั้วกระแสไป้อัสทั้งสอง (W) กับค่าขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไป้อัสทั้งสอง (L) ให้เท่ากับ 50 ไมโครเมตร หรือที่เรียกว่าพารามิเตอร์อัตราส่วนรูปทรง ซึ่งในการจำลองแบบของพารามิเตอร์ดังกล่าวจะแสดงอยู่ในรูปแบบสัญลักษณ์อย่างย่อประกอบไปด้วย (L5W5, L10W10, L20W20, L50W50) หรือสามารถกล่าวในอีกลักษณะว่าเป็นการปรับเปลี่ยนค่าทางด้านกว้างและยาว ($W/L = 1$) ด้วยขนาดที่เท่ากันตลอด สำหรับที่ใช้ในการจำลองแบบในกรณีดังกล่าวนี้ ซึ่งการจำลองแบบยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขการไป้อัสกระแสคงที่ขนาดเท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 รวมทั้งระดับความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านตัวอุปกรณ์ก็ยังคงมีค่าตั้งแต่ 0 เทสลา ไปจนถึงค่าเท่ากับ 0.5 เทสลา ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y ดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.35 ส่วนผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.36 และ 4.38 ส่วนผลตอบสนองที่อยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่ได้จากการจำลองแบบก็จะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.37 และ 4.39 ตามลำดับ

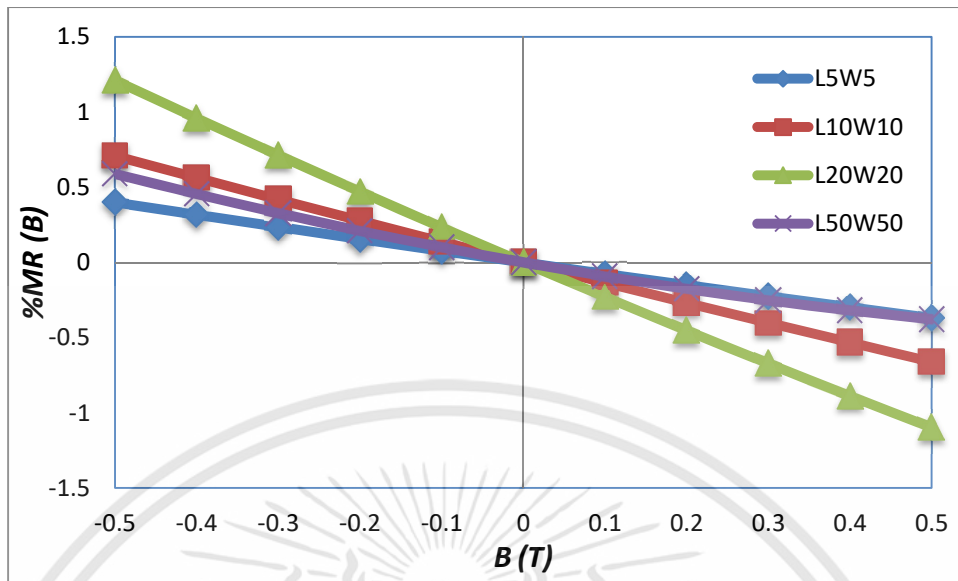
จากผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีที่มีการปรับอัตราส่วนทางด้านมิติรูปทรงด้านความกว้างพร้อมด้านความยาวตั้งแต่ค่า 5 ไมโครเมตรเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่า 50 ไมโครเมตร หรือเรียกว่า เป็นกรณีที่โครงสร้างของตัวอุปกรณ์มีรูปทรงขนาดใหญ่ ($W/L = 1$; L50W50) ที่ฐานรองอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ เมื่อทำการพิจารณาจากรูปกราฟที่ 4.36 และ 4.37 จะแสดงให้เห็นว่ามีผลตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นกับขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กเหมือนกันกับในการศึกษาของทั้ง 3 กรณีที่ผ่านมา หากเราได้ทำการสังเกตจากข้อมูลตัวเลขที่อยู่ในตารางที่ 4.4 ประกอบการพิจารณาด้วยซึ่งแสดงถึงค่าตอบสนองของค่าความต้านทาน (R/B), ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ เมื่อทำการพิจารณาผลตอบสนองใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดที่แตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไป้อัส 1 มิลลิแอมป์

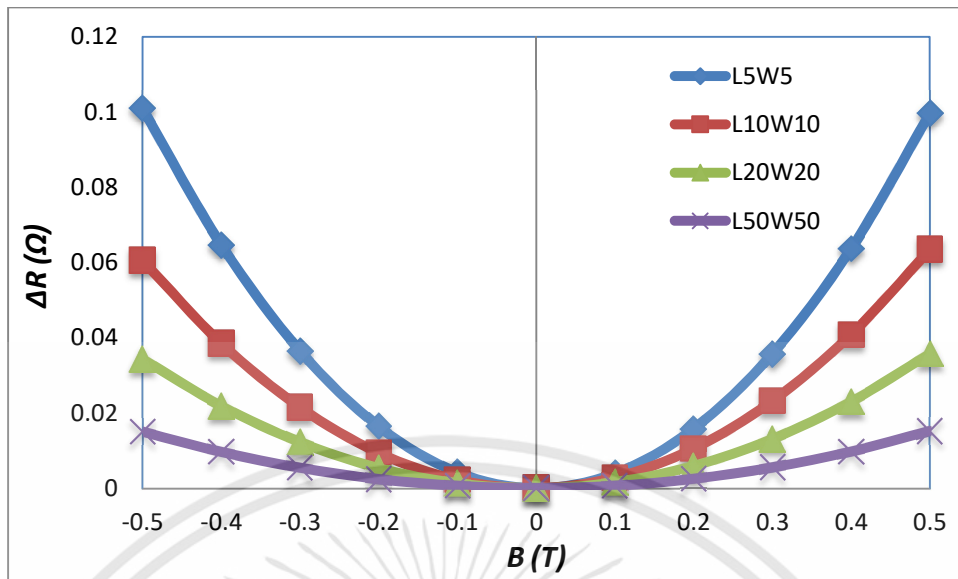
ด้านของค่าความต้านทานซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 75 - 87 กิโลโอห์ม จากการดำเนินงานปรับเพิ่มในส่วนของอัตราส่วนทางด้านขนาดมิติรูปทรงอุปกรณ์ (W/L) จากที่ค่าด้านกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นจนถึงค่าเท่ากับ 20 ไมโครเมตร ทำให้เราทราบว่าในช่วงของการปรับเพิ่มขึ้นในด้านอัตราส่วนทางขนาดของมิติรูปทรงอุปกรณ์ระหว่างช่วงดังกล่าวนี้จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากนั้นหากพิจารณาผลลัพธ์ที่อยู่ในลักษณะของรูปกราฟที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.36 และ 4.37 จะเห็นได้ว่ามีผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) ที่เกิดขึ้นของตัวอุปกรณ์ดังกล่าว โดยที่ค่าตอบสนองจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 301 โอห์ม - 1 กิโลโอห์ม และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ($\%MR(B)$) ก็อยู่ในช่วงระหว่างค่าประมาณ 0.39 - 1.21 เปอร์เซ็นต์ จากการที่เราได้กระทำการเพิ่มขนาดมิติรูปทรงขึ้นไปของตัวอุปกรณ์จากค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ถึงค่า 20 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ($\%MR(B)$) ก็ยังคงมีผลตอบสนองในลักษณะเช่นเดียวกับของค่าความต้านทานที่ผ่านมาก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นหากทำการเพิ่มขนาดของอัตราส่วนทางด้านขนาดมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ขึ้นไปอีกจากค่าเท่ากับ 20 ไมโครเมตร ถึงค่า 50 ไมโครเมตร กลับจะทำให้ผลตอบสนองของค่าความต้านทาน, ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีค่าที่ลดลงไปด้วย โดยที่ค่าตอบสนองจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 87 - 36 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน ส่วนค่าที่อยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 1 กิโลโอห์ม - 215 โอห์ม สำหรับความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง และค่าที่อยู่ในช่วงระหว่าง



รูปที่ 4.37 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดที่แตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

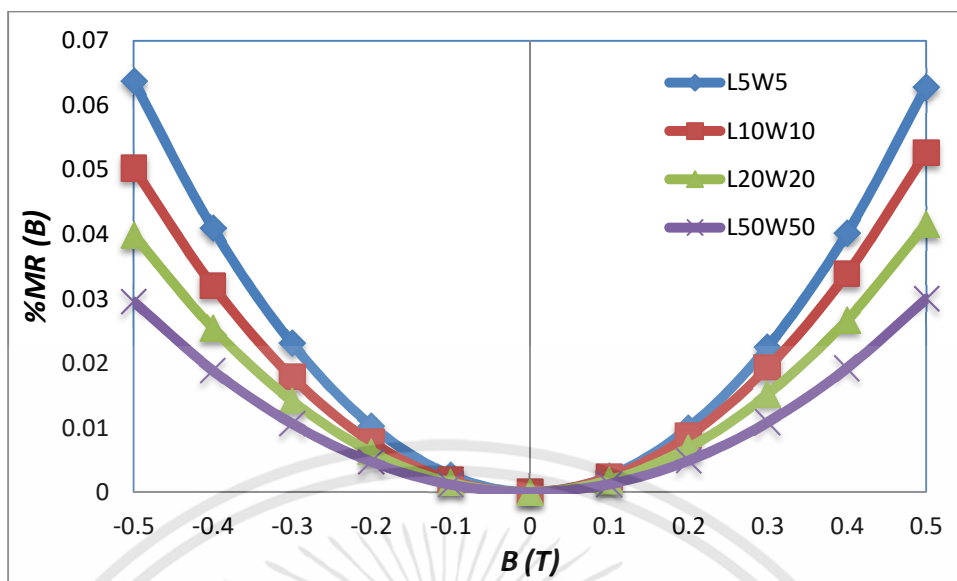
ประมาณ 1.21 – 0.58 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา ซึ่งค่าดังกล่าวนี้เหมือนกับในกรณีที่รูปทรงของตัวอุปกรณ์มีขนาดรูปทรงยาว ($W/L < 1$) นอกจากนี้แล้วการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ΔR) จะเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญถึงแม้ว่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ($\%MR(B)$) จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักก็ตาม ตลอดจนทำให้เราได้ทราบแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ($\%MR(B)$) ของตัวอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับการเพิ่มของอัตราส่วนทางมิติรูปทรงด้านกว้างพร้อมทั้งด้านยาวของตัวอุปกรณ์จนถึงค่าหนึ่ง (L5W5 – L20W20) หรือสามารถที่จะกล่าวได้ในอีกลักษณะที่ว่าค่า ΔR และ $\%MR(B)$ ของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีรูปทรงขนาดใหญ่ (L20W20) นั้นจะตอบสนองได้ดีกว่าตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีรูปทรงขนาดเล็ก (L5W5) กว่านั้นเอง ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทบบั้วตัวอุปกรณ์ดังกล่าว โดยกลไกดังกล่าวนี้เองก็เหมือนกับที่เคยได้ทำการกล่าวอธิบายมาก่อนหน้านี้ในช่วงกรณีที่ผ่านมามาตอนต้นว่าแรงลอเรนซ์มีค่าที่มากกว่าแรงไฟฟ้าฮอลล์ ($F_L > F_H$) ทั้งในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และ y เป็นต้น

ในส่วนกรณีที่ฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงนั้น ผลการตอบสนองดังที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปกราฟที่ 4.38 และ 4.39 นั้นหากทำการพิจารณาจะเห็น



รูปที่ 4.38 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดที่แตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ได้ว่าเป็นการที่ไม่ตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่ไม่เชิงเส้นต่อขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงเมื่อทำการพิจารณาถึงข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 4.4 ประกอบจะพบได้ว่าค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยอย่างมากหรือแทบไม่เกิดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเลย แต่หากทำการสังเกตก็จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์บางอย่างเกี่ยวกับผลการตอบสนองของ ΔR และ $\%MR(B)$ ต่อการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนทางมิติรูปทรงด้านความกว้าง-ความยาว ($W/L = 1$) ซึ่งกล่าวได้ว่ามีลักษณะผลตอบสนองที่ต่างไปจากในกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ ผลลัพธ์ก็คือมีการตอบสนองที่ตรงข้ามกันนั่นเอง กล่าวคือ เมื่อได้ดำเนินการเพิ่มในส่วนของอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ด้านกว้าง-ยาวขึ้นไป (W/L) ก็จะส่งผลทำให้ค่า ΔR และ $\%MR(B)$ ของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีค่าลดลงตามไปด้วย หรือเรียกได้ว่าลักษณะดังกล่าวนี้เป็นความสัมพันธ์ที่แปรผกผันต่อกันของอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ด้านกว้าง-ยาวกับผลของค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์กรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงนั่นเอง ด้วยผลตอบสนองดังที่กล่าวมาก็จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 158 - 50 โอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน, ค่าในช่วงประมาณ 0.10 - 0.01 โอห์ม สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง และค่าในช่วงประมาณ 0.06 - 0.02 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ จากที่ได้ดำเนินการเพิ่มในส่วนของขนาดมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์ด้านกว้าง-ยาวขึ้นไปจากค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ไปจนถึงค่าเท่ากับ 50



รูปที่ 4.39 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดที่แตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

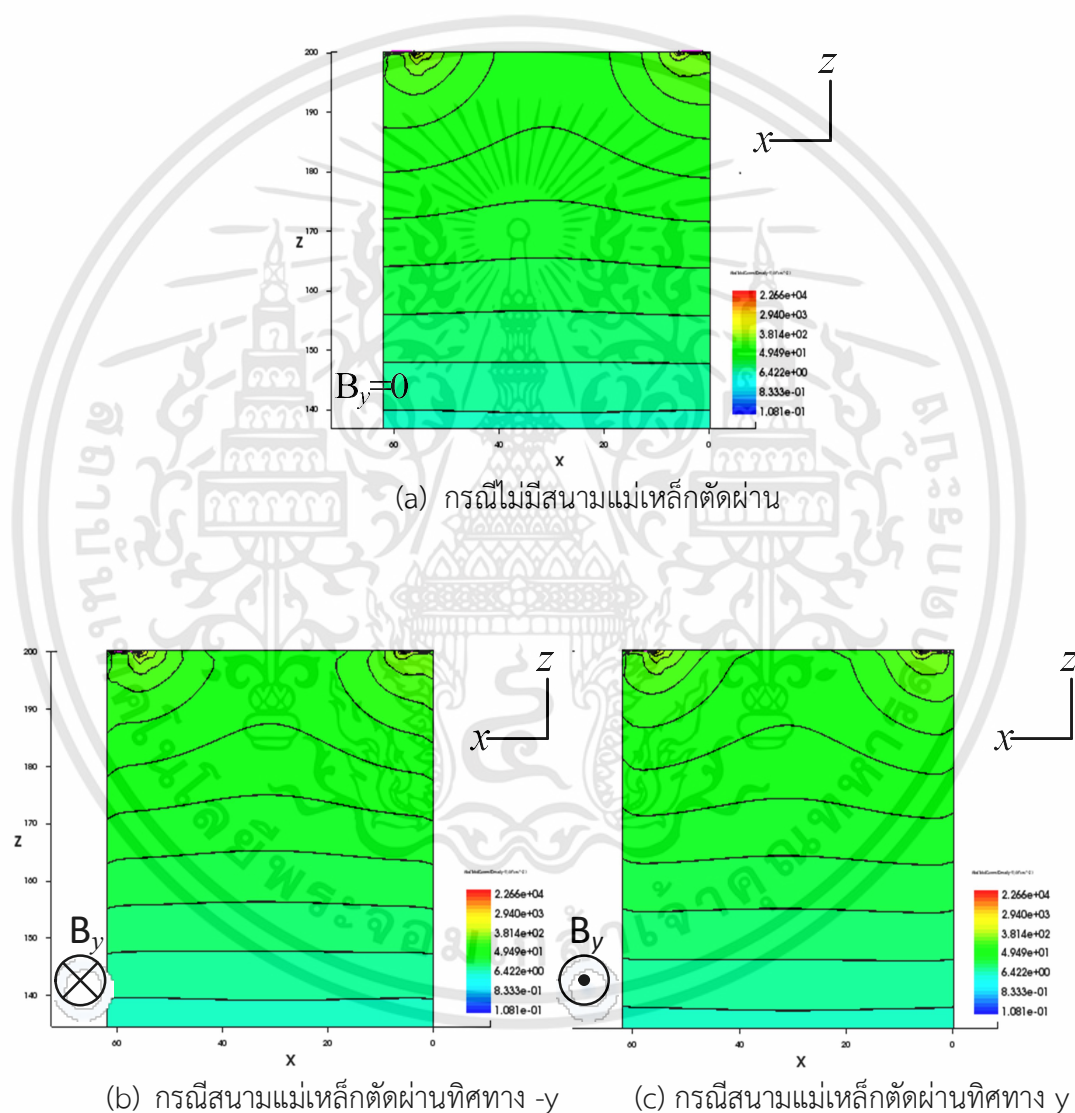
ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีที่อัตราส่วนรูปทรงมีขนาดแตกต่างกัน ด้วยกระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

Magnetic field (T)	W/L = 1 (50/50)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	R[B] (Ω)	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)	R[B] (Ω)	$\Delta R(\Omega)$	%MR(B)
0.5	36474.965	-138.347	-0.37786	50.719091	0.015177	0.029934
0.4	36496.496	-116.816	-0.31905	50.713644	0.009730	0.0191910
0.3	36521.085	-92.2280	-0.25189	50.709402	0.005488	0.0108246
0.2	36548.743	-64.5697	-0.17635	50.706366	0.002452	0.0048365
0.1	36579.483	-33.8301	-0.09239	50.704536	0.000622	0.0012280
0	36613.313	0	0	50.703914	0	0
-0.1	36650.241	36.92832	0.100860	50.704498	0.000584	0.0011522
-0.2	36690.273	76.96024	0.210197	50.706289	0.002375	0.0046848
-0.3	36733.412	120.0994	0.328021	50.709287	0.005372	0.0105967
-0.4	36779.660	166.3474	0.454335	50.713490	0.009576	0.0188864
-0.5	36829.017	215.7039	0.589140	50.718898	0.014984	0.0295520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร (L5W5 - L50W50) ที่ปริมาณกระแสไอส์ 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา

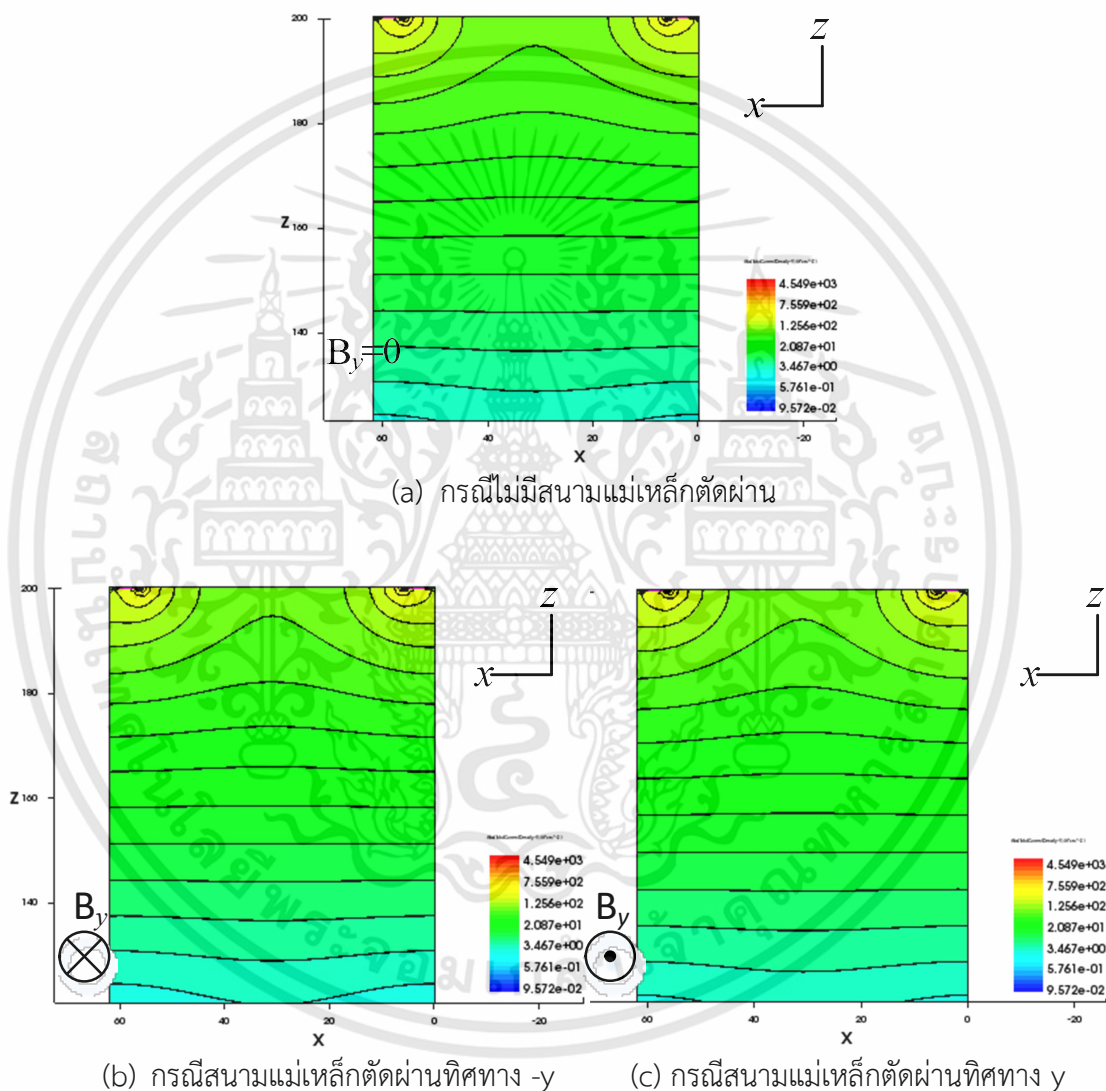
นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถที่จะพิจารณาได้จากในรูปภาพที่ 4.40 รวมทั้งในรูปภาพที่ 4.41 มาประกอบร่วมกัน ซึ่งจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงภาพส่วนตัวขวางของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่แสดงให้เห็นถึงรูปแบบลักษณะพฤติกรรมการกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวในด้านพารามิเตอร์หรือตัวแปรด้านมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีรูปทรงขนาดใหญ่ ($W/L = 1$; L50W50) ได้อีกด้วย โดยสามารถที่จะใช้วิธีอย่างง่ายในเบื้องต้นดังนี้



รูปที่ 4.40 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตรและความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เคยกล่าวเอาไว้แล้วในช่วงตอนต้นของการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในกรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกันดังกล่าวเพื่อมาช่วยประกอบในการพิจารณาเป็นการใช้วิธีด้วยการสังเกตจากเส้นที่อยู่ในแนวนอนหรือที่อยู่ตามทิศทางเดียวกับแนวแกน x พร้อมทั้งการพิจารณาจากรูปแบบลักษณะของระดับปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยต่างๆที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.40 ตลอดจนในรูปที่ 4.41 ดังกล่าวนี้ด้วย ซึ่งเส้นทึบในแนวนอนดังกล่าวนี้ก็จะเป็นการบ่งบอกเพื่อให้เราได้ทราบถึงลักษณะแนวโน้มและทิศทางในการกระจายตัวของ

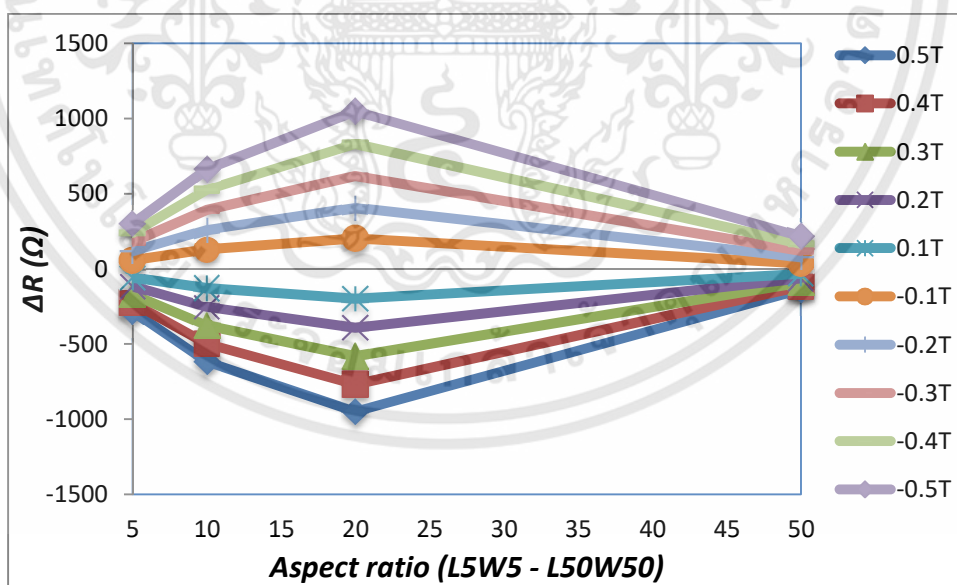


รูปที่ 4.41 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้าง 50 ไมโครเมตรและความยาว 50 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1$ mA , $B = 0.5$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายตัวของอุปกรณ์ ส่วนในด้านที่แสดงด้วยรูปแบบลักษณะของระดับปริมาณความเข้มเฉลี่ยต่างๆที่เป็นสีเส้นหลากหลายนั้นก็จะเป็นการบ่งบอกเพื่อให้เราได้ทราบถึงระดับความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั่นเอง เมื่อทำพิจารณาจากผลตอบสนองที่ปรากฏขึ้นซึ่งได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปภาพตัดขวางของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวแล้วนั้น ก็จะสังเกตเห็นได้ว่าในกรณีที่ฐานรองอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำดังในรูปที่ 4.40 จะสังเกตเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เบี่ยงเบนเกิดขึ้นของเส้นแสดงทิศทางในกระจายตัวของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายตัวของอุปกรณ์ต่อปริมาณความเข้มรวมทั้งทิศทางแนวอนของสนามแม่เหล็กดังกล่าวที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และ y ดังในรูปที่ 4.40(b) และในรูปที่ 4.40(c) ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ที่ตำแหน่งบริเวณขอบด้านข้างทางซ้ายและขวาของตัวอุปกรณ์ เมื่อเราได้ทำการเปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ดังในรูปที่ 4.40(a) ในขณะที่หากทำการพิจารณากรณีที่ฐานรองอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูงนั้นก็จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์เลย ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.41

ดังนั้นจากผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดเมื่อเราดำเนินการนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่าการปรับเปลี่ยนตัวแปรด้านอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ในด้านความกว้างต่อความยาว (W/L) ที่แตกต่างกันออกไปของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยพารามิเตอร์หลักของ



รูปที่ 4.42 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีอัตราส่วนรูปทรงทางขนาดมีค่าแตกต่างกัน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

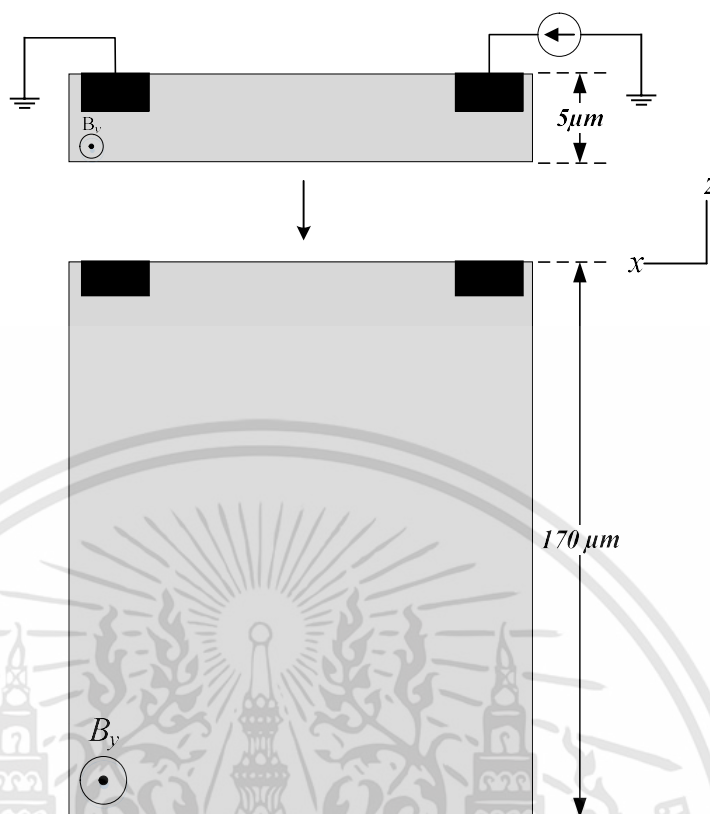
อัตราส่วนรูปทรงที่ใช้ในการจำลองแบบของกรณีดังกล่าวนี้ก็จะประกอบไปด้วยสัดส่วนทางด้านความกว้างต่อความยาวที่เท่ากันโดยตลอด ($W/L=1$; L5W5,L10W10,L20W20,L50W50) นั้น ก็จะทำให้ได้กราฟที่มีผลลัพธ์ตามลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.42 ซึ่งจากในรูปกราฟดังกล่าวนี้เองได้แสดงให้เห็น เราได้ทราบถึงแนวโน้มของผลตอบสนองด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอัตราส่วนทางมิติรูปทรงอุปกรณ์ในสัดส่วนที่เท่ากัน ($W/L = 1$) โดยตลอด หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งเพื่อให้เข้าใจได้ว่าตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวมีขนาดที่เพิ่มมากขึ้น จากตัวเล็ก (L5W5) เพิ่มขนาดขึ้นไปจนกระทั่งเป็นตัวใหญ่ (L50W50) ด้วยสัดส่วนที่เท่ากันนั่นเอง หากสังเกตการเพิ่มขนาดขึ้นไปของอัตราส่วนรูปทรงจาก L5W5 - L20W20 ผลตอบสนองก็จะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลตอบสนองดังกล่าวจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 75-87 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทาน ($R[B]$), ค่าอยู่ในช่วงประมาณ 301 โอห์ม - 1 กิโลโอห์ม สำหรับค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.39-1.21 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) จากนั้นผลตอบสนองก็จะมีแนวโน้มในลักษณะที่ลดลงหากทำการเพิ่มขนาดอัตราส่วนรูปทรงของอุปกรณ์ขึ้นไปจาก L20W20 - L50W50 โดยค่าความต้านทาน, ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 36 กิโลโอห์ม, 215 โอห์ม และ 0.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์ และระดับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา นอกจากนี้แล้วจากผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวสรุปมาในเบื้องต้นนี้ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการหลักที่ 4.5 อีกด้วย จะเห็นได้จากพารามิเตอร์ $W/L \propto \Delta R$ ที่เป็นลักษณะของการแปรผันตรงต่อกัน กล่าวคือ ด้วยการเลือกพิจารณาใช้ฐานรองของตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำแล้วจึงทำให้มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่สูงและส่งผลทำให้เกิดค่าความต้านทาน ($R[B]$) ที่มากขึ้นไปด้วยแล้วนั้น แต่เมื่อเราได้กระทำการปรับเปลี่ยนในส่วนของพารามิเตอร์ด้านความกว้างและยาวด้วยสัดส่วนที่เท่ากันโดยตลอดในแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นแล้วก็จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อทั้งค่าความต้านทาน ($R[B]$) และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ตลอดจนเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นและลดน้อยลงนั่นเอง ด้วยลักษณะของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้เองสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยการอ้างอิงจากผลตอบสนองที่ปรากฏขึ้นจากการจำลองแบบที่ผ่านมาในกรณีที่อุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีค่าระยะของความกว้างที่แตกต่างกัน ($W/L > 1$) และในกรณีที่อุปกรณ์มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแส CC1 และขั้วกระแส CC2 ที่แตกต่างกัน ($W/L < 1$) จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้นของทั้ง 2 กรณี ทำให้เราทราบว่าเมื่อได้ทำการปรับค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทาน ($R[B]$) และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) มีค่าที่สูงขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งค่าที่อยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ก็ยังคงเพิ่มสูงขึ้นตามด้วยแต่จะเป็นในระดับปริมาณที่ไม่มากนัก ส่วนกรณีที่เมื่อได้ทำการปรับค่าระยะความกว้างของขั้วกระแสทั้งสอง (W) เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทาน ($R[B]$) และความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) กลับมีค่าที่ลดต่ำลงตามไปด้วย แต่ทางด้านของค่าที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแดนท์ (%MR(B)) ดังกล่าวนี้อาจทำให้ผลลัพธ์ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากแทน ซึ่งจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ด้านอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ในด้านความกว้างต่อความยาว (W/L) ที่เท่ากันโดยตลอด หากพิจารณาผลตอบสนองจากรูปที่ 4.42 จะเห็นได้ว่าในช่วงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ระหว่าง L5W5 ถึง L20W20 ผลตอบสนองจะมีลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) มีค่าที่มากกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าระยะความกว้างของขั้วกระแสทั้งสอง (W) ของอุปกรณ์นั่นเอง ในทางกลับกันผลลัพธ์ที่ได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) จะมีค่าที่น้อยกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าระยะความกว้างของขั้วกระแสทั้งสอง (W) ของอุปกรณ์เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ระหว่าง L20W20 ถึง L50W50 ทำให้ผลตอบสนองดังกล่าวจะมีลักษณะที่ลดน้อยลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ หรืออาจกล่าวได้ในอีกลักษณะที่ว่าอัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์ในด้านความกว้างต่อความยาว (W/L) ที่ L20W20 เป็นค่า optimization มากที่สุดจากในช่วงของการจำลองแบบด้านพารามิเตอร์อัตราส่วนทางขนาดมิติรูปทรงของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่ด้านกว้างและยาวอยู่ในช่วงระหว่างค่าเท่ากับ L5W5 ถึง L50W50 นั่นเอง

4.2.5 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในกรณีที่ตัวอุปกรณ์มีค่าระยะของความลึกที่แตกต่างกัน

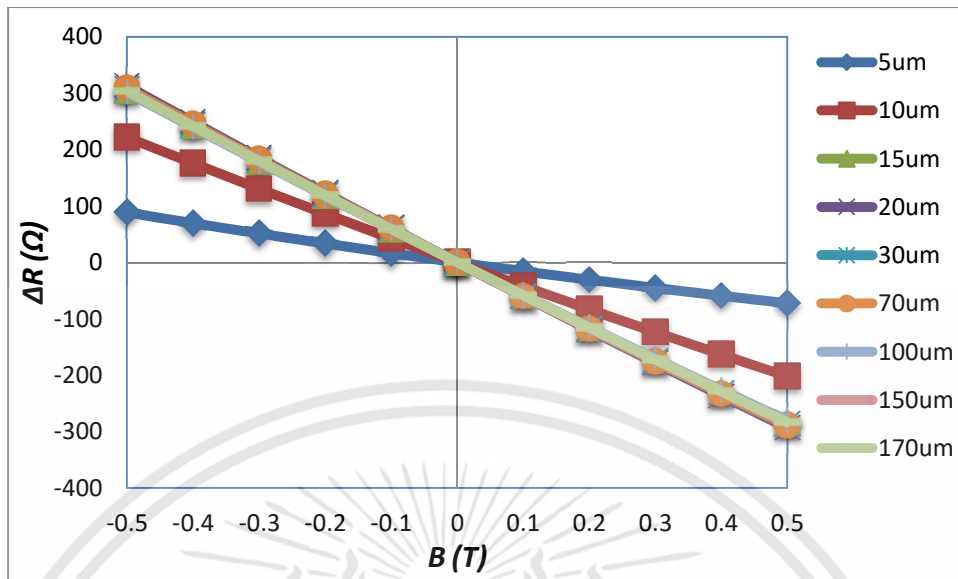
ในส่วนการจำลองแบบเพื่อต้องการทราบถึงผลตอบสนองต่อความเข้มข้นทั้งทิศทางในแนวอนของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ โดยที่ตัวอุปกรณ์ดังกล่าวมีขนาดของค่าระยะความลึกที่แตกต่างกันออกไปนั้น ซึ่งในกรณีพารามิเตอร์ด้านค่าระยะความลึกของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เรากำหนดให้มีมิติรูปทรงตัวอุปกรณ์มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) และความกว้างของขั้วกระแส (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่วนในด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) เป็น 7 ไมโครเมตร และด้านความยาวของตัวอุปกรณ์ (L_d) เป็น 17 ไมโครเมตร การจำลองแบบเป็นการดำเนินงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการไปอัสกระแสคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 ของตัวอุปกรณ์ ซึ่งเป็นการจำลองแบบด้วยระดับขนาดความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 เทสลา ไปจนถึง 0.5 เทสลา ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y ตามลำดับ โดยที่ตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ถูกกำหนดให้มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองทั้งในระดับต่ำ ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) และในระดับสูง ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ด้วย พร้อมกับเริ่มดำเนินการจำลองแบบที่ขนาดของระยะความลึก (T) ตั้งแต่ค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นไปจนถึงขนาดของระยะความลึกที่ค่าเท่ากับ 170 ไมโครเมตร ดังแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.43 ประกอบ



รูปที่ 4.43 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์
กรณีฐานรองอุปกรณ์มีค่าระยะความลึกที่แตกต่างกัน

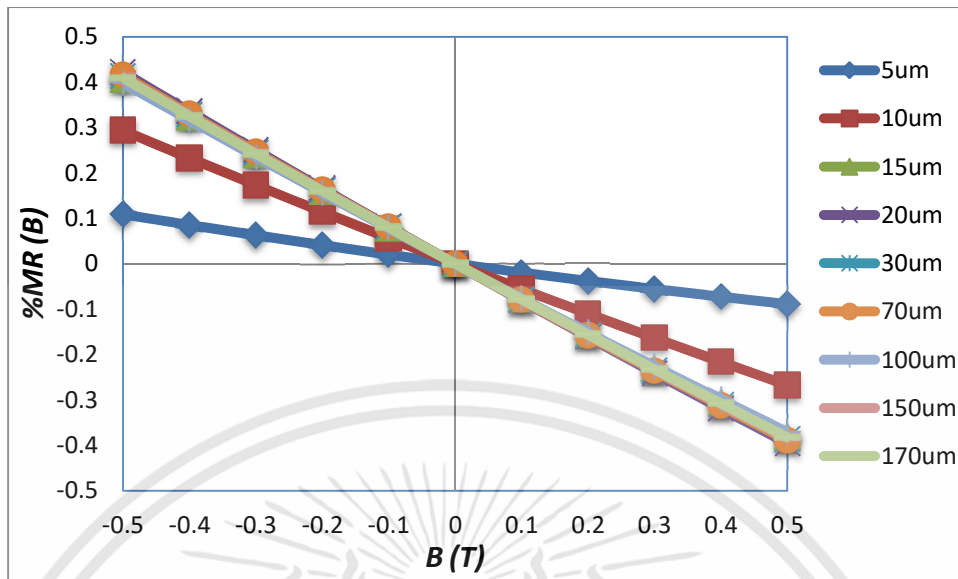
ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อปริมาณความเข้มและทิศทางในแนวขนานของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวของอุปกรณ์หรือในทิศทางตามแนวแกน y ด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ซึ่งฐานรองของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีขนาดของค่าระยะความลึกที่แตกต่างกันออกไปด้วยนั้น โดยลักษณะของผลการตอบสนองในรูปแบบของค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหรือค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ รวมทั้งผลตอบสนองที่อยู่ในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือที่เรียกว่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ดังกล่าวนี้ด้วย จะทำการแสดงให้เห็นเอาไว้อยู่ในรูปที่ 4.44 จนถึงในรูปที่ 4.47 ซึ่งเราสามารถที่จะสังเกตเห็นได้จากผลตอบสนองที่แสดงอยู่ในลักษณะของเส้นกราฟที่ปรากฏขึ้นของทั้งในรูปแบบของ ΔR และ $\%MR(B)$ ดังกล่าวได้ว่ามีผลตอบสนองปรากฏขึ้นด้วยลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวขนานที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำกับพื้นผิวอุปกรณ์ เมื่อฐานรองของตัวอุปกรณ์มีค่าความเข้มชั้นอะตอมสารเจือที่ต่ำและในทางตรงกันข้ามถ้าหากตัวอุปกรณ์มีฐานรองเป็นค่าความเข้มชั้นอะตอมสารเจือที่สูงก็จะมีผลตอบสนองปรากฏขึ้นแต่จะเป็นระดับปริมาณที่เล็กน้อยเป็นอย่างมากจนแทบไม่สามารถที่จะสังเกตเห็นได้หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่เกิดการตอบสนองขึ้นเลยเหมือนดังเช่นพารามิเตอร์ที่ผ่านมานั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะความลึกแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์กรณีที่มีการปรับพารามิเตอร์ทางมิติรูปทรงด้านความลึก (T) ตั้งแต่ค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นจนถึงค่าเท่ากับ 170 ไมโครเมตร ซึ่งพารามิเตอร์ทางด้านมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะประกอบไปด้วยการปรับเปลี่ยนความลึกที่อยู่ภายในช่วงต่างๆ ดังนี้ ($T = 5, 10, 15, 20, 30, 70, 100, 150, 170 \text{ } \mu\text{m}$) สำหรับที่ใช้ในการจำลองแบบกรณีดังกล่าวนี้เอง เมื่อทำการพิจารณาที่ฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ จากรูปกราฟที่ 4.44 และ 4.45 แสดงให้เห็นว่ามีผลตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับขนาดความเข้มข้นและทิศทางแนวนอนของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์เหมือนดังเช่นในการศึกษาของทั้ง 4 กรณีที่ผ่านมา โดยผลของค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้อยู่ในระดับปริมาณที่ไม่สูงมากนักหากทำการเปรียบเทียบกับทั้ง 4 กรณีที่ผ่านมา ซึ่งค่าความต้านทานจะอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 81 - 74 กิโลโอห์ม($k\Omega$) ส่งผลทำให้ช่วงค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลง (ΔR) และค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จึงมีผลตอบสนองไม่สูงตามไปด้วย โดยเราสามารถทำการสังเกตเห็นได้จากข้อมูลที่อยู่ในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาซึ่งเป็นตารางที่แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองที่เกิดขึ้นที่อยู่ในรูปแบบของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ หากพิจารณาจะเห็นได้ว่ามีผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ดังกล่าว

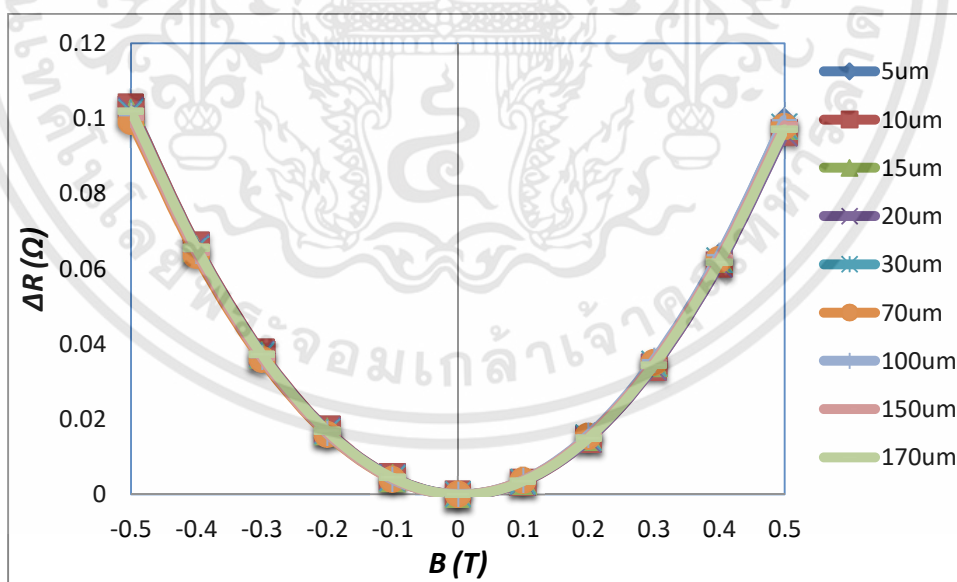


รูปที่ 4.45 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ของอุปกรณ์ กรณีที่ระยะความลึกแตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

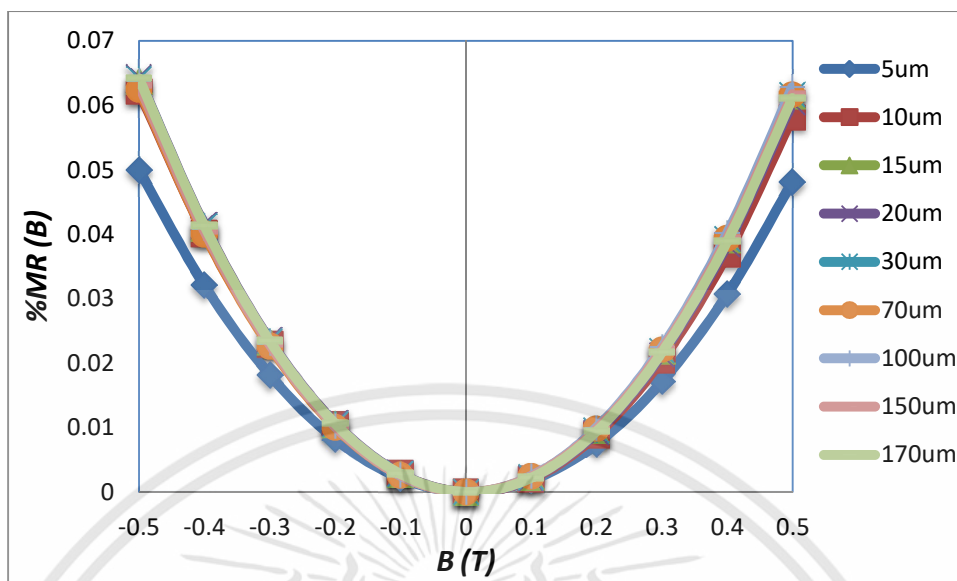
ซึ่งเกิดขึ้นโดยค่าจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 88 - 303 โอห์ม(Ω) และที่อยู่ในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) ก็อยู่ในช่วงระหว่างค่าประมาณ 0.10 - 0.40 เปอร์เซ็นต์ (%) เท่านั้น จากที่ได้ดำเนินการเพิ่มขนาดขึ้นไปของระยะความลึกตัวอุปกรณ์จากค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร จนถึงค่าเท่ากับ 170 ไมโครเมตร ที่กระแสไบอัสคงที่เท่ากับ 1 มิลลิแอมป์ และระดับปริมาณความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา ด้วยข้อมูลผลการจำลองแบบในกรณีที่ตัวอุปกรณ์มีค่าของระยะความลึกที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ทั้งข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของการแสดงผลที่เป็นรูปภาพรวมทั้งที่แสดงผลอยู่ในรูปแบบที่เป็นตารางข้อมูลก็ตาม ทำให้เราได้ทราบว่าตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นตัวต้านทานดังกล่าวที่มีลักษณะลักษณะนั้นแม้ว่าจะมีผลลัพธ์ของค่าความต้านทานเกิดขึ้นที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่เป็นตัวต้านทานที่มีลักษณะต้นแล้วนั้น แต่ถ้าหากพิจารณาในด้านของผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และของค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แล้วก็จะพบว่ากลับให้ผลลัพธ์ของการตอบสนองที่ตรงข้ามกัน กล่าวคือตัวอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างมีลักษณะลักษณะจะให้ผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลง (ΔR) รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) ที่สูงกว่าตัวต้านทานที่มีโครงสร้างลักษณะต้น ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเมื่อค่าปริมาณของระยะความลึกเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลทำให้มีขนาดพื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มากขึ้นตามไปด้วย หรืออาจมองได้ว่ามีพื้นที่สำหรับการให้พาหะประจุสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นนั่นเอง รวมไปถึงยังส่งผลทำให้เส้นทางการ

ไหลของกระแสมีโอกาที่จะเกิดการเบี่ยงเบนเพิ่มมากขึ้นไปด้วยจากแรงลอเรนซ์ที่เข้ามากกระทำอันเป็นสาเหตุทำให้กระแสสามารถเบี่ยงเบนไปยังตำแหน่งบริเวณพื้นที่ด้านล่างของฐานรองตัวอุปกรณ์ได้มากกว่าอีกด้วย ในขณะที่ตัวอุปกรณ์ที่มีค่าปริมาณของระยะความลึกซึ่งน้อยกว่านั้นหรืออาจเรียกว่าตัวอุปกรณ์ที่โครงสร้างมีลักษณะตื้นก็จะมีพื้นที่ซึ่งแคบกว่าส่งผลทำให้เส้นทางการไหลของกระแสจึงมีระยะของการเคลื่อนที่ซึ่งสั้นลงไป ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้เองทำให้โอกาสในการเกิดการเบี่ยงเบนของกระแสจึงลดน้อยลงตามไปด้วยจึงทำให้มีช่วงค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลง (ΔR) และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์มีผลลัพท์ที่ลดน้อยลงนั่นเอง

ในส่วนของฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงนั้น ผลการตอบสนองได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปกราฟที่ 4.46 และ 4.47 นั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่พบการตอบสนองต่อขนาดความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็กเหมือนดังเช่นในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ โดยสามารถทำการพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.5 และ 4.6 ประกอบการพิจารณาก็จะทำให้เราทราบได้ว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนซ์ของอุปกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยอย่างมากหรือกล่าวเอาไว้แล้วว่าไม่เกิดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเลยซึ่งค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์นั้นจะอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 206 – 159 โอห์ม ส่วนผลของค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลง (ΔR) ที่เกิดขึ้นโดยค่าจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 0.1030 – 0.1019 โอห์ม และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ก็ จะอยู่ในช่วงระหว่างค่าประมาณ 0.0499 – 0.0641 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น



รูปที่ 4.46 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีระยะความลึกที่แตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์



รูปที่ 4.47 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนซ์ของอุปกรณ์ กรณีสระยะความลึกที่แตกต่างกัน ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงกรณีอุปกรณ์มีระยะความลึกที่แตกต่างกัน ด้วยกระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ในฐานะรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

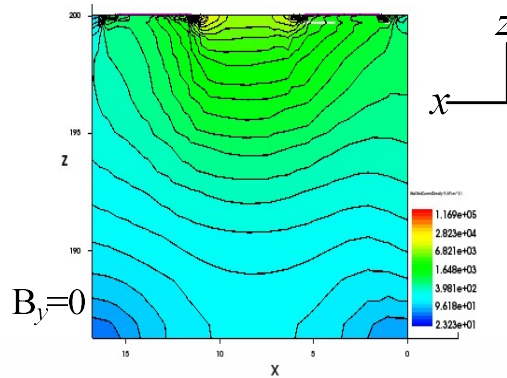
Magnetic field (T)	Resistance difference $\Delta R(\Omega)$ at $W/L = 1$ (5/5)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	$T = 5\mu\text{m}$	$T = 10\mu\text{m}$	$T = 15\mu\text{m}$	$T = 5\mu\text{m}$	$T = 10\mu\text{m}$	$T = 15\mu\text{m}$
0.5	-72.31578	-201.941	-284.296	0.0993874	0.096322	0.0980817
0.4	-59.09913	-163.138	-229.059	0.0633159	0.061122	0.0624869
0.3	-45.26181	-123.537	-173.002	0.0353379	0.033886	0.0348770
0.2	-30.80135	-83.1442	-116.134	0.0154576	0.014618	0.0152571
0.1	-15.71512	-41.9637	-58.4642	0.0036778	0.003322	0.0036308
0	0	0	0	0	0	0
-0.1	16.34992	42.74539	59.24937	0.0044240	0.004651	0.0043650
-0.2	33.41185	86.33066	119.2752	0.0169484	0.017274	0.0167246
-0.3	51.15328	130.7215	180.0693	0.0375703	0.037866	0.0370761
-0.4	69.55659	175.8954	241.6256	0.0662854	0.066423	0.0654151
-0.5	88.61621	221.8415	303.9385	0.1030878	0.102939	0.1017357

ตารางที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่กรณีอุปกรณ์มีระยะความลึกที่แตกต่างกัน ด้วยกระแสไบอัสคงที่ 1 มิลลิแอมป์ ที่ฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

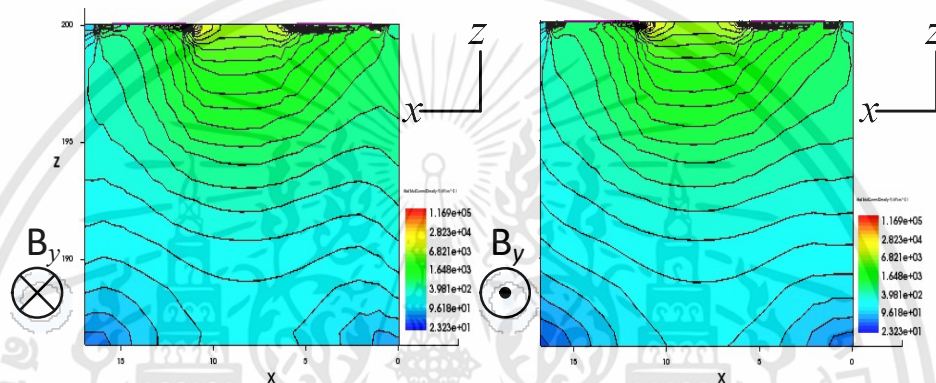
Magnetic field (T)	Percent of magnetoresistance %MR(B) at W/L = 1 (5/5)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	T= 5 μm	T= 10 μm	T= 15 μm	T= 5 μm	T= 10 μm	T= 15 μm
0.5	-0.088884	-0.26746	-0.379943	0.048128	0.058117	0.0613476
0.4	-0.072639	-0.21607	-0.306122	0.030660	0.036878	0.0390840
0.3	-0.055631	-0.16362	-0.231206	0.017112	0.020445	0.0218147
0.2	-0.037858	-0.11012	-0.155206	0.007485	0.008820	0.0095429
0.1	-0.019315	-0.05557	-0.078133	0.001780	0.002004	0.002271
0	0	0	0	0	0	0
-0.1	0.020095	0.056615	0.079182	0.002142	0.002806	0.0027302
-0.2	0.041066	0.114342	0.159403	0.008207	0.010422	0.0104608
-0.3	0.062873	0.173137	0.240650	0.018193	0.022847	0.0231902
-0.4	0.085492	0.232968	0.322916	0.032098	0.040077	0.0409155
-0.5	0.108919	0.293823	0.406192	0.049920	0.062110	0.0636331

นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถที่จะทำการพิจารณาเพิ่มเติมได้จากการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ได้อีกด้วย โดยกรณีพื้นฐานรองอุปกรณ์มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ได้ทำการแสดงเอาไว้อยู่ในรูปที่ 4.48 ส่วนในกรณีพื้นฐานรองอุปกรณ์มีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือในระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) นั้นก็จะทำการแสดงเอาไว้อยู่ในรูปที่ 4.49 ซึ่งจากทั้งในรูปภาพที่ 4.48 และในรูปภาพที่ 4.49 โดยเป็นภาพส่วนตัดขวางอุปกรณ์ที่แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการกระจายตัวของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวและมีทิศทางของตัวอุปกรณ์ถูกกำหนดให้มีขนาดระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง (L) และความกว้างของขั้วกระแส (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่วนในด้านความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) เป็น 7 ไมโครเมตร และด้านความยาวของตัวอุปกรณ์ (L_d) เป็น 17 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถที่จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในกรณีเป็นความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำจะพบกับลักษณะของการเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสเกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์จากเส้นที่อยู่ในแนวนอนหรือทิศทางตามแนวแกน x ที่แสดงถึงระดับการกระจายตัวของความหนาแน่นของกระแส โดยจะแตกต่างจากในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงที่แทบจะไม่พบการเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสเกิดขึ้นเลยรวมทั้งการกระจายตัวของความหนาแน่นของกระแสตรงตำแหน่งพื้นที่บริเวณใต้ขั้วไบอัสทั้งสองนั้น โดยที่ในความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำนั้นจะพบการกระจายตัวของความหนาแน่นของกระแสในลักษณะเป็นพื้นที่ซึ่งแคบมากกว่าในความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง รวมไปถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



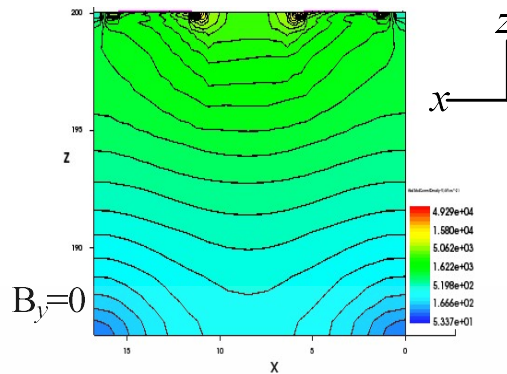
(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

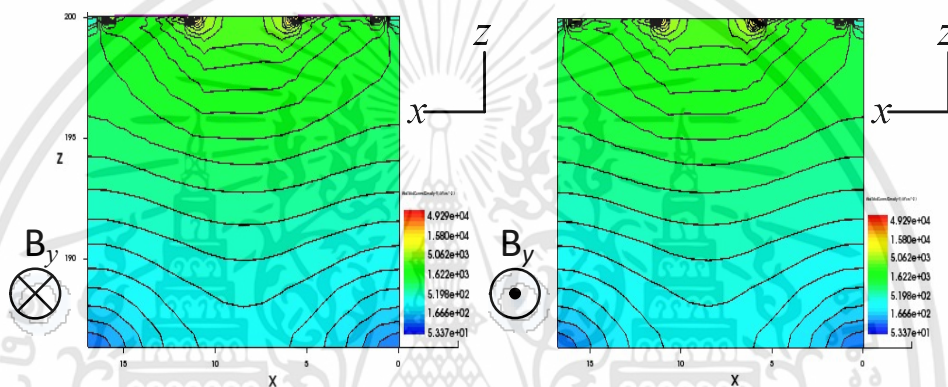
รูปที่ 4.48 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่วนระยะความลึกเท่ากับ 15 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

สามารถที่จะพิจารณาพร้อมกับในส่วนของระดับปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกันที่แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 4.48 ตลอดจนในรูปที่ 4.49 ดังกล่าวนี้ด้วย ซึ่งเส้นทึบในแนวนอนเป็นการบ่งบอกถึงแนวโน้มและทิศทางกระจายตัวของกระแสภายในตัวอุปกรณ์ ส่วนในด้านของการไล่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันที่บ่งบอกให้ทราบถึงระดับความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณีดังกล่าวก็จะเห็นได้ว่าในภาพรวมส่วนใหญ่แล้วระดับปริมาณความเข้มข้นจะอยู่ในโซนที่เป็นสีเขียว(ความหนาแน่นของกระแสระดับปานกลาง)-สีฟ้า(ความหนาแน่นของกระแสระดับต่ำ) ทั้งในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กและกรณีที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์อันมีลักษณะที่คล้ายกันทั้งสองกรณีเลย แต่เพียงว่าในกรณีที่ฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ จะสังเกตเห็นจากเส้นที่อยู่ในแนวนอนหรือทิศทางตามแนวแกน x จะปรากฏลักษณะของการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นที่มากกว่าในกรณีที่ฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง ส่งผลทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแทนท์ที่มากกว่าด้วยนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



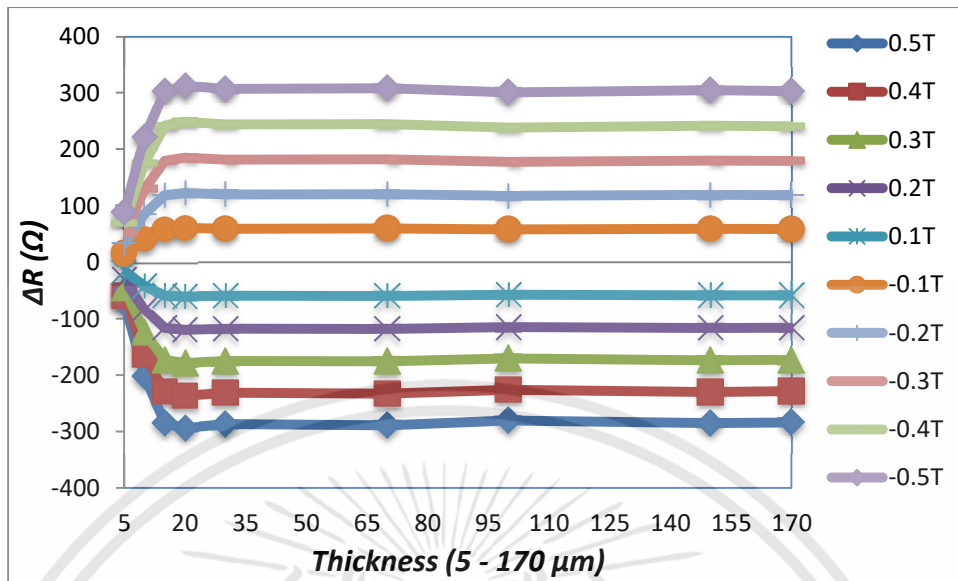
(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.49 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่วนระยะความลึกเท่ากับ 15 ไมโครเมตร ที่เงื่อนไข $I = 1 \text{ mA}$, $B = 0.5 \text{ T}$

ดังนั้นเมื่อเราดำเนินการนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือค่าแมกนีโตริซิสแทนท์ที่ระดับปริมาณความเข้มข้นแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่าของระยะความลึกของฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละระดับนั้นก็จะได้กราฟที่มีผลลัพธ์ตามลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.50 ซึ่งจากในรูปกราฟดังกล่าวนี้เองได้แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในลักษณะที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นต่อการเพิ่มขึ้นของระยะความลึกฐานรองตัวอุปกรณ์รวมทั้งต่อค่าปริมาณความเข้มข้นแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์อีกด้วย โดยช่วงในการเพิ่มขึ้นของค่าระยะความลึกฐานรองตัวอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมานี้จะอยู่ในช่วงระหว่างค่าระยะความลึกตั้งแต่ 5 ถึง 20 ไมโครเมตร หลังจากนั้นผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานก็จะมีแนวโน้มในลักษณะที่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่หรืออาจกล่าวได้ว่าผลตอบสนองดังกล่าวจะเข้าสู่สภาวะค่าอิ่มตัวคงที่ค่าหนึ่งเมื่อได้ทำการเพิ่มระยะของความลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



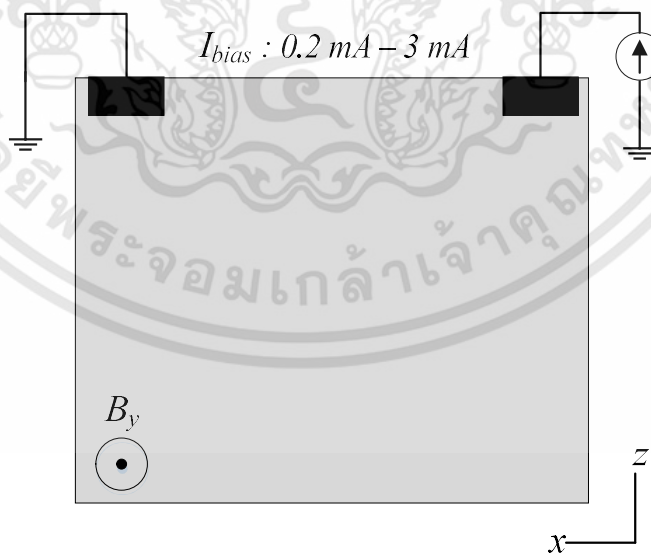
รูปที่ 4.50 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่ระยะความลึกแตกต่างกัน ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ที่กระแสไบอัส 1 มิลลิแอมป์

ฐานรองตัวอุปกรณ์ขึ้นไปตั้งแต่ 20 ถึง 170 ไมโครเมตร นั้นเอง หากพิจารณาจากรูปที่ 4.50 จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ด้านความลึกของตัวอุปกรณ์จึงถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของพาหะประจุหรือทิศทางการไหลของกระแสภายในตัวอุปกรณ์อีกด้วย เมื่อความลึกของฐานรองตัวอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไปค่าตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานก็จะแปรผันตามไปด้วย ด้วยผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวสรุปมาในเบื้องต้นนี้ก็ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับสมการหลักที่ 4.5 อีกด้วย จะสามารถสังเกตเห็นได้จากพารามิเตอร์ $1/T \propto \Delta R$ ที่เป็นลักษณะของการแปรผกผันต่อกัน กล่าวคือ ด้วยผลตอบสนองในพารามิเตอร์ด้านความเข้มข้มอะตอมสารเจือฐานรองตัวอุปกรณ์ในช่วงตอนต้นที่ผ่านมาจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เราพิจารณาเลือกใช้ฐานรองของตัวอุปกรณ์ให้มีความเข้มข้มอะตอมสารเจือที่ต่ำทำให้มีค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าในระดับที่สูงส่งผลทำให้เกิดค่าความต้านทาน ($R[B]$) ที่มากขึ้นด้วยแล้วนั้น แต่ถ้าหากมีการดำเนินการปรับเปลี่ยนในส่วนของพารามิเตอร์ด้านระยะความลึก (T) ของตัวอุปกรณ์ด้วยแนวโน้มในทิศทางที่เพิ่มมากขึ้นแล้วก็จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงทั้งค่าความต้านทาน ($R[B]$) ด้วยผลลัพธ์จากการตอบสนองที่มีลักษณะลดน้อยลง แต่ในทางตรงกันข้ามกลับให้ผลลัพธ์ด้านความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยลักษณะที่เพิ่มมากขึ้น จากผลตอบสนองที่เกิดขึ้นทั้งที่อยู่ในรูปแบบตารางข้อมูลและที่เป็นแผนภูมิเส้นกราฟดังกล่าวทำให้เราได้ทราบถึงแนวโน้มเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบตัวอุปกรณ์ว่าควรเลือกระยะความลึกที่ไม่ต่ำกว่า 20 ไมโครเมตร นั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

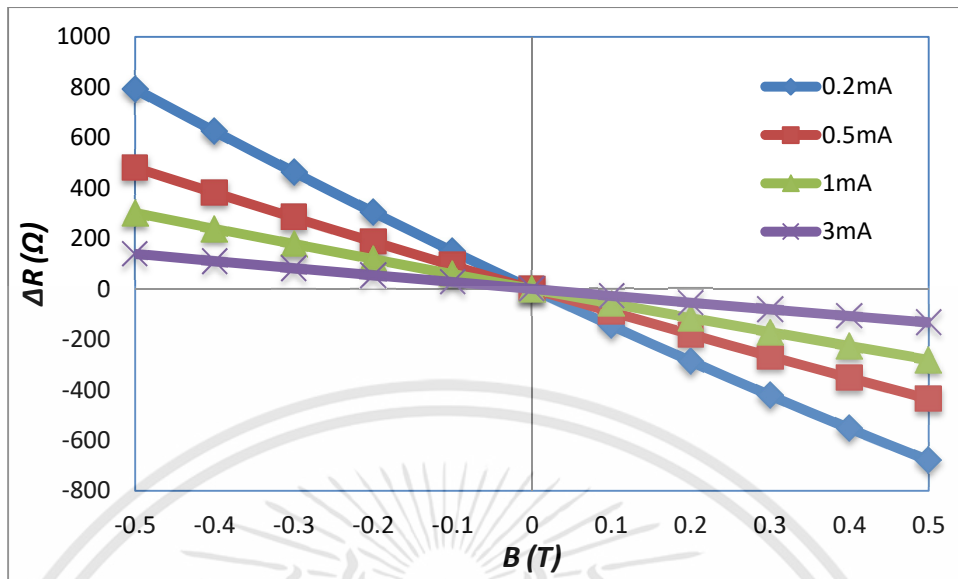
4.2.6 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีทำการไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ

ในส่วนของการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีที่ได้ดำเนินการไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ในขนาดซึ่งแตกต่างกันนั้น โดยที่เราก็ยังคงใช้มิติรูปทรงของอุปกรณ์ดังที่อ้างอิงอยู่รูปในที่ 3.27 ซึ่งขอบเขตของการจำลองแบบได้กำหนดให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขทางด้านค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือฐานรองของตัวอุปกรณ์ให้อยู่ในระดับต่ำ ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) และที่ค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองในระดับที่สูง ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ด้วย ด้านมิติของตัวอุปกรณ์ได้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วกระแสไบอัสทั้งสอง (L) มีค่าเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ส่งผลทำให้ระดับความยาวของตัวอุปกรณ์ (L_d) มีค่าเท่ากับ 17 ไมโครเมตร พร้อมด้วยการกำหนดให้ค่าขนาดด้านความกว้างของขั้วกระแสไบอัสทั้งสองก็จะมีค่าความกว้าง (W) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร ทำให้ระดับความกว้างของตัวอุปกรณ์ (W_d) มีค่าเท่ากับ 7 ไมโครเมตร ส่วนในด้านความสูงหรือความลึกของอุปกรณ์ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 100 ไมโครเมตร เพื่อให้พาหะประจุเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระโดยในมิติรูปทรงของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นโครงสร้างหลักที่เราได้นำมาใช้ในการจำลองแบบเบื้องต้นอยู่แล้ว จะเห็นได้จากการจำลองในช่วงตอนต้นที่ผ่านมา จากนั้นเมื่อเริ่มดำเนินการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ก็จะถูกไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ขนาดตั้งแต่ 0.2 มิลลิแอมแปร์ และเพิ่มระดับขึ้นไปจนถึงค่าเท่ากับ 3 มิลลิแอมแปร์ เข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณขั้วกระแส CC1 ภายใต้ปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระหว่างค่าตั้งแต่ 0 เทสลา จนถึงค่าเท่ากับ 0.5 เทสลา ในทิศทางตามแนวแกน $-y$ และทิศทางตามแนวแกน y ที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ในแนวขนานนั่นเอง

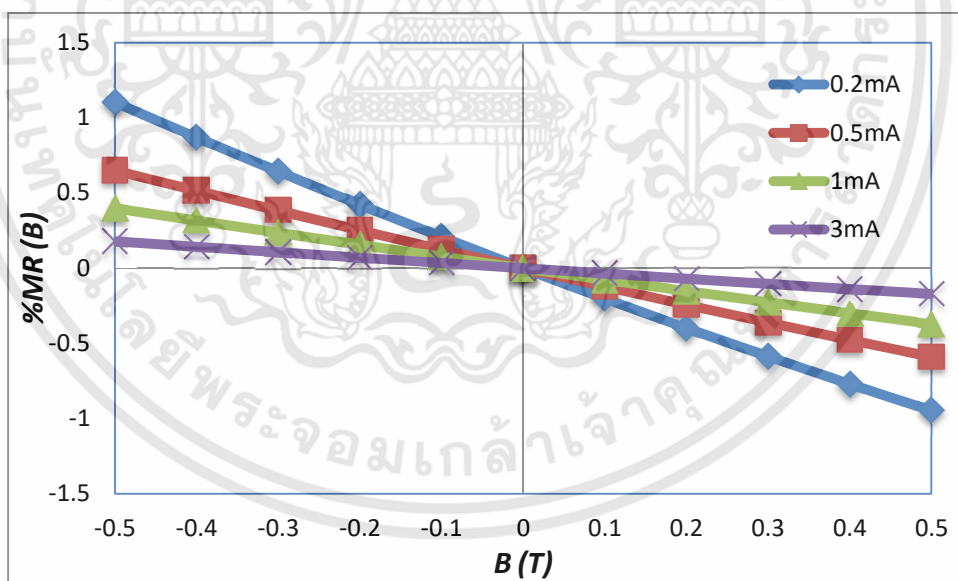


รูปที่ 4.51 แผนภาพการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีไบอัส ด้วยกระแสที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3})

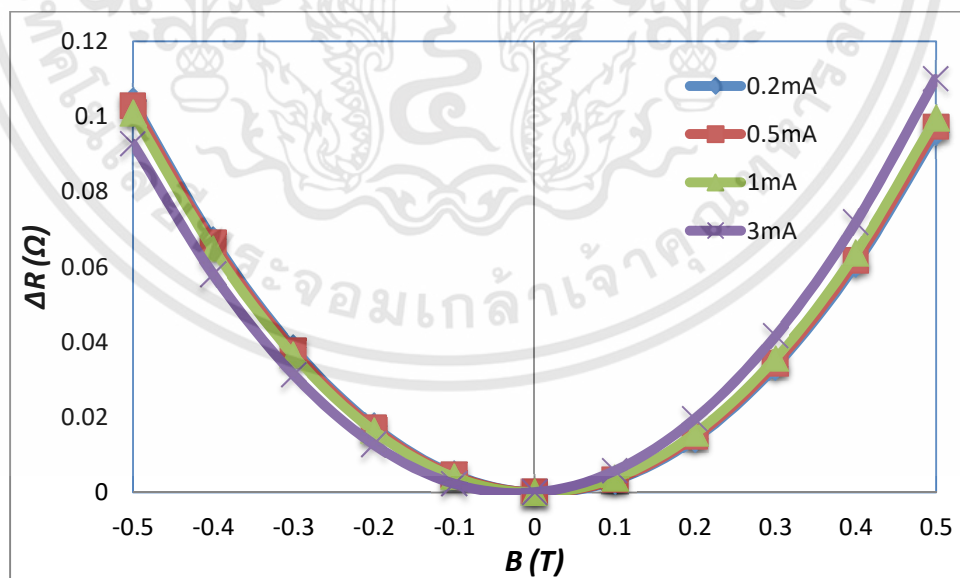


รูปที่ 4.53 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ของอุปกรณ์ กรณีไบอัส ด้วยกระแสที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3})

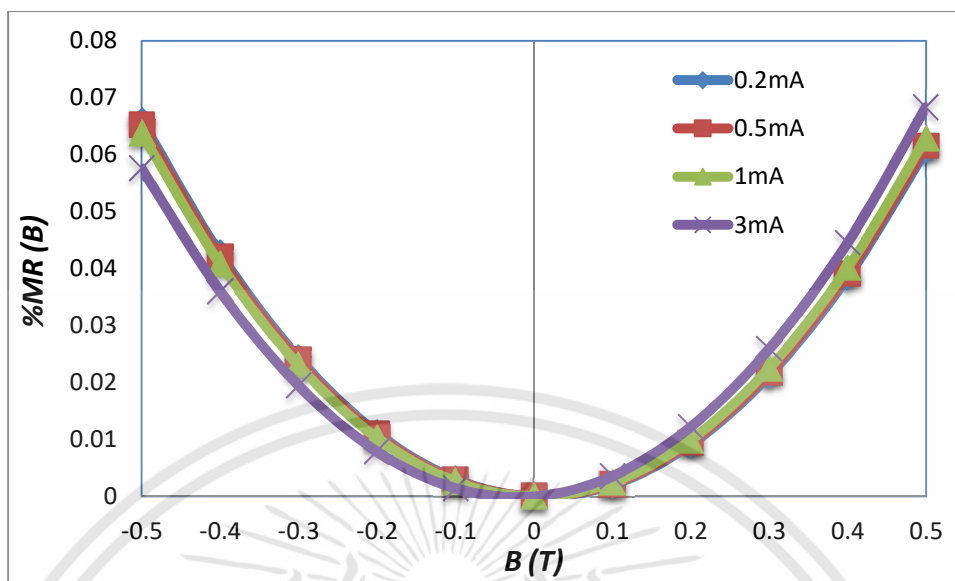
เมื่อทำการพิจารณาในกรณีพื้นฐานของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ จากในแผนภูมิเส้นกราฟรูปที่ 4.52 และ 4.53 ได้แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองปรากฏขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณความเข้มและทิศทางในแนวนอนของสนามแม่เหล็กที่พุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ โดยผลลัพธ์ของค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ในขนาดตั้งแต่ 0.2 ถึง 3 มิลลิแอมป์ ดังกล่าวนี้จะอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งค่าความต้านทานจะอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 71 - 77 กิโลโอห์ม(k Ω) ส่งผลทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) ที่เกิดขึ้นดังกล่าวก็จะมีผลลัพธ์ที่ไม่สูงตามไปด้วย แต่ในส่วนของคุณค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ (%MR(B)) กลับให้ระดับผลลัพธ์ที่ตรงข้ามกัน โดยเราสามารถทำการสังเกตเห็นได้จากข้อมูลในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ซึ่งได้แสดงถึงผลตอบสนองของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ประกอบการพิจารณา โดยจะเห็นได้ว่ามีผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) ที่เกิดขึ้นค่าจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 792 - 139 โอห์ม(Ω) และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ (%MR(B)) ก็อยู่ในช่วงระหว่างค่าประมาณ 1.10 - 0.17 เปอร์เซ็นต์ (%) ที่ระดับความเข้มของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา และค่ากระแสไบอัสที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.2-3 มิลลิแอมป์ เป็นต้น จากข้อมูลผลการจำลองแบบในกรณีที่ตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ในขนาดที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ทั้งที่อยู่ในรูปแบบที่เป็นแผนภูมิเส้นกราฟและที่แสดงผลอยู่ในรูปแบบตารางข้อมูลก็ตาม ทำให้เราได้ทราบว่าเมื่อตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสที่เพิ่มสูงขึ้นนั้นก็ทำให้เกิดผลของค่าความต้านทานขึ้นในระดับปริมาณที่มากกว่ากรณีที่ตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสที่ลดต่ำลง แต่ขณะเดียวกันในทางตรงข้ามกันก็กลับให้ผลของการตอบสนองในด้านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) และผลของค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ (%MR(B)) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ซึ่งน้อยกว่าในกรณีที่ตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสที่ลดต่ำลงนั่นเอง



รูปที่ 4.54 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มชั้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3})



รูปที่ 4.55 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของอุปกรณ์ กรณีไบอัส ด้วยกระแสที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3})

ในส่วนกรณีพื้นฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงนั้น ผลการตอบสนองได้แสดงเอาไว้อยู่ในรูปกราฟที่ 4.54 และ 4.55 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการตอบสนองที่ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นต่อขนาดความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยสามารถที่จะทำการพิจารณาข้อมูลได้จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 ประกอบการพิจารณา ก็จะทำให้เราทราบได้ว่าค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยเป็นอย่างมากหรือที่เคยกล่าวเอาไว้ว่าแทบไม่เกิดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเลย ซึ่งค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นนั้นจะอยู่ในช่วงประมาณระหว่าง 157 – 161 โอห์ม (Ω) ส่วนผลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) ที่เกิดขึ้นโดยค่าจะอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 0.1039 – 0.0927 โอห์ม(Ω) และค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) อยู่ในช่วงระหว่างค่าประมาณ 0.0659 – 0.0576 เปอร์เซ็นต์(%) ที่ระดับความเข้มของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา และค่ากระแสไบอัสที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.2-3 มิลลิแอมป์ เป็นต้น

นอกจากนี้แล้วเรายังสามารถที่จะพิจารณาได้จากการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ได้อีกด้วย โดยในกรณีที่ฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.56 และในกรณีที่ฐานรองตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) นั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 4.57 ซึ่งจากที่ได้ทำการศึกษาด้วยวิธีจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในด้านการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆที่ผ่านมาของทั้ง 5 กรณีดังกล่าวนี้ จึงทำให้เราสามารถคาดการณ์ได้ถึงแนวโน้มของลักษณะผล

ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงกรณีอุปรณ์มีความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ด้วยการไบอัสกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำและสูง

Magnetic field (T)	Resistance difference $\Delta R(\Omega)$ at $W/L = 1$ (5/5)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	$I = 0.2\text{mA}$	$I = 1\text{mA}$	$I = 3\text{mA}$	$I = 0.2\text{mA}$	$I = 1\text{mA}$	$I = 3\text{mA}$
0.5	-680.6906	-280.082	-133.537	0.0957425	0.099565	0.1100092
0.4	-553.5936	-225.635	-107.285	0.0606234	0.063618	0.0717886
0.3	-421.9702	-170.398	-80.8048	0.0334855	0.035684	0.0416733
0.2	-285.8249	-114.376	-54.0968	0.0143337	0.015767	0.0196681
0.1	-145.1647	-57.5767	-27.1617	0.0031713	0.003872	0.0057765
0	0	0	0	0	0	0
-0.1	149.6560	58.44104	27.38775	0.0048198	0.004150	0.0023387
-0.2	303.7871	117.8323	55.00092	0.0176295	0.016321	0.0127913
-0.3	462.3737	178.0688	82.83874	0.0384259	0.036511	0.0313546
-0.4	625.3935	239.1333	110.9004	0.0672046	0.064715	0.0580239
-0.5	792.8208	301.0166	139.1854	0.1039594	0.100927	0.0927930

ตารางที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์กรณีอุปรณ์มีความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ด้วยการไบอัสกระแสคงที่ค่าต่างๆ ในฐานรองความเข้มข้นสารเจือระดับต่ำและสูง

Magnetic field (T)	Percent of magnetoresistance $\%MR(B)$ at $W/L = 1$ (5/5)					
	Low Concentration (10^{14} cm^{-3})			High Concentration (10^{17} cm^{-3})		
	$I = 0.2\text{mA}$	$I = 1\text{mA}$	$I = 3\text{mA}$	$I = 0.2\text{mA}$	$I = 1\text{mA}$	$I = 3\text{mA}$
0.5	-0.946141	-0.37059	-0.171248	0.060761	0.062834	0.0683013
0.4	-0.769479	-0.29855	-0.137582	0.038473	0.040148	0.0445713
0.3	-0.586527	-0.22546	-0.103624	0.021251	0.022520	0.0258736
0.2	-0.397288	-0.15134	-0.069373	0.009096	0.009951	0.0122112
0.1	-0.201774	-0.07618	-0.034832	0.002012	0.002444	0.0035863
0	0	0	0	0	0	0
-0.1	0.208017	0.077328	0.035122	0.003058	0.002619	0.0014519
-0.2	0.422255	0.155913	0.070533	0.011188	0.010300	0.0079416
-0.3	0.642686	0.235617	0.106232	0.024386	0.023042	0.0194670
-0.4	0.869279	0.316416	0.142218	0.042650	0.040841	0.0360252
-0.5	1.101999	0.398299	0.178491	0.065976	0.063693	0.0576123

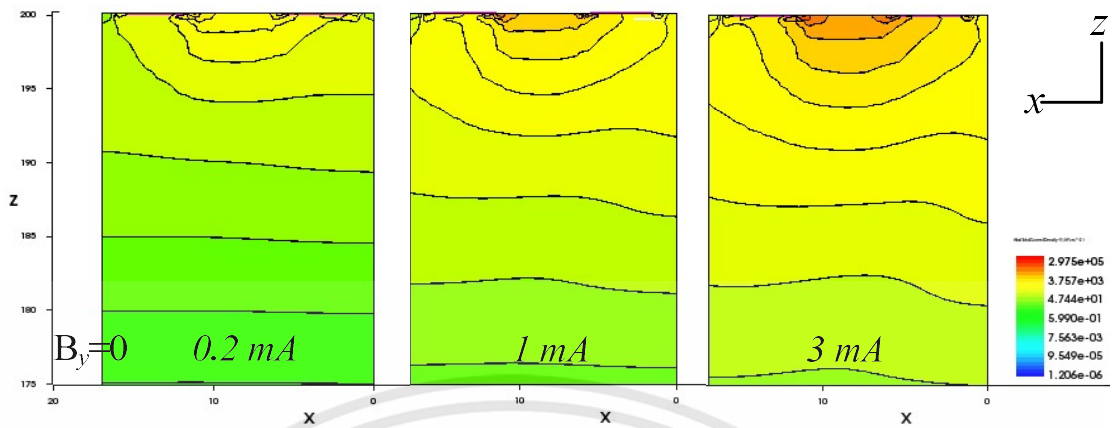
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ในเบื้องต้นได้อีกด้วย รวมทั้งสามารถสังเกตผลลัพธ์ที่ได้จากลักษณะการกระจายตัวความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นภายในฐานรองตัวอุปกรณ์ดังกล่าวในรูปที่ 4.56 และ 4.57 ด้วยการเปรียบเทียบความแตกต่างของทั้งสองกรณีอีกครั้ง โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในฐานรองตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำเราจะพบกับลักษณะของการเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์จากเส้นที่แสดงถึงแต่ละระดับการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแส(เส้นที่อยู่ในแนวนอนหรือทิศทางตามแนวแกน x) นั้นเอง ซึ่งผลลัพธ์จะแตกต่างจากในกรณีฐานรองตัวอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงที่สังเกตดูแล้วแทบจะไม่พบกับการเบี่ยงเบนความหนาแน่นกระแสเกิดขึ้นเลย ตลอดจนในกรณีดังกล่าวนี้เองที่ตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ในระดับปริมาณที่แตกต่างกันนี้ ทำให้เราได้สังเกตเห็นถึงความสัมพันธ์บางสิ่งที่มีความสำคัญต่อกันอีกด้วยว่า เมื่อตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ในระดับปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นไปนั้นก็จะส่งผลทำให้การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นอยู่ภายในฐานรองของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวนี้สามารถที่จะเกิดการกระจายตัวได้ในลักษณะที่ลึกลงไปยังตำแหน่งพื้นที่บริเวณด้านล่างของฐานรองตัวอุปกรณ์ได้ในระยะทางที่มากขึ้นไปด้วยหรือกล่าวได้ว่าเกิดการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสที่เป็นพื้นที่บริเวณกว้างมากกว่าในกรณีในตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยค่ากระแสคงที่ในระดับที่ต่ำเมื่อได้ดำเนินการเปรียบเทียบกันระหว่างทั้งสองกรณีดังกล่าวซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เองเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงต่อกัน กล่าวคือ ในการไบอัสค่ากระแสคงที่ในระดับปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นเข้าไปที่ตำแหน่งบริเวณหัวกระแสของตัวอุปกรณ์นั้นก็จะเป็นการส่งผลทำให้พาหะประจุหรืออนุภาคที่มีประจุทางไฟฟ้าซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระดังกล่าวทำหน้าที่ในการขนส่งประจุไฟฟ้าที่อยู่ภายในวัสดุสารกึ่งตัวนำฐานรองของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ดังกล่าวนี้มีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยจึงทำให้ระดับปริมาณการไหลของกระแสจึงมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง ด้วยเหตุดังกล่าวนี้เองจึงทำให้ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน (ΔR) ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าที่ลดน้อยลงเป็นอย่างมาก นอกจากนี้แล้วหากพิจารณาด้านความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ ดังข้อมูลในตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ(10^{14} cm^{-3}) จะมีความไวในการตอบสนองต่อสนาม

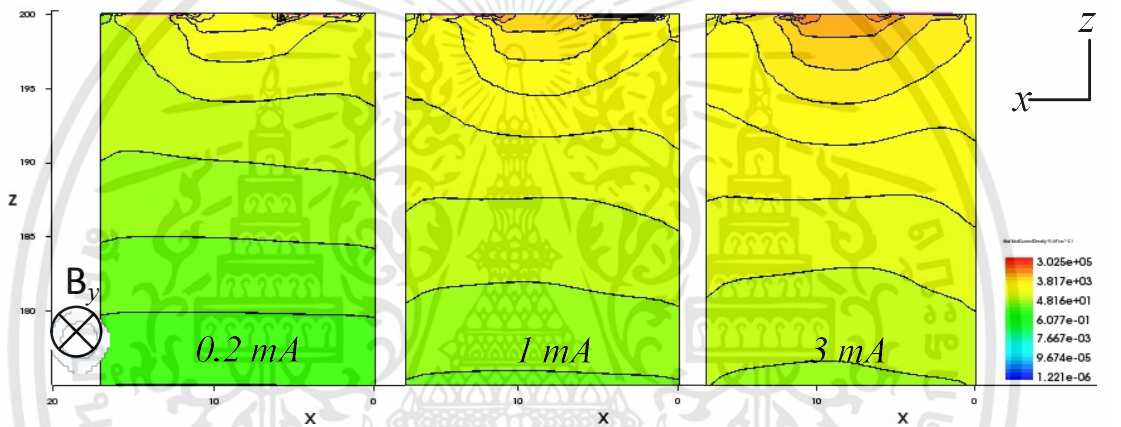
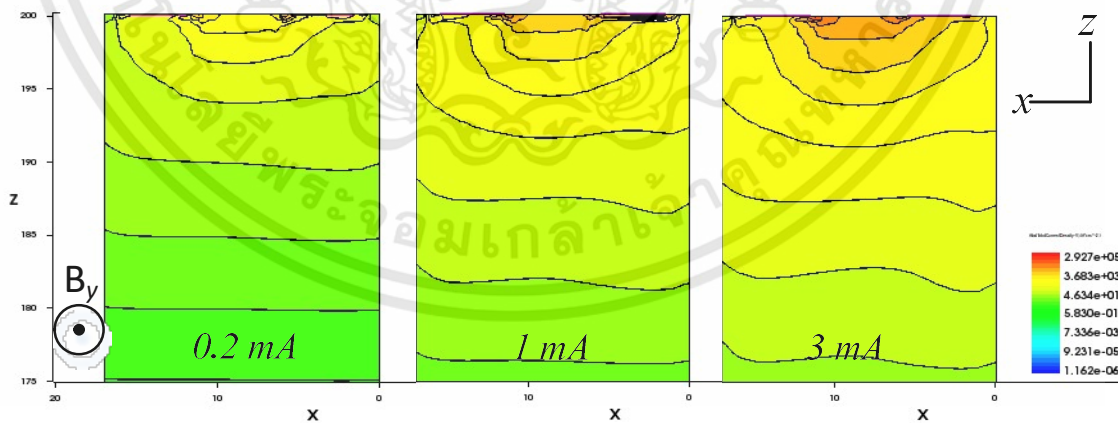
ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าแตกต่างกัน ในฐานรองความเข้มข้นสารเจือระดับต่ำและสูง

Bias Current (mA)		0.2	0.5	1	3
Current-Related Sensitivity of Current mode (M Ω /AT)	10^{14} cm^{-3}	7.929333	1.923475	0.602365	0.092792
	10^{17} cm^{-3}	0.001039	0.000411	0.000201	0.000061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

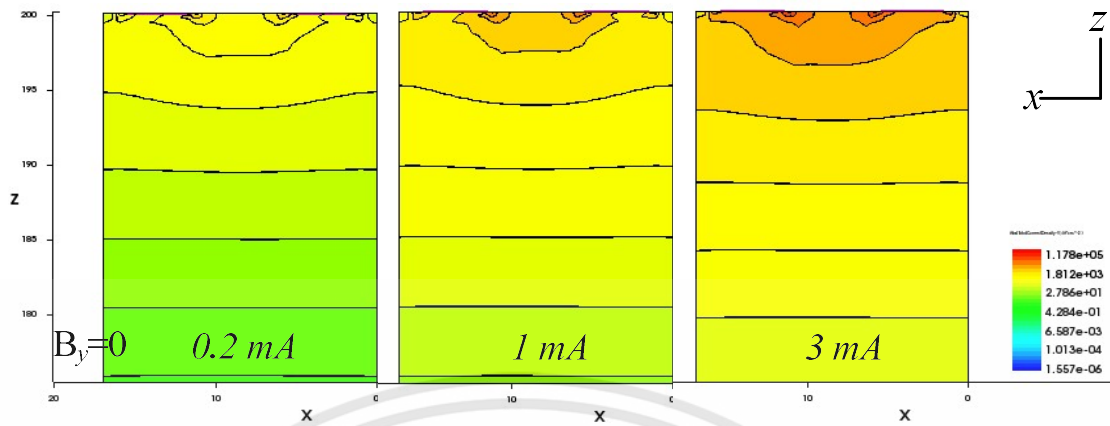


(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

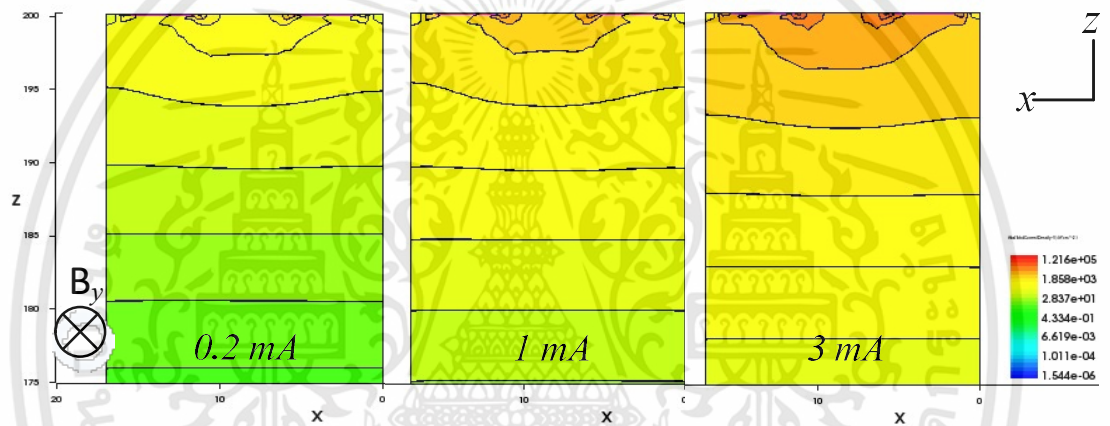
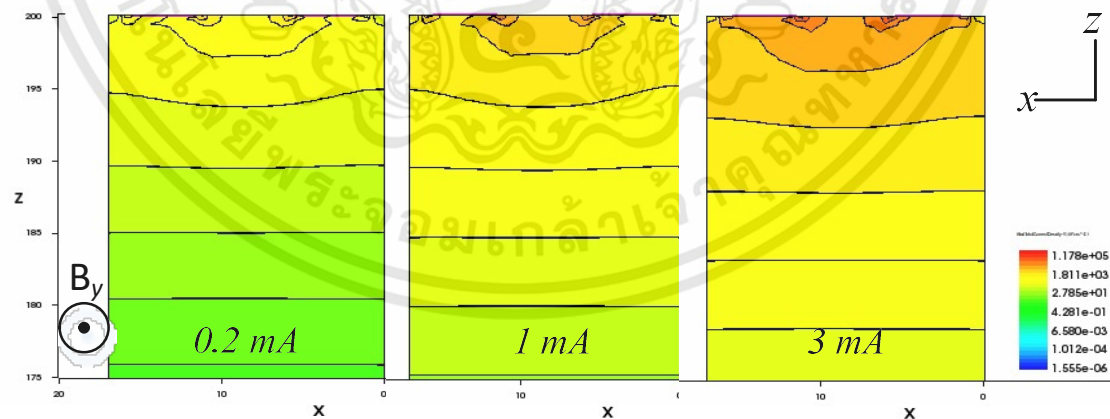
(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.56 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับต่ำ (10^{14} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

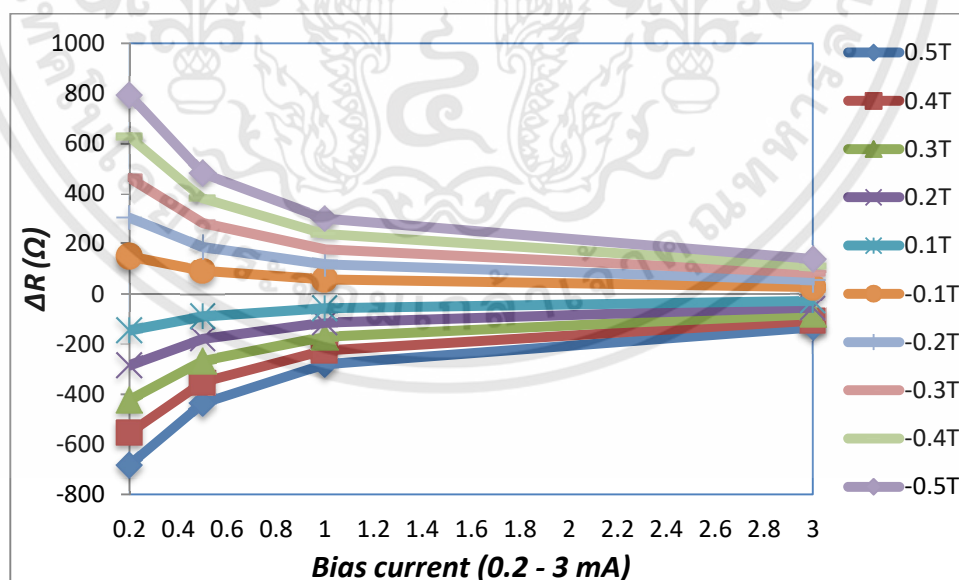
(b) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง $-y$ (c) กรณีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทิศทาง y

รูปที่ 4.57 การกระจายตัวความหนาแน่นของกระแสที่ฐานรองอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือระดับสูง (10^{17} cm^{-3}) ด้วยความกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก 0.5 เทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กได้ดีมากกว่าในกรณีของความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง(10^{17} cm^{-3}) อย่างเห็นได้ชัดจนด้วยข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 4.9 ดังกล่าว รวมไปถึงหากได้ดำเนินการไบอัสด้วยกระแสคงที่ในระดับที่ต่ำ (0.2 mA) ด้วยแล้วก็จะทำให้มีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

ดังนั้นเมื่อเราดำเนินการนำค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละระดับความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่ากระแสไบอัสคงที่ในแต่ละระดับที่แตกต่างกันออกไปที่เกิดขึ้นอยู่ภายในฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์นั้น ก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ตามลักษณะของแผนภูมิเส้นกราฟดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.58 ซึ่งจากในรูปกราฟดังกล่าวนี้เองได้แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนด้วยรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในฐานรองตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ โดยลักษณะเส้นกราฟที่เราได้เห็นนั้นจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ลดต่ำลงอย่างมาก ซึ่งผลตอบสนองที่อยู่ในรูปแบบความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เองจะสังเกตเห็นได้ว่าช่วงที่มีระดับปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่สูงนั้นจะอยู่ในช่วงระหว่างค่ากระแสไบอัสคงที่ตั้งแต่ 0.2 มิลลิแอมแปร์ จนถึง 1 มิลลิแอมแปร์ หลังจากนั้นแล้วค่าการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานก็จะเริ่มเข้าใกล้สู่ค่าคงที่ระดับหนึ่งหรือเรียกได้ว่าเข้าใกล้สู่ค่าอิมิตัว ด้วยการนำผลจากข้อมูลการจำลองแบบดังกล่าวนี้มาพิจารณาจึงทำให้เห็นถึงแนวโน้มของผลตอบสนองต่อความเข้มข้นแม่เหล็กดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.58 จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ทางด้านการไบอัสค่ากระแสคงที่ดังกล่าวก็ถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของพาหะประจุหรือมีผลกระทบโดยตรงต่อทิศทางการไหลของกระแสที่อยู่ในตัวของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์รวมทั้งผลการตอบสนองต่อค่าค่าแมกนีโตริซิสแทนท์อีกด้วยนั่นเอง



รูปที่ 4.58 ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ กรณีไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในส่วนของบทนี้เป็นการกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการจำลองแบบการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวขนานของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ด้วยค่าแมกนีโตริซิสแตนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าว โดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อเป็นการศึกษาถึงแนวโน้มรวมทั้งความเป็นไปได้ในการออกแบบใช้งานอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่จะนำมาตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ตลอดจนเพื่อนำไปสู่การค้นคว้าวิจัยและพัฒนาตัวอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งในด้านหลักการทำงานของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ดำเนินการศึกษาวิจัยนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในลักษณะแนวตั้ง โดยจะแตกต่างไปจากอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ทั่วไปที่นำเสนอการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ในลักษณะแนวนอนเป็นหลัก แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็กในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งอาศัยกลไกการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์จากการเบี่ยงเบนของกระแสในทิศทางแนวตั้งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าแมกนีโตริซิสแตนท์เป็นเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ในการศึกษาค้นคว้าวิจัยทั้งหมดนั้นได้ดำเนินการภายใต้การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD จากผลการจำลองแบบที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในเบื้องต้นของบทก่อนหน้านี้นั้นสามารถทำการสรุปได้ดังนี้

1. อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่อาศัยกลไกการเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ดังกล่าวด้วยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นจากการเบี่ยงเบนแนวการเคลื่อนที่ไปของพาหะประจุหรือการเบี่ยงเบนเส้นทางการไหลของกระแสในทิศทางแนวตั้งที่อยู่ภายในตัวอุปกรณ์ โดยผลตอบสนองของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือค่าแมกนีโตริซิสแตนท์ที่ปรากฏขึ้นดังกล่าวนี้เองเป็นผลมาจากความไม่สมดุลระหว่างแรงลอเรนซ์เหนี่ยวนำ (F_L) จากสนามแม่เหล็กและแรงเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าฮอลล์หรือที่เรียกว่าแรงไฟฟ้าฮอลล์ (F_H) ด้วยมิติรูปทรงของอุปกรณ์ที่เป็นลักษณะทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งโครงสร้างในส่วนของแนวตัดขวางที่ไม่สมมาตรกันในแนวตั้งตามเส้นทางการไหลของกระแสระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นทำให้เกิดความไม่สมดุลระหว่างแรงลอเรนซ์และแรงไฟฟ้าของฮอลล์ ($F_L \neq F_H$) ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกที่พุ่งตัดผ่านเข้ามากระทำนั่นเอง

2. ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด (ΔR) หรือค่าแมกนีโตริซิสแตนท์ที่ปรากฏขึ้นของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นผลกระทบที่เกิดมาจากพารามิเตอร์หลักที่สำคัญอยู่สองส่วนด้วยกัน ดังสามารถที่จะแสดงได้ด้วยสมการ $\Delta R = R(0) \cdot MR(B)$ ก็คือ ความต้านทานที่เกิดขึ้นในกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์ ($R(0)$) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ($MR(B)$) หรืออาจเรียกว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงแมกนีโตริซิสแทนท์ขณะที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งตัดผ่านเข้ากระทำกับตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์

3. อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีพื้นฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือแตกต่างกันนั้น แสดงผลลัพธ์ที่ปรากฏขึ้นในรูปของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตริซิสแทนท์ด้วยผลที่ตอบสนองและไม่ตอบสนองต่อความเข้มข้นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ โดยกรณีพื้นฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ (10^{14} , 10^{15} cm⁻³) ปรากฏผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และในส่วนของกรณีของฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูง (10^{16} - 10^{19} cm⁻³) ปรากฏผลตอบสนองแต่เป็นเพียงในระดับปริมาณที่น้อยอย่างมากหรืออาจกล่าวได้ว่าไม่ตอบสนองและมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนดังเช่นกรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำอีกด้วย นอกจากนี้แล้วทั้ง 2 กรณีดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นยังมีระดับปริมาณการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันออกไปอีกด้วย กล่าวคือ ค่าความต้านทาน ($R(B)$), ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR), และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะมีผลการตอบสนองที่ลดต่ำลงเมื่อระดับปริมาณความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองเพิ่มมากขึ้น(สภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำ) ในทางกลับกันผลการตอบสนองจะมีแนวโน้มในลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับปริมาณความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองลดต่ำลง(สภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่สูง) ด้วยผลตอบสนองดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ด้านความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่สอดคล้องกับแมกนีโตริซิสแทนท์ในลักษณะที่แปรผันตรงต่อกัน ($\rho \propto \Delta R$) ดังนั้นแล้วอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ทำงานโดยอาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสในแนวตั้งที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์นั้นควรกำหนดให้ฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ต่ำ ซึ่งจากการจำลองแบบในช่วงที่ทำการศึกษา ค่าที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานด้วยผลตอบสนองของแมกนีโตริซิสแทนท์ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฐานรองอยู่ในช่วงระหว่าง 10^{14} ถึง 10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4. อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีที่มีค่าระยะของความกว้าง(W)แตกต่างกันนั้น แสดงถึงผลการตอบสนองด้วยรูปแบบค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตริซิสแทนท์ที่ได้เป็นเชิงเส้นในกรณีพื้นฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำ ส่วนในกรณีพื้นฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงนั้นผลการตอบสนองที่ปรากฏอยู่ในระดับปริมาณเพียงเล็กน้อยเป็นอย่างมากหรือกล่าวได้ว่าไม่ตอบสนองและมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกับกรณีแรก ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของค่าระยะความกว้างตัวอุปกรณ์จะเป็นการส่งผลทำให้ผลตอบสนองของค่าความต้านทาน ($R(B)$), ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะที่ลดน้อยลงไปด้วย แต่ในส่วนของเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแทนท์ ($\%MR(B)$) กลับให้ผลตอบสนองปรากฏขึ้นในลักษณะที่ตรงกันข้ามหรืออาจกล่าวได้ว่า ผลลัพธ์ของ ($R(B)$) และ (ΔR) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดน้อยลงไปตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระยะความกว้างหรือเมื่อตัวอุปกรณ์มีขนาดของระยะความกว้างที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง ด้วยผลตอบสนองที่มีลักษณะดังที่ได้กล่าวมานี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่แปรผกผันต่อกัน

ระหว่างพารามิเตอร์ทางด้านขนาดของความกว้างและผลตอบสนองแมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องตามหลักทฤษฎี ($1/W \propto \Delta R$) ดังนั้นแล้วในการทำงานของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ต้องการผลตอบสนองของแมกนีโตริซิสแดนท์ที่มีค่าสูงจากการเบี่ยงเบนของกระแสในแนวตั้งที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์นั้นจึงควรทำการออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดที่แคบ โดยผลจากการจำลองแบบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงค่าระยะความกว้างที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในช่วงที่ทำการศึกษาซึ่งควรเป็นช่วงระยะความกว้างที่น้อยสุดหรือมีขนาดที่แคบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความกว้างที่แคบที่สุด นั่นเอง

5. อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีที่มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง(L) แตกต่างกัน แสดงผลการตอบสนองด้วยรูปแบบของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ปรากฏผลตอบสนองขึ้นด้วยลักษณะที่เป็นเชิงเส้นในกรณีฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ต่ำ และผลไม่ตอบสนองในกรณีฐานรองมีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ต่ำเนื่องจากระดับปริมาณผลตอบสนองที่น้อยเป็นอย่างมากจนแทบไม่สามารถสังเกตเห็นได้เลยหากไม่ทำการแยกออกมาเพื่อพิจารณาเป็นกรณีเฉพาะ โดยในการเพิ่มขึ้นของค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแส CC1 และ CC2 จะส่งผลทำให้การตอบสนองของค่าความต้านทาน (R/B), ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR), และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของผลลัพธ์ที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย รวมไปถึงยังเป็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นต่อค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองอีกด้วย หรือในทางกลับกันอาจกล่าวได้ว่าเป็นการลดน้อยลงตามอัตราส่วนรูปทรงด้านยาวของตัวอุปกรณ์ ซึ่งจากผลตอบสนองที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นนี้แสดงให้เห็นว่าเราทราบได้ถึงลักษณะความสัมพันธ์ที่สอดคล้องตามสมการหลักของพารามิเตอร์ ($L \propto \Delta R$) ที่แปรผันตรงต่อกันนั่นเอง ดังนั้นแล้วตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์จะมีผลตอบสนองของค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ได้ดีที่สุดเมื่ออุปกรณ์มีระยะห่างระหว่างขั้วกระแสทั้งสองที่มากหรือตัวอุปกรณ์ต้องมีอัตราส่วนรูปทรงที่ยาว จากผลในการจำลองแบบของค่าระยะห่างระหว่างขั้วกระแสหรือค่าความยาวระหว่างขั้วกระแสทั้งสองที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ในช่วงที่ทำการศึกษามีค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ยาวที่สุด

6. อุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์กรณีที่ตัวอุปกรณ์มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเป็นหนึ่งใน ($W/L=1$) หรือรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีขนาดที่แตกต่างกัน แสดงผลการตอบสนองในรูปแบบของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงหรือแมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยการปรากฏขึ้นของผลตอบสนองและไม่ตอบสนองต่อความเข้มข้นรวมทั้งทิศทางของสนามแม่เหล็กในแนวขนานเหมือนดังเช่นในกรณีที่ผ่านมา ซึ่งในการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราส่วนทางขนาดรูปทรงอุปกรณ์ดังกล่าวจะส่งผลทำให้การตอบสนองของค่าความต้านทาน (R/B) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์มีแนวโน้มที่ลดน้อยลง แต่ในทางกลับกันค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR), และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแดนท์ ($\%MR(B)$) ดังกล่าวกลับจะมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งจากนั้นก็ลดลง โดยหากมองในภาพรวมแล้วทำให้เราทราบว่าอุปกรณ์แมกนีโตริซิสเตอร์ที่ตัวอุปกรณ์ขนาดใหญ่

จะมีแนวโน้มของผลลัพธ์การตอบสนองที่เกิดขึ้นซึ่งสูงกว่าอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กกว่าดังที่สอดคล้องกับสมการหลัก ($L/W \propto \Delta R$) นั่นเอง ดังนั้นแล้วอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะมีผลตอบสนองได้ดีที่สุดเมื่อตัวอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ค่าหนึ่ง จากผลในการจำลองแบบของพารามิเตอร์อัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเป็นหนึ่งในช่วงที่ทำการศึกษา ขนาดอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (W/L) ที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์มีขนาดเท่ากับ 20 ไมโครเมตร นั่นเอง

7. อุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์กรณีพื้นฐานของตัวอุปกรณ์มีค่าระยะของความลึกที่แตกต่างกัน แสดงผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์ด้วยค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับทั้ง 4 กรณีที่ผ่านมา โดยในการเพิ่มขึ้นของขนาดระยะความลึกฐานรองของตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะส่งผลทำให้การตอบสนองของค่า (R/B) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอุปกรณ์มีแนวโน้มมากขึ้นไปจนกระทั่งถึงค่าคงที่ระดับหนึ่งก็จะเริ่มเข้าสู่ค่าอิ่มตัวค่าหนึ่งนั่นเอง ในส่วนของค่า (ΔR) และ ($\%MR(B)$) จะมีแนวโน้มของลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มมากขึ้นไปจนกระทั่งถึงค่าคงที่ระดับหนึ่งจากนั้นก็เริ่มเข้าสู่ค่าอิ่มตัวค่าหนึ่งอีกเช่นกัน ซึ่งจากผลตอบสนองดังกล่าวนี้ทำให้เราทราบถึงความสัมพันธ์เบื้องต้นที่ว่าพารามิเตอร์ทางด้านระยะของความลึกของอุปกรณ์จะมีลักษณะที่แปรผันตรงต่อผลตอบสนอง ($T \propto \Delta R$) จนถึงค่าหนึ่ง โดยจากผลการจำลองแบบในพารามิเตอร์ทางด้านค่าระยะความลึกฐานรองของตัวอุปกรณ์ในช่วงที่ทำการศึกษาที่เหมาะสมต่อการทำงานควรมีค่าที่ไม่น้อยกว่า 20 ไมโครเมตร

8. อุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์กรณีที่ถูกดำเนินการไปอัสการแสดคที่ด้วยค่าที่แตกต่างกัน แสดงผลการตอบสนองด้วยค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ปรากฏขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือต่ำและไม่ตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้นในฐานรองที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงซึ่งเป็นลักษณะที่เหมือนกันกับทุกกรณีที่ที่ผ่านมา โดยในการเพิ่มขึ้นของระดับขนาดกระแสไปอัสที่ให้กับตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ส่งผลทำให้การตอบสนองของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ΔR) และเปอร์เซ็นต์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ($\%MR(B)$) ที่เกิดขึ้นอยู่ภายในตัวอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีแนวโน้มที่ลดน้อยลงไป จากในลักษณะของผลตอบสนองดังที่ได้กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่าเราทราบถึงความสัมพันธ์ที่แปรผกผันต่อกันระหว่างระดับขนาดของกระแสไปอัสและผลตอบสนองของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นนั่นเอง ดังนั้นแล้วระดับปริมาณของค่ากระแสไปอัสที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์จึงควรเลือกค่ากระแสไปอัสด้วยแนวโน้มระดับที่ต่ำให้กับอุปกรณ์ก็จะได้ผลลัพธ์ในการตอบสนองที่สูง ซึ่งจากผลในการจำลองแบบดังกล่าวด้านพารามิเตอร์ค่ากระแสไปอัสที่เหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์ในช่วงที่ทำการศึกษามีค่าเท่ากับ 0.2 มิลลิแอมแปร์ เป็นต้น

จากผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ ทำให้เราสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาเป็นแนวทางเพื่อใช้ในการออกแบบตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวนอนหรือทิศทางในแนวขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ด้วยปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นภายในได้นั่นเอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Hebbert and L. Schwee, "Thin film magnetoresistance magnetometer," Review of Scientific Instruments, vol. 37, pp. 1321-1323, 1966.
- [2] K. Koo, A. Dandridge, and G. Sigel, "Effects Of Nonlinear Magnetostrictive Properties In A Fiber Optic Magnetometer," in 2nd Intl Conf on Optical Fiber Sensors: OFS'84, 1984, pp. 59-71.
- [3] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer," Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 12, p. 241, 1979.
- [4] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 33, pp. 129-141, 1992.
- [5] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors," Proceedings of the IEEE, vol. 78, pp. 973-989, 1990.
- [6] P. Ripka, "Magnetic sensors for industrial and field applications," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 42, pp. 394-397, 1994.
- [7] N. Barié, A. Skrypnik, A. Voigt, M. Rapp, and J. Marcoll, "Work place monitoring using a high sensitive surface acoustic wave based sensor system," in TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007, pp. 1003-1006.
- [8] Y. Dake and M. Tokai, "Development of SAW pressure sensor using stainless steel diaphragm," in TRANSDUCERS'91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers, 1991, p. 1009.
- [9] S. M. Sze, **Semiconductor sensors:** John Wiley & Sons, 1994.
- [10] R. S. Muller, R. T. Howe, S. D. Senturia, R. L. Smith, and R. M. White, **Microsensors:** IEEE press New York, 1991.
- [11] I. Bolshakova, "Magnetic microsensors: technology, properties, application," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 68, pp. 282-285, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] J. Clarke and R. H. Koch, "The impact of high-temperature superconductivity on SQUID magnetometers," *Science*, vol. 242, pp. 217-223, 1988.
- [13] E. Hall, "On a new action of the magnet on electric currents," *American Journal of Science*, pp. 200-205, 1880.
- [14] E. H. Hall, "On the new action of magnetism on a permanent electric current," *American Journal of Science*, pp. 161-186, 1880.
- [15] H. P. Baltes and R. S. Popovic, "Integrated semiconductor magnetic field sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 74, pp. 1107-1132, 1986.
- [16] L. Andor, H. Baltes, A. Nathan, and H. Schmidt-Weinmar, "Numerical modeling of magnetic-field-sensitive semiconductor devices," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 32, pp. 1224-1230, 1985.
- [17] O. Corbino, "Elektromagnetische Effekte, die von der Verzerrung herrühren, welche ein Feld an der Bahn der Ionen in Metallen hervorbringt," *Phys. Z*, vol. 12, p. 561, 1911.
- [18] M. J. Ross, "Hall effect device," ed: Google Patents, 1961.
- [19] J. W. C. Dunlap, "Hall effect device," ed: Google Patents, 1955.
- [20] W. Thomson, "XIX. On the electro-dynamic qualities of metals:—Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron," *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 546-550, 1857.
- [21] R. S. Popovic, **Hall effect devices: magnetic sensors and characterization of semiconductors**: CRC Press, 2003.
- [22] C. Chien, **The Hall effect and its applications**: Springer Science & Business Media, 2013.
- [23] J. Heremans, "Solid state magnetic field sensors and applications," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 26, p. 1149, 1993.

- [24] R. Popovic, **"The vertical Hall-effect device,"** IEEE Electron Device Letters, vol. 5, pp. 357-358, 1984.
- [25] R. Foster, **"Solid state keyboard,"** ed: Google Patents, 1974.
- [26] R. Boll, K. J. Overshott, W. Göpel, J. Hesse, and J. Zemel, **Sensors, Magnetic Sensors** vol. 5: John Wiley & Sons, 2008.
- [27] H. Weiß, **Physik und Anwendung galvanomagnetischer Bauelemente:** Springer-Verlag, 2013.
- [28] D. Caughey and R. Thomas, **"Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field,"** Proceedings of the IEEE, vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [29] A. Cuevas, P. Basore, G. Giroult-Matlakowski, and C. Dubois, **"Surface recombination velocity and energy bandgap narrowing of highly doped n-type silicon,"** in Proceedings of the 13th European Conference Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1995, pp. 337-342.
- [30] **TCAD Sentaurus Manual,** Synopsys, Version L-2016.03.
- [31] C. K. Maiti, **Introducing Technology Computer-Aided Design (TCAD): Fundamentals, Simulations, and Applications:** Pan Stanford, 2017.
- [32] **Sentaurus Process Used Guide,** Synopsys, Version A-2007.12, December, 2007.
- [33] I. Synopsys, **"Sentaurus Structure Editor User Guide,"** ed: Mountain View CA, 2013.
- [34] I. Synopsys, **"Sentaurus device user guide,"** Version Z-2007.03, 2010.
- [35] S. Li and S. Li, **3D TCAD simulation for semiconductor processes, devices and optoelectronics:** Springer Science & Business Media, 2011.
- [36] A. Huiser and H. Baltes, **"Numerical modeling of vertical Hall-effect devices,"** IEEE Electron Device Letters, vol. 5, pp. 482-484, 1984.

- [37] S. V. Lozanova and C. S. Roumenin, "**Parallel-field silicon Hall effect microsensors with minimal design complexity,**" IEEE Sensors Journal, vol. 9, pp. 761-766, 2009.
- [38] T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai, "**The effect of deviation current to 5-contacts vertical Hall device,**" in 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016, pp. 1-4.
- [39] S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai, "**Effect of substrate depth to 5-contact vertical hall,**" in 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017, pp. 620-623.
- [40] Y. Chemthung, T. Phetchakul, and A. Poyai, "**Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance,**" in 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2018, pp. 209-212.
- [41] T. Phetchakul, Y. Chemthung, and A. Poyai "**Effect of Aspect Ratio on Horizontal Field Magnetoresistance**" Proceeding of International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials 8th (ICAMEM2019), April 18–19, HongKong, China, 2019.
- [42] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong, and A. Poyai, "**The new design for magnetoresistance effect on hall plate structure,**" in 2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2012, pp. 1-4.
- [43] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong, and A. Poyai, "**Contributing parameters for magnetoresistance effect of the new design on Hall plate structure,**" in 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2013, pp. 1-4.
- [44] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong, and A. Poyai, "**Split-Current Magnetoresistor,**" in Advanced Materials Research, 2013, pp. 489-492.

- [45] W. Allegretto, A. Nathan, and H. Baltes, "Numerical analysis of magnetic-field-sensitive bipolar devices," IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, vol. 10, pp. 501-511, 1991.
- [46] C. Riccobene, G. Wachutka, J. Burgler, and H. Baltes, "Operating principle of dual collector magnetotransistors studied by two-dimensional simulation," IEEE transactions on electron devices, vol. 41, pp. 32-43, 1994.
- [47] M. G. T. U. Guide, "Mountain View, California: Synopsys, Inc.; Sentaurus Structure Editor User Guide, Version A-2007.12 (2007). Mountain View, California: Synopsys," ed: Inc, 2007.
- [48] J. W. Gardner and F. Udrea, Microsensors: principles and applications vol. 994: Wiley Chichester, 1994.
- [49] S. D. U. Guide, "Version-A2007. 12," Synopsys Inc, 2007.
- [50] S. K. Saha, "Introduction to technology computer aided design," in Technology Computer Aided Design, ed: CRC Press, 2016, pp. 17-60.
- [51] รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิลิกส์ : แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [52] ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. ฟิลิกส์สารกึ่งตัวนำ : แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [53] ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ : แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544
- [54] รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. แมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กความเร็วสูง. กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [55] รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. แมกนีโตทรานซิสเตอร์หลายมิติ (2 มิติ และ 3 มิติ) ด้วยกลไกการเลี้ยวเบนและการรวมตัวของพาหะ. กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [56] รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล. ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส. กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [57] ทรงพล กาญจนชูชัย. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

1. Crystal properties

PROPERTY	VALUE	UNITS
Structure	Cubic	
Space Group	Fd3m	
Atomic weight	28.0855	
Lattice spacing (a_0) at 300K	0.54311	Nm
Density at 300K	2.3290	g/cm ³
Nearest Neighbor Distance at 300K	0.235	Nm
Number of atoms in 1 cm ³	$4.995 \cdot 10^{22}$	
Isotopes	28 (92.23%) 29 (4.67%) 30 (3.10%)	
Electron Shells	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	
Common Ions	Si^{4+}, Si^{4-}	
Critical Pressure	1450	Atm
Critical Temperature	4920	°C

2. Band structure properties

PROPERTY	VALUE	UNITS
Dielectric Constant at 300 K	11.9	
Effective density of states (conduction, N_c , T=300 K)	2.8×10^{19}	cm ⁻³
Effective density of states (valence, N_v , T=300 K)	1.04×10^{19}	cm ⁻³
Electron affinity	133.6	<i>kJ/mol</i>
Energy Gap E_g at 300 K (Minimum Indirect Energy Gap at 300 K)	1.12	eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTY	VALUE	UNITS
Energy Gap E_g at ca. 0 K (Minimum Indirect Energy Gap at 0K)	1.17 (at 0 K)	eV
Minimum Direct Energy Gap at 300 K	3.4	eV
Energy separation ($E_{\Gamma L}$)	4.2	eV
Intrinsic Debye length	24	Um
Intrinsic carrier concentration	$1 \cdot 10^{10}$	cm^{-3}
Intrinsic resistivity	$3.2 \cdot 10^5$	$\Omega \cdot \text{cm}$
Auger recombination coefficient C_n	$1.1 \cdot 10^{-30}$	cm^6 / s
Auger recombination coefficient C_p	$3 \cdot 10^{-31}$	cm^6 / s

3. Thermal properties

PROPERTY	VALUE	UNITS
Melting point	1414	$^{\circ}\text{C}$
	1687	K
Boiling point	3538	K
Specific heat	0.7	$\text{J} / (\text{g} \times ^{\circ}\text{C})$
Thermal conductivity [300K]	148	$\text{W} / (\text{m} \times \text{K})$
Thermal diffusivity	0.8	cm^2 / s
Thermal expansion, linear	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
Debye temperature	640	K
Temperature dependence of band gap	$-2.3 \cdot 10^{-4}$	eV/K
Heat of: <i>fusion / vaporization / atomization</i>	39.6 / 383.3 / 452	kJ / mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Electrical properties

PROPERTY	VALUE	UNITS
Breakdown field	$\approx 3 \cdot 10^5$	V/cm
Index of refraction	3.42	
Mobility electrons	≈ 1400	$\text{cm}^2 / (\text{V} \times \text{s})$
Mobility holes	≈ 450	$\text{cm}^2 / (\text{V} \times \text{s})$
Diffusion coefficient electrons	≈ 36	cm^2/s
Diffusion coefficient holes	≈ 12	cm^2/s
Electron thermal velocity	$2.3 \cdot 10^5$	m/s
Electronegativity	1.8	Pauling's
Hole thermal velocity	$1.65 \cdot 10^5$	m/s
Optical phonon energy	0.063	eV
Density of surface atoms	(100) 6.78	$10^{14}/\text{cm}^2$
	(110) 9.59	$10^{14}/\text{cm}^2$
	(111) 7.83	$10^{14}/\text{cm}^2$
Work function (intrinsic)	4.15	eV
Ionization Energies for Various Dopants	<i>Donors</i>	
	Sb 0.039	eV
	P 0.045	eV
	As 0.054	eV
	<i>Acceptors</i>	
	B 0.045	eV
	Al 0.067	eV
	Ga 0.072	eV
In 0.16	eV	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Mechanical properties

PROPERTY	VALUE	UNITS	
Bulk modulus of elasticity	$9.8 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2	
Density	2.329	g/cm^3	
Hardness	7	on the Mohs scale	
Surface microhardness (using Knoop's pyramid test)	1150	kg/mm^2	
Elastic constants	$C_{11} = 16.60 \cdot 10^{11}$ $C_{12} = 6.40 \cdot 10^{11}$ $C_{44} = 7.96 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2 dyn/cm^2 dyn/cm^2	
Bulk modulus of elasticity	$9.8 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2	
Young's Modulus (E)	[100]	129.5	GPa
	[110]	168.0	GPa
	[111]	186.5	GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คำสั่งที่ใช้ในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

ในส่วนของการจำลองแบบทางโครงสร้างและการทำงานของตัวอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์นั้น เราสามารถที่จะทำการแบ่งคำสั่งใช้งานออกได้เป็น 3 ส่วน คือ 1.คำสั่งที่ใช้สำหรับในการสร้างโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ 2.คำสั่งที่ใช้สำหรับในการกำหนด mesh และขั้วไฟฟ้าให้กับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ และ 3.คำสั่งที่ใช้สำหรับในการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ โดยตัวอย่างคำสั่งที่ใช้ในการจำลองแบบดังกล่าวจะแสดงดังต่อไปนี้

1. คำสั่งที่ใช้ในการสร้างโครงสร้าง

1.1 คำสั่งที่ใช้ในการกำหนด layout ให้กับโครงสร้าง

```
===== Layout Dimension =====
60000 CONT
#style #000000 stipple2
64000 NPLUS
#style #00ff00 stipple6
66000 SIM3D
#style black stipple3
=====
```

1.2 คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง

```
===== Process Flow =====
environment (title : "Magnetic Sensor", save : true, grid : true, debug : false, check1d :
false, analytical : false, simulator : sde, mask : Struct {
  masktype : prolyt;
  maskfile : "";
  scale : 1;
  domain : "";
  dimension : 1;
  stretch : "";
}, region : "SIM3D", coordinate_shift : true, output : "n1", node : "1", side : front,
graphics : true, depth : 200 um, user_grid : default, grid_refinement : Struct {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dios : "repl(cont(maxtrl=5,RefineGradient=-6,RefineMaximum=0,RefineJunction=-
6,RefineBoundary=-6));
sprocess : "";
sde : "";
tsuprem4 : "";
}, tsuprem4_delta_vertical : 0.5 um, tsuprem4_delta_horizontal : 0.5 um,
tsuprem4_min_vertical : 0.1 um, tsuprem4_min_horizontal : 0.1 um);
substrate (material : "Silicon", dopant : "phosphorus", concentration : 1e14 /cm3,
resistivity : 0 ohm-cm, orientation : 100, type : default);
comment (text : "Added process flow header");
insert (dios : "
", sprocess : "
", sde : "
(define IsPType (lambda (Doping) (< Doping 0)))
(define IsNType (lambda (Doping) (not (IsPType Doping))))
(define ChooseDopant
(lambda (Doping DopantList) ; DopantList: (Donor Acceptor)
(if (IsNType Doping)
(list-ref DopantList 0)
(list-ref DopantList 1)
)
)
)
(define ActiveConcentration (lambda (Dopant) (string-append Dopant
\ActiveConcentration\ " )))

(define DopantList (list \Phosphorus\ \Boron\ " ))

(define Xj 0.5)
(define NDope 5e19)
(define PDope -1e20)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(define NDopant (ChooseDopant NDope DopantList))
(define PDopant (ChooseDopant PDope DopantList))
", tsuprem4 : "

");
insert (dios : "

", sprocess : "

", sde : "
(sdedr:define-gaussian-profile
  \"DP.IMP2\" (ActiveConcentration NDopant)
  \"PeakPos\" 0
  \"PeakVal\" (abs NDope)
  \"ValueAtDepth\" 1e14
  \"Depth\" Xj
  \"Erf\" \"Factor\" 0.8)
(sdedr:define-gaussian-profile
  \"DP.IMP1\" (ActiveConcentration PDopant)
  \"PeakPos\" 0
  \"PeakVal\" (abs PDope)
  \"ValueAtDepth\" 1e14
  \"Depth\" Xj
  \"Erf\" \"Factor\" 0.8)
", tsuprem4 : "

");
pattern (layer : "NPLUS", polarity : dark_field, thickness : 2 um, side : front, type :
default);
insert (dios : "

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

", sprocess : "

", sde : "
(sdepe:implant \"DP.IMP2\" )
", tsuprem4 : "

");
anneal (time : 30 min, temperature : 900 degC, pressure : 1 atm, nitrogen : 0 l/min,
hydrogen : 0 l/min, oxygen : 0 l/min, hcl : 0 l/min, n2o : 0 l/min, steam_temperature
: 0 degC, watersteam : 0 %, pyrosteam : 0 %, side : both, type : default);
etch (material : "Resist", thickness : default, etch_type : strip, overetch : 0, etchstop :
"default", mat_coefs : default, beam_direction : "1 0 0", beam_factor : 1, time : 1.0
min, side : both, type : default);
deposit (material : "aluminum", thickness : 1 um, dopant : "default", concentration : ""
/cm3, side : both, deposition_type : isotropic, type : default);
pattern (layer : "CONT", polarity : light_field, thickness : 2 um, side : front, type :
default);
etch (material : "aluminum", thickness : 1 um, etch_type : anisotropic, overetch : 0,
etchstop : "default", mat_coefs : default, beam_direction : "1 0 0", beam_factor : 1,
time : 1.0 min, side : both, type : default);
etch (material : "resist", thickness : default, etch_type : strip, overetch : 0, etchstop :
"default", mat_coefs : default, beam_direction : "1 0 0", beam_factor : 1, time : 1.0
min, side : both, type : default);

```

2. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนด mesh และขีดไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง

```

===== Mesh Refinements Box =====
(sde:open-model "n@previous@.sat")
(define MeshFactor 1.0)
; ===== Utilities functions =====
(define wy-refine-profile-in-material (lambda (mat dx dy dz) (begin
(sdedr:define-refinement-size
(string-append "RSize.Profile." mat)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

1000 1000 1000
dx dy dz)
(sdedr:define-refinement-material
  (string-append "RP.Profile." mat)
  (string-append "RSize.Profile." mat)
  mat)
(sdedr:define-refinement-function
  (string-append "RSize.Profile." mat)
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
)))

(define wy-define-refinement-size (lambda (name maxx maxy minx miny) (begin
  (sdedr:define-refinement-size
    name (* maxx MeshFactor) (* maxy MeshFactor) (* minx MeshFactor) (* miny
  MeshFactor))
  )))

; ===== Refinements =====
(wy-refine-profile-in-material "Silicon" 0.1 0.1 0.1)

;-----
; Refinement Boxes
;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.Emitter3"
  "Cuboid" (position 0 0 100) (position 17 7 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Emitter3"
  2.0 2.0 2.0
  0.5 0.5 0.5 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Emitter3"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Emitter3" "RS.Emitter3" "RW.Emitter3" )

```

```

;-----

; ===== Contacts =====
;- C1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "C1" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "C1")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 3 3 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 3 3 200.5)))

;- C2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "C2" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "C2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 13 3 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 13 3 200.5)))

;- substrate contact:
(define dfbool (sdegeo:get-default-boolean))
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
(sdegeo:create-cuboid (position -17 -7 -200.0)
(position 17 7 @<200.0-Thick>@) "Metal" "SubstrateCut")

(sdegeo:define-contact-set "substrate" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "substrate")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 1.0 1.0 0.1)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 1.0 1.0 0.1)))
(sdegeo:set-default-boolean dfbool)

; ===== Save structure=====
; Save BND file
(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "@tdrboundary/o@")

; Save CMD file
(sdedr:write-cmd-file "@commands/o@")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; Build Mesh
```

```
(system:command "snmesh n@node@_msh")
```

```
=====
```

3. คำสั่งสำหรับจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง

```
===== Bias Constant Current =====
```

```
#if @lcVc@ == 0
```

```
#noexec
```

```
#endif
```

```
!(
```

```
if { "@Type@" == "npn" } {
```

```
  set Sign 1.0
```

```
  set HFS1 "eHighFieldSaturation"
```

```
  set HFS2 "hHighFieldSaturation"
```

```
  set HYDRO "Hydrodynamic"
```

```
  set IMPACT "eAvalanche(Okuto) hAvalanche(Okuto)"
```

```
  set EQNS "Poisson Electron Hole"
```

```
} else {
```

```
  set Sign -1.0
```

```
  set HFS1 "hHighFieldSaturation"
```

```
  set HFS2 "eHighFieldSaturation"
```

```
  set HYDRO "Hydrodynamic"
```

```
  set IMPACT "hAvalanche(Okuto) eAvalanche(Okuto)"
```

```
  set EQNS "Poisson Electron Hole"
```

```
}
```

```
)!
```

```
Electrode {
```

```
  { Name="C1" Voltage=0.0 }
```

```
  { Name="C2" Voltage=0.0 }
```

```
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

File {
  * Input Files
  Grid      = "@tdr@"
  Parameter = "@parameter@"
  * Output Files
  Current   = "@plot@"
  Plot      = "@tdrdata@"
  Output    = "@log@"
}

Physics {
  EffectiveIntrinsicDensity( Slotboom )
  Mobility (
    DopingDep(Masetti)
    !(puts $HFS1)!
    !(puts $HFS2)!
  )
  Recombination (
    Auger
    SRH(DopingDep)
  )
  MagneticField = ( 0.0, @BField@, 0.0 )
}

Physics (MaterialInterface="Oxide/Silicon") {
  Recombination(surfaceSRH)
}

```

```

Plot {
  eDensity hDensity
  eCurrent/Vector hCurrent/Vector
  Current/Vector
  ElectricField

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eQuasiFermi hQuasiFermi
egradQuasiFermi hgradQuasiFermi
Potential Doping SpaceCharge
SRH Auger
eMobility hMobility
DonorConcentration AcceptorConcentration
Doping
eVelocity hVelocity
ConductionBandEnergy ValanceBandEnergy BandGap
eQuasiFermi hQuasiFermi
SurfaceRecombination
Polarization/Vector
}
Math {
Iterations = 25
Notdamped = 100
RelErrControl
ErRef(Electron)=1.e10
ErRef(Hole)=1.e10
}
Solve {
* Initial Guess
# Coupled (LineSearchDamping=0.01) { Poisson }
Coupled ( Iterations=25 ) { Poisson }
Coupled { Poisson Electron Hole }

* Initial base ramp
Quasistationary (
InitialStep=1e-2 Minstep=1e-5 MaxStep=0.5 Increment=5
Goal { Name="C1" Voltage=!(puts [expr $Sign*@Vinit@])!}
){ Coupled { !(puts $EQNS)! } }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* Change base to current mode

Set ("C1" mode Current)

*- Ramp base to lbmin

```
NewCurrentFile= "IcVcE_v2_newd_01"
Quasistationary (
InitialStep=1e-6 Increment=10
  Minstep=1e-8 MaxStep=0.3
  Goal { Name="C1" Current=! (puts [expr $Sign*@lc1@])! }
){ Coupled { !(puts $EQNS)! }
  CurrentPlot ( Time = (Range = (0.0 0.2) Intervals=10;
                    Range = (0.2 1.0) Intervals=20))
}
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Y. Chemthung, T. Phetchakul, and A. Poyai “Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 15th (ECTI-CON 2018), 18-21 July, Chiang Rai, Thailand, 2018.
2. T. Phetchakul, Y. Chemthung, and A. Poyai “Effect of Aspect Ratio on Horizontal Field Magnetoresistance” International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials 8th (ICAMEM2019), April 18–19, HongKong, China, 2019.





2018 ECTI-CON

18-21 JULY 2018,
CHIANG RAI, THAILAND

15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL
ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER,
TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LANNA
CONFERENCE VENUE : WIANG INN HOTEL

Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance

Yothin Chemthung, Toempong Phetchakul

Department of Electronics, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand.
chemthung@gmail.com, toempong.ph@kmitl.ac.th

Amporn Poyai

Thai Microelectronics center
National Electronics and Computer Technology Center
Chachoengsao, Thailand.
amporn.poyai@nectec.or.th

Abstract—The effect of horizontal magnetic field on magnetoresistance was studied by TCAD simulation. At low concentration 10^{14} and 10^{15} cm^{-3} , the magnetoresistance linearly depends on magnetic field density and direction. The percent of magnetoresistance (%MR) of this study is less than 1 % at biased current 1 mA, 0.5 T. The unbalance between Lorentz's force F_L and Hall electrical force F_H causes this effect. The positive and negative % MR of magnetic field in $-y$ and y direction are caused by $F_L > F_H$. At the high concentration 10^{16} - 10^{19} cm^{-3} , the Lorentz's force and Hall electrical force are nearly equal. The magnetoresistance is a little bit positive both in $-y$ and y magnetic field direction which are caused by $F_L > F_H$ and $F_H > F_L$, respectively.

Keywords—Magnetoresistance; Horizontal Magnetic Field; TCAD; Hall Effect

I. INTRODUCTION

Hall Effect and magnetoresistance effect are coupled to each other [1-3]. For non-magnetic material planar device structure, magnetoresistance can be explained clearly. The planar device will detect the magnetic field in the direction of the magnetic field perpendicular to the surface device in planar. However, for the vertical device which also fabricated in planar technology, for example vertical Hall device which detects the horizontal magnetic field, magnetoresistance effect is hard to explain clearly as in the case of planar device. This is due to the vertical structure current density distribution along the cross section is not uniform as in the case of planar device. From this reason, magnetoresistance effect from horizontal magnetic field is not clearly as in the case of vertical magnetic field.

In this paper, the magnetoresistance effect from horizontal magnetic field is studied. The tool of this study is by TCAD device simulation which uses the standard commercial TCAD Sentaurus program [4-6] which magnetic field model is available. It will help to understand the complexity of horizontal magnetic field on magnetoresistance even more.

II. MAGNETORESISTANCE EFFECT AND TCAD SENTSAURUS

A. Magnetoresistance Effect in non-magnetic material

The magnetoresistance is the effect of magnetic field pass through material causes resistance change. For non-magnetic

material, this effect is a part of effect of Hall effect. The resistance has changed from the current path deflection. It will occur when the induced force from Hall electric field is less than the induced Lorentz's force from magnetic field cross the current. This will happen when the geometry of Hall plate is designed the length shorter than width for several times. It is called geometry magnetoresistance [1-3]. The deflection current increases the path length that causes the resistance increasing. The common shapes are designed in circle shape called Carbinio disc and rectangular shape that length is shorter than width. These devices are fabricated in planar technology and detect magnetic field in vertical direction perpendicular to planar surface.

However, the vertical device that detects horizontal magnetic field, the current flow in parallel with surface and horizontal magnetic field perpendicular to current. The Hall electric field is induced in vertical bulk. For example, the 5-contact vertical Hall device [7], the mechanisms are explained by Hall effect in vertical direction and magnetoresistance. Both effects helped to cause Hall voltages between sensing terminals. The structure of vertical Hall is shown in Fig.1 (a). Mostly, the mechanism of vertical Hall is explained by Hall effect [7, 8] in vertical bulk by horizontal magnetic field and surface currents that are opposite direction and induced opposite Hall voltages between sensing contacts. When the opposite horizontal magnetic field is applied, the opposite voltages are induced at contacts. The relation of magnetic field density and output voltage is linearly dependence. However, the output voltages are included the magnetoresistance effect [9]. That apparently is the three terminals vertical Hall structure [10] that is shown in Fig. 1(b). In this case, output voltages are caused by magnetoresistance effect only. For this study, only the effect of magnetoresistance by horizontal magnetic field will be focused.

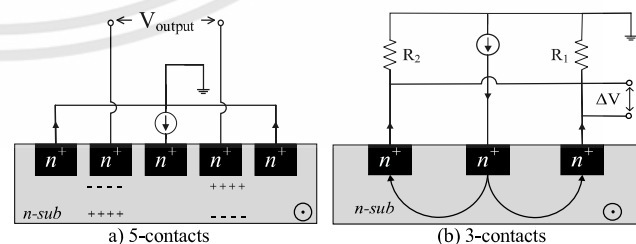


Fig. 1. The vertical Hall device.

B. TCAD Sentaurus

The magnetoresistance is studied by simulation. The standard simulation TCAD Sentaurus [4-6] is used for this study. This program is general used in standard micro/nano electronic processes and devices. In addition to the electrical properties, this program also has magnetic models available. The current density with magnetic field density dependence model used for this study is explain as

$$\vec{J}_a = \mu_a \vec{g}_a + \mu_a \frac{I}{1 + (\mu_a^* B)^2} \cdot [\mu_a^* \vec{B} \times \vec{g}_a + \mu_a^* \vec{B} \times (\mu_a^* \vec{B} \times \vec{g}_a)] \quad (1)$$

where a is n or p , J_a is carrier current density, \vec{g}_a is current vector without mobility, μ_a^* is the Hall mobility, \vec{B} is the magnetic induction vector and B is the magnitude of vector.

III. EXPERIMENT

The resistor structure that uses in this study is shown in Fig. 2. The resistor material is n type silicon. The resistor is $5 \mu\text{m}$ long and $7 \mu\text{m}$ wide with two contacts ($5 \times 5 \mu\text{m}^2$) at the end. The substrate thickness $100 \mu\text{m}$ is as resistor depth for current distribution freely without any well but the width is limited within $7 \mu\text{m}$. The junction depth at ohmic contact is $0.5 \mu\text{m}$.

The resistor is biased by constant current source 0.5 , 1.0 and 3 mA . The substrate concentrations are varied at 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} and 10^{19} cm^{-3} . The magnetic field is applied in y and $-y$ direction from $0 - 0.5 \text{ T}$. The percent of resistance change $\%MR(B)$ is

$$\%MR(B) = \% \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \times 100\% \quad (2)$$

where $R(B)$ is resistance when applied magnetic field, $R(0)$ is resistance when no magnetic field applied, ΔR is the resistance change.

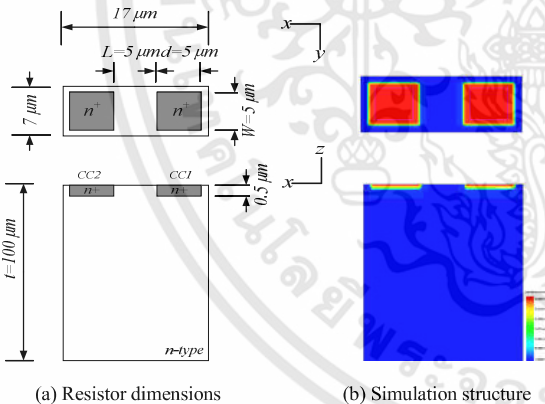


Fig. 2. Resistor structure.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The resistance was measured when applied magnetic fields are in parallel direction. The biased currents are 0.5 , 1 and 3 mA while the substrate concentrations are 10^{14} , 10^{15} , 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} and 10^{19} cm^{-3} . Figure 3 shows the results of magnetoresistance response $R(B)$ at various concentrations and substrate currents. The percent of magnetoresistance and resistance at biased current 1 mA are shown in Table 1. From

the results, it is convenience to divide graphs in two groups. The first group is low concentrations that are 10^{14} and 10^{15} cm^{-3} and the second group is high concentrations that are 10^{16} , 10^{17} , 10^{18} and 10^{19} cm^{-3} . It shows that at low concentration, the graphs are linearly dependence. The resistance increases when magnetic fields are applied in $-y$ direction and decreases when magnetic fields are applied in y direction. At the high concentrations, the magnetoresistance does not response. Figure 4 shows the percent of magnetoresistance change $\%MR(B)$. The percent of magnetoresistance change is positive and negative when magnetic field is $-y$ and $+y$ direction at low concentration, respectively. For high concentrations, the $\%MR(B)$ are positive in both directions. The maximum $\%MR(B)$ is less than 1% for low concentration and less than 0.2% for high concentration.

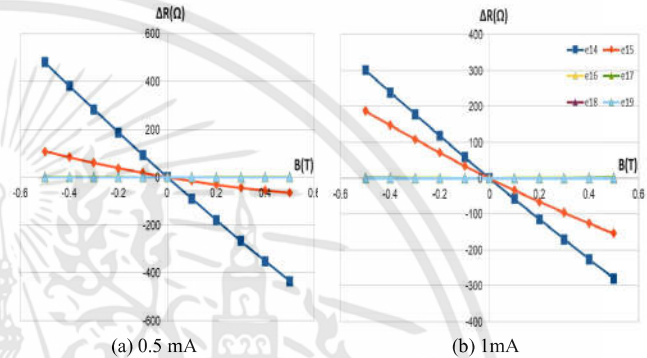


Fig. 3. Magnetoresistance responses.

Table I. Magnetoresistance and $\%MR(B)$ at biased current 1 mA .

Magnetic field (T)	Doping Concentration					
	10^{14} cm^{-3}			10^{17} cm^{-3}		
	$R(B)/(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR$	$R(B)/(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR$
0.5	75295	-280	-0.37	158.55	0.09	0.06
0.4	75349	-225	-0.29	158.52	0.06	0.04
0.3	75405	-170	-0.22	158.49	0.03	0.02
0.2	75461	-114	-0.15	158.47	0.01	0.009
0.1	75517	-57	-0.07	158.46	0.003	0.002
0	75575	0	0	158.45	0	0
-0.1	75633	58	0.07	158.46	0.004	0.002
-0.2	75693	117	0.15	158.47	0.01	0.01
-0.3	75753	178	0.23	158.49	0.03	0.02
-0.4	75814	239	0.31	158.52	0.06	0.04
-0.5	75876	301	0.39	158.55	0.10	0.06

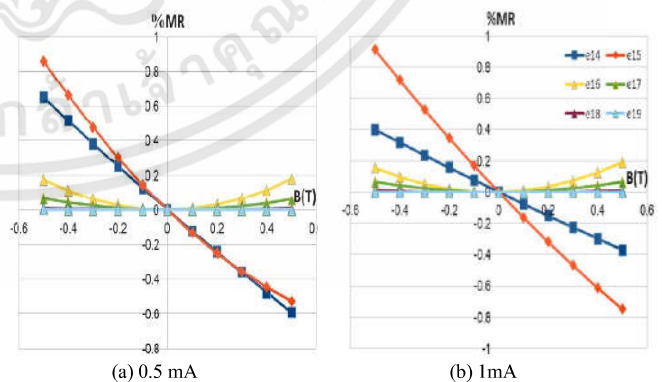


Fig. 4. $\%MR(B)$ of resistor.

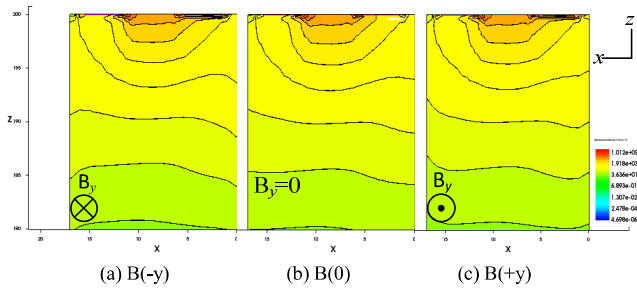


Fig. 5. Current density distributions at low concentration substrate 10^{14}cm^{-3} .

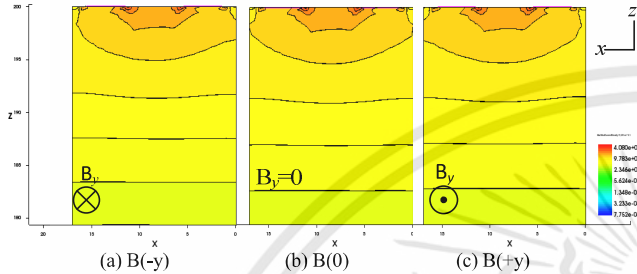


Fig. 6. Current density distributions at high concentration substrate 10^{17}cm^{-3} .

The current distributions are shown in Fig. 5 and Fig. 6. Figure 5 is the low concentration at 10^{14}cm^{-3} . The current density distribution changes with the magnetic field. In $-y$ direction magnetic field in Fig. 5(a), the distribution of current density distributes into the bottom than it does not get the magnetic field, Fig. 5(b). On the other hand in Fig. 5(c), the opposite direction the current density distributes into the upper than in the case of no applied magnetic field. Figure 6 is the high concentration at 10^{17}cm^{-3} . The current density distribution does not change with the magnetic field. They look similar in all, when magnetic field and no magnetic field are applied.

The potential distributions in low and high concentrations are shown in Fig. 7 and 8, respectively. The low concentration changes the equipotential line with the magnetic field while the high concentration changes very slightly. Figure 7(a) shows that when magnetic field are applied in $-y$ direction, the equipotential lines tilt to $-x$ direction and when magnetic field are applied in y direction, Fig. 7(c), the equipotential lines tilt to $+x$ direction. They are observed the deviation of equipotential lines in the case of high concentration as shown in Fig. 8.

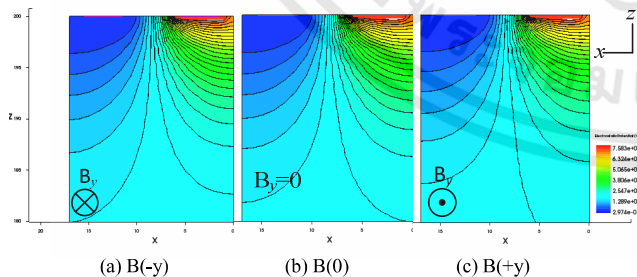


Fig. 7. Potential distributions at low concentration substrate 10^{14}cm^{-3} .

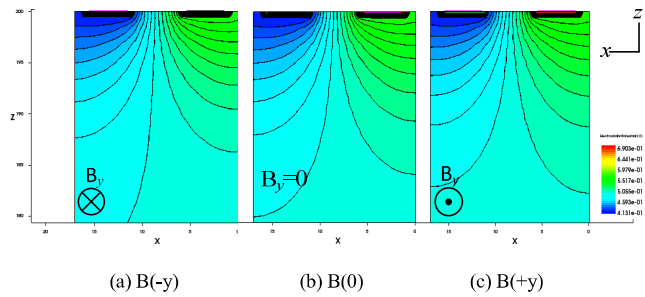


Fig. 8. Potential distributions at high concentration substrate 10^{17}cm^{-3} .

From the experiment results, it can be divided into two cases, low concentrations ($10^{14}, 10^{15}\text{cm}^{-3}$) and high concentrations ($10^{16}-10^{19}\text{cm}^{-3}$). Figure 9 shows the proposed model of magnetoresistance mechanism at low concentration. Figure 9 (b) is the case of no magnetic field applied, the constant current pass through from the right to the left contact. The electron currents path flow from the left to the right as shown in figure 9 (b). Figure 9 (a) is the case of magnetic field biased in the $-y$ direction. The induced Lorentz's force

$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$ act upon the electrons in $-z$ direction. Meanwhile the Hall electric field is induced in the opposite z direction. The force from Hall electric field $\vec{F} = q\vec{E}$ in bulk, in this case, is less than Lorentz's force ($F_L > F_H$) causes the electron current paths distribute deeper into the bottom ($-z$ direction) according to the Lorentz's force and increases resistance. On the other hand in Fig. 9(c), when the magnetic field is applied in y direction, the Lorentz's force F_L is induced to the surface in z direction. The Hall electric field F_H is induced into the bottom in $-z$ direction. In this case, the force from electric field F_H are less than Lorentz's force again ($F_L > F_H$) and electron current paths distribute up to the surface according to the total force. The reason that why the two forces are not balance unlike the rectangular case because this case is parallel field, the cross section structure must be considered rather than top view rectangular structure. The unbalance cross section structure causes the unbalance forces.

Figure 10 shows the mechanism of magnetoresistance at high concentration. Figure 10 (b) shows the electron current paths in the case of no magnetic field applied. In this case, the current distribution is near surface than the case of low concentration. When magnetic field is applied in $-y$ direction, Fig. 10(a), the Lorentz's force is induced in $-z$ direction and Hall electrical force is induced in z direction. The Hall force is nearly equal Lorentz's force but it can be observed that $\%MR$ is positive so that means Lorentz's force is greater than Hall electrical force a little bit. When the magnetic field is applied in y direction, Fig. 10(c), the Lorentz's force is induced in z direction and Hall electrical force is induced in $-z$ direction. The two forces are nearly equal but $\%MR$ is positive so the Hall force is greater than Lorentz's force a little bit. The magnetoresistance by horizontal magnetic field is caused by asymmetrical of cross section field current density which is different from the vertical magnetic field that is uniform current density in planar.

V. CONCLUSION

The magnetoresistance from horizontal magnetic field is studied by simulation. The structure is rectangular in planar process. The magnetoresistance shows linearly dependence with horizontal magnetic field at low concentration 10^{14} and 10^{15} cm^{-3} . The unsymmetrical cross section structure in z axis causes the unbalance between Lorentz's force and Hall electrical force that creates magnetoresistance. The Lorentz's force is greater than Hall electrical force; magnetoresistance is positive and negative in $-y$ and y magnetic field direction. The percent of magnetoresistance is less than 1%. On the other hand, the high concentration 10^{16} - 10^{19} cm^{-3} , magnetoresistance cannot be observed or very little. The main current density distributes near the surface. The Lorentz's force and Hall electrical force are nearly equal. The magnetoresistance is positive both in $-y$ and y magnetic field direction. It means that in $-y$ direction, Lorentz's force is a little bit greater than Hall electrical force ($F_L > F_H$) and in y direction, Hall electrical force a little bit greater than Lorentz's force ($F_H > F_L$). The percent of magnetoresistance is less than 0.2 % at current 1 mA and magnetic field density 0.5 T.

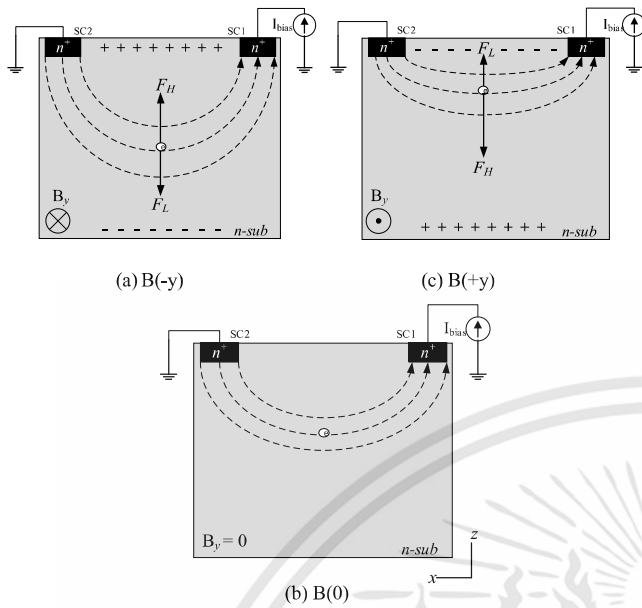


Fig. 9. The proposed model of magnetoresistance mechanism at low concentration.

REFERENCES

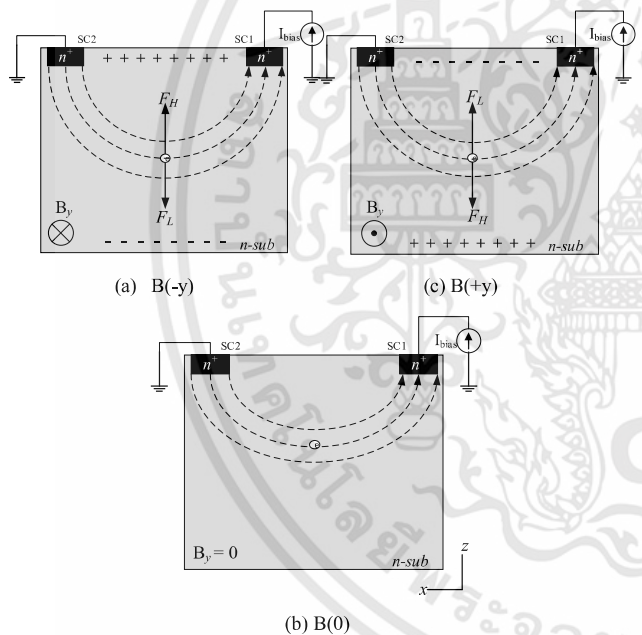


Fig. 10. The proposed model of magnetoresistance mechanism at high concentration

- [1] R. S. Popovic, "Hall Effect Devices", 2nd ed., IoP Publishing Ltd., London, 2004.
- [2] C. S. Roumenin, "Solid State Magnetic Sensors" Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1994.
- [3] E. Ramsden, "Hall-Effect Sensors: Theory and Applications", Elsevier Inc., USA, 2006.
- [4] TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version L-2016.03.
- [5] S. Li and Y. Fu, "3D TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics", Springer New York, 2012.
- [6] C. K. Maiti, "Introduction Technology Computer-Aided Design (TCAD)", Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., USA, 2017.
- [7] A. M. Huizer and H. P. Baltes, "Numerical modeling of vertical Hall-effect devices" IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-5, pp. 482-484, 1984.
- [8] R. S. Popovic, The Vertical Hall-Effect Device, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. EDL-5, No. 9, 1984.
- [9] T. Phetchakul, S. Poosawat and A. Poyai, "The effect of deviation current to 5-contacts vertical Hall device", ECTI-CON 2016, 28 Jun-1 Jul, Chiang Mai, Thailand.
- [10] S. V. Lozanova and C. S. Roumein, "Parallel-Field Silicon Hall Effect Microsensors with Minimal Design Complexity", IEEE Sensors Journal., vol. 9, No. 7, 2009.

Advanced Materials and Engineering Materials VIII

8th International Conference on Advanced
Materials and Engineering Materials
(ICAMEM 2019)

Edited by
Prof. Peng Sheng Wei

TTP TRANS TECH PUBLICATIONS

Effect of Aspect Ratio on Horizontal Field Magnetoresistance

Toempong Phetchakul^{1,a}, Yothin Chemthung^{1,b} and Amporn Poyai^{2,c}

¹Electronic Department, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

²Thai Microelectronics Center,
National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand.

^atoempong.ph@kmitl.ac.th, ^b57601185@kmitl.ac.th, ^camporn.poyai@nectec.or.th

Keywords: magnetoresistance, magnetic sensor, Hall Effect, horizontal magnetic field, TCAD.

Abstract. This paper studies the aspect ratio (W/L), width (W) per length (L) of semiconductor resistor based on Hall effect current mode for horizontal magnetic field. At low concentration, 10^{14} cm^{-3} , $W/L < 1$, the length has direct effect to magnetoresistance. The $W/L = 1$, the large resistor provides magnetoresistance better than small device. The $W/L > 1$, the width has inversely proportional to magnetoresistance. The $\%MR(B)$ is around 1 % at 0.5 T, 1 mA. The long resistor ($W/L < 1$) can create ΔR in the order of several kilo ohms and several hundred ohms for short resistor ($W/L > 1$). The contribution factors $\rho(L/W)$ for high ΔR are low concentration and aspect ratio ($W/L < 1$). The high $\%MR(B)$ is contributed by high current density of short structure ($W/L > 1$). At high concentration 10^{17} cm^{-3} , aspect ratio and magnetoresistance are not sensitive to magnetic field because the Hall effect hardly occurs in high concentration material.

Introduction

Magnetoresistance for non-ferromagnetic material is a phenomenon of Hall effect in current mode. There are some discussions of this effect [1-3], however, the explanation is limit to vertical magnetic detection only which is perpendicular to the current on planar structure. The mechanism is the current path is longer according to Lorentz's force when applied magnetic field. It is so clear due to the symmetry and planar structure. However, the magnetoresistance from horizontal magnetic field is so little discussion. It may be so difficult than vertical field because the horizontal field will act with the vertical structure which is asymmetry current path structure. There are some mentions in the vertical Hall structure to describe this mechanism [4], but it is not the main phenomenon, only a supported phenomenon of Hall effect [5, 6]. Recently, the study of horizontal field of magnetoresistance was proposed [7]. The mechanism is caused by the unbalance between Lorentz's force F_L and Hall electrical force F_H in asymmetry cross section structure. This effect shows a small magnetoresistance effect by varying concentrations. In this study, the width W and length L in planar dimension are varied as aspect ratio W/L parameters for horizontal magnetic field response.

Device Structure and TCAD

The resistance of resistor can be defined as in Eq.1

$$R = \rho \frac{L}{A} = \left(\frac{\rho}{t}\right) \left(\frac{L}{W}\right) \quad (1)$$

where R is resistance, ρ is resistivity, L is length of resistor and A is cross section area of current. The cross section A can be rewritten into term of width (W) and effective thickness of current (t) which is appropriate average value that represent of depth corresponding to the cross section area A .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A. Device structure

The resistor is in rectangular shape as shown in Fig.1. The dimensions of device are defined as width W_d , length L_d and thickness T . W is the width of contact and L is the length between contacts which are the parameters as aspect ratio (W/L). In this study, $W/L < 1$, $W/L = 1$ and $W/L > 1$ are designed. The $W/L < 1$ are 5/25, 10/25, 5/50, 10/50 and 20/50 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$, $W/L = 1$ are 5/5, 10/10, 20/20 and 50/50 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ and $W/L > 1$ are 10/5, 20/5, 50/5 and 50/25 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. The thickness is constant 100 μm for current freely distribution into the bulk. The concentrations of resistor are 10^{14} cm^{-3} for low concentration or high resistivity and 10^{17} cm^{-3} for high concentration or low resistivity.

B. TCAD

The good method for study magnetoresistance is by TCAD [8, 9]. The advantage is that we can see the quantity distribution that real measurement cannot show it. Synopsis TCAD sentaurus is the standard commercial program for device and process simulation of micro/nanoelectronic technology [10, 11] which use as a tool for analysis. The magnetic model for semiconductor is explain as

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1+(\mu_\alpha^* B)^2} \left[\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha) \right] \quad (2)$$

where α is n or p type semiconductor, \vec{J}_α is carrier current density vector, \vec{g}_α is current vector without mobility, μ_α^* is the Hall mobility, \vec{B} is the magnetic induction vector and B is the magnitude of vector.

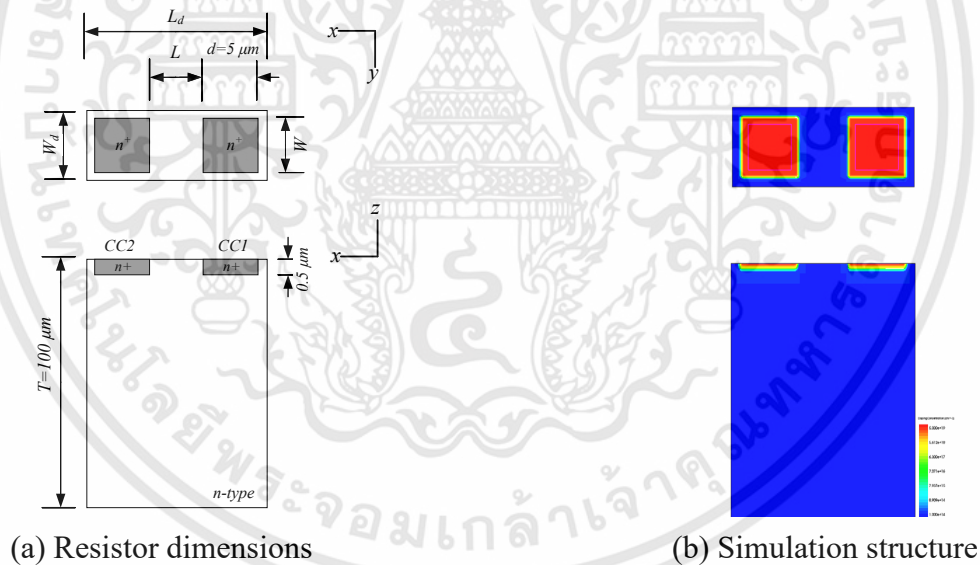


Fig. 1 Resistor structure.

Experiment, Results and Discussion

The resistors are biased by constant current source at 1 mA. The magnetic field is applied in y and $-y$ directions varied from 0 - 0.5 T. The outputs are resistance change ΔR and percent of resistance change $\%MR(B)$ which can be written as

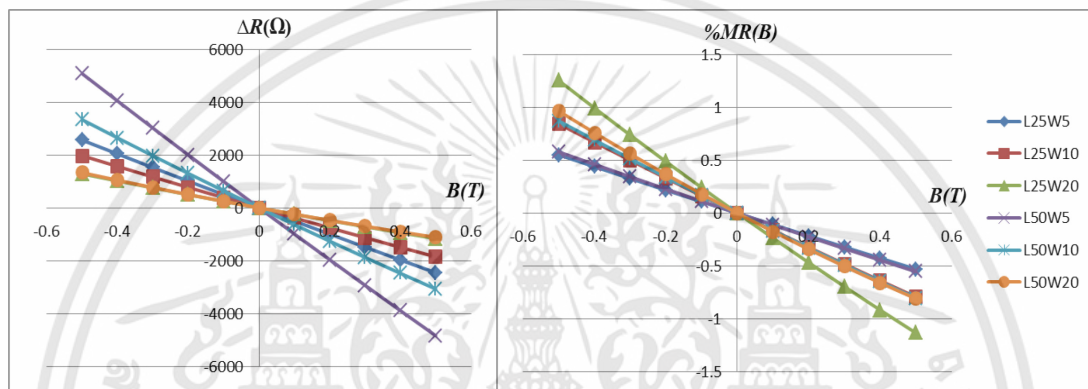
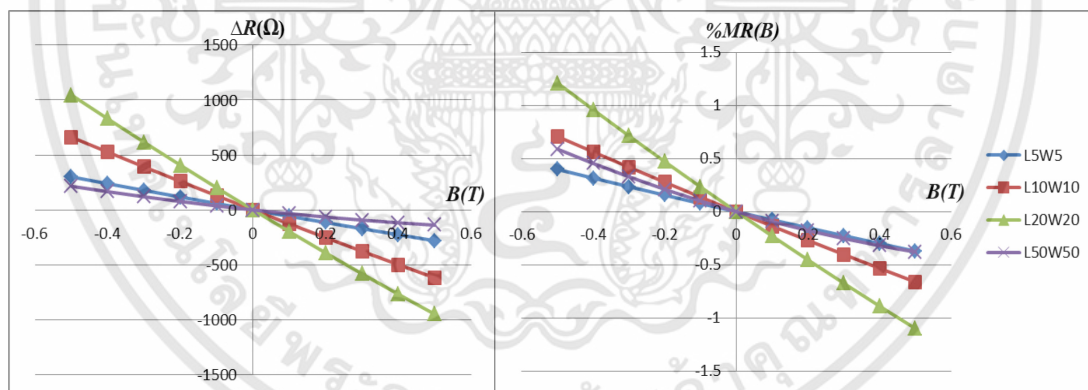
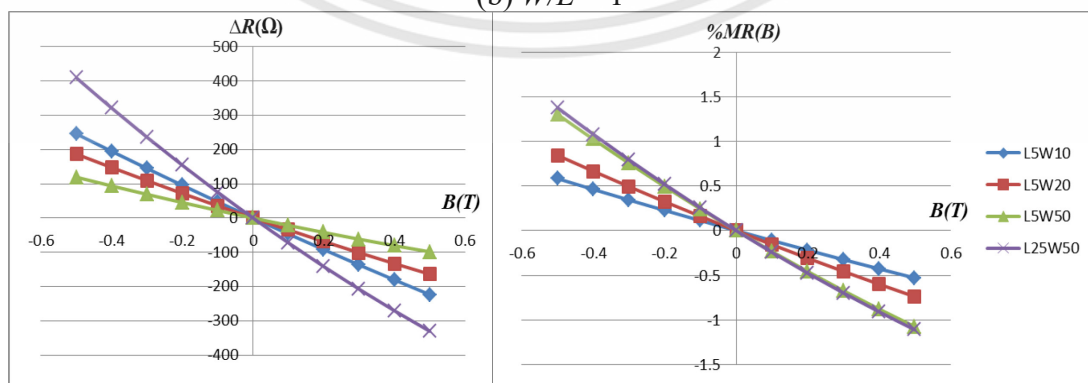
$$\%MR(B) = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \times 100 \quad (3)$$

where $R(B)$ is resistance while applied magnetic field, $R(0)$ is the resistance while no applied magnetic field.

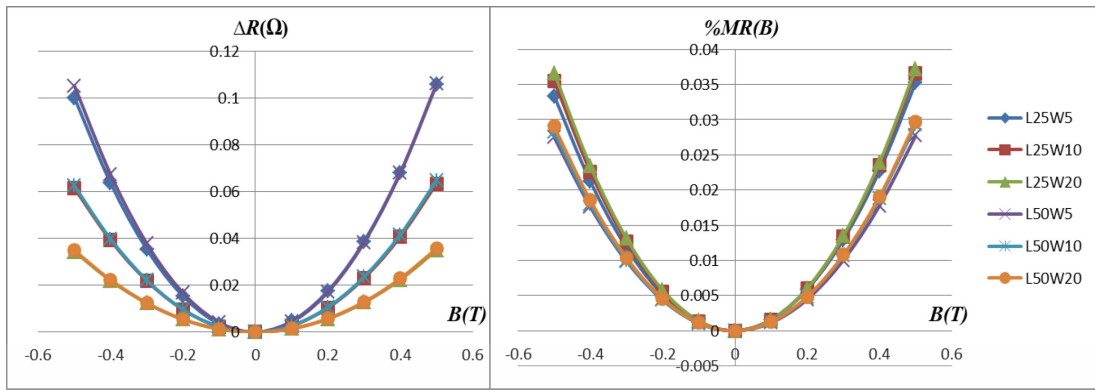
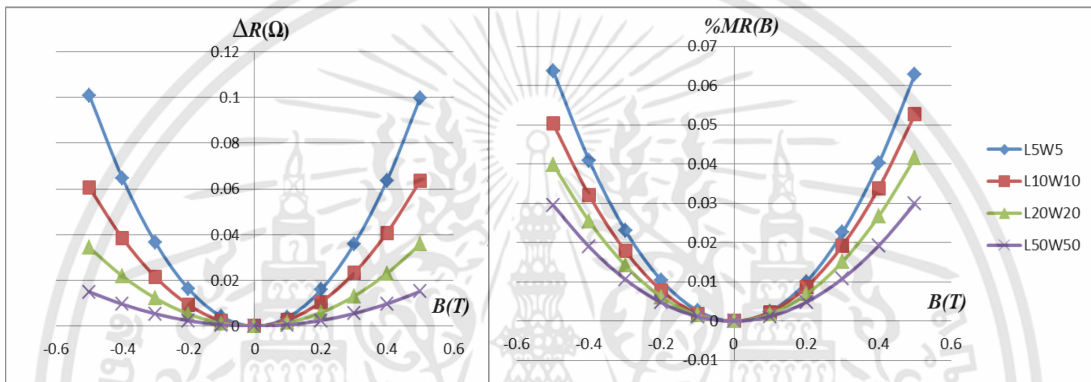
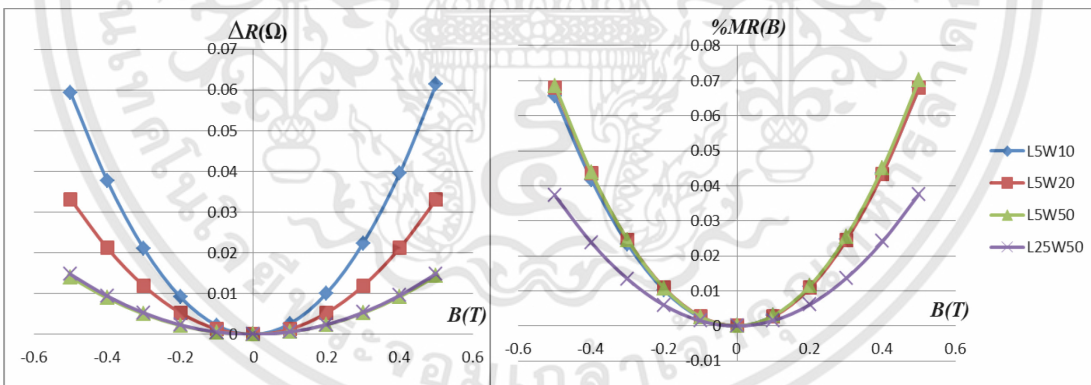
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig.2 and Fig. 3 are magnetoresistance responses of concentration 10^{14} and 10^{17} cm^{-3} which are ΔR and $\%MR(B)$, respectively. The representative comparable quantities of each aspect ratio of Fig. 2 and 3 are shown in Table 1 and 2, respectively.

At low concentration 10^{14} cm^{-3} from Fig. 2(a), $W/L < 1$, ΔR increases linearly with longer L or aspect ratio reducing. In the same aspect ratio, the larger resistor gives ΔR more than the smaller one. However, the $\%MR(B)$ calculation shows opposite results, the longer L gives $\%MR$ slightly less than the shorter L . It is in the range of 0.5 to 1 % means that magnetoresistance effect by horizontal magnetic field is not so much around 1 %. Even though the $\%MR(B)$ is not so much for long resistor ($W/L < 1$), it shows very large ΔR in the order several kilo ohms. The resistance values change significantly and clearly. The ΔR changes with the magnetic field density and direction. The mechanism explains by the vertical forces unbalance between Lorentz's force F_L and Hall electrical force F_H [7]. In this case F_L is more than F_H both in y and -y direction.

(a) $W/L < 1$ (b) $W/L = 1$ (c) $W/L > 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
 Fig. 2 Magnetoresistance and $\%MR(B)$ Responses at low substrate concentration 10^{14} cm^{-3} .
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) $W/L < 1$ (b) $W/L = 1$ (c) $W/L > 1$ Fig. 3 Magnetoresistance and $\%MR(B)$ Responses at high substrate concentration 10^{17} cm^{-3} .

In the case of aspect ratio $W/L = 1$ in Fig. 2(b), the resistance of devices are equal. The ΔR and $\%MR(B)$ of the larger resistor is better than the smaller one. The ΔR is in the range $500\Omega - 1k\Omega$, and $\%MR(B)$ is in the range $0.5 - 1\%$ which is the same as in the case $W/L < 1$. The ΔR changes significantly even though $\%MR(B)$ does not change so much. It is response to magnitude and direction of magnetic field. The mechanism is the same as describe before which $F_L > F_H$ [7].

In the case of aspect ratio $W/L > 1$ in Fig. 2(c), the resistance is lower than of the two cases before. The ΔR decreases with the increasing of aspect ratio or the wider resistor, the lower ΔR . In the same aspect ratio, the wider resistor shows ΔR better than the narrower one. The $\%MR(B)$ shows the opposite result, the wider resistor shows $\%MR(B)$ smaller than the narrower resistor. The $\%MR(B)$ range is the same as in the two cases before. Due to the smallest resistance condition, ΔR

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 ΔR and $\%MR(B)$ of concentration 10^{14} cm^{-3} (0.5 T, 1 mA).

Magnetic field (T)	Low concentration (10^{14} cm^{-3})					
	$W/L < 1(5/50)$		$W/L = 1(5/5)$		$W/L > 1(50/5)$	
	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR(B)$	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR(B)$	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR(B)$
0.5	-4835.0251	-0.5520	-280.0824	-0.3706	-98.5045	-1.0745
0.4	-3886.8300	-0.4438	-225.6352	-0.2985	-80.4813	-0.8779
0.3	-2929.2206	-0.3344	-170.3980	-0.2254	-61.6189	-0.6721
0.2	-1962.2051	-0.2240	-114.3768	-0.1513	-41.9174	-0.4572
0.1	-985.7945	-0.1125	-57.5767	-0.0761	-21.3774	-0.2331
0	0	0	0	0	0	0
-0.1	995.2438	0.1136	58.4410	0.0773	22.2129	0.2423
-0.2	1999.9219	0.2283	117.8323	0.1559	45.2589	0.4937
-0.3	3014.0024	0.3441	178.0688	0.2356	69.1348	0.7541
-0.4	4037.4567	0.4610	239.1333	0.3164	93.8369	1.0236
-0.5	5070.2534	0.5789	301.0166	0.3982	119.3608	1.3020

Table 2 ΔR and $\%MR(B)$ of concentration 10^{17} cm^{-3} (0.5T, 1 mA).

Magnetic field (T)	High concentration (10^{17} cm^{-3})					
	$W/L < 1(5/50)$		$W/L = 1(5/5)$		$W/L > 1(50/5)$	
	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR(B)$	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR(B)$	$\Delta R(\Omega)$	$\%MR(B)$
0.5	0.106016	0.027709	0.099565	0.062834	0.014365	0.070261
0.4	0.067929	0.017754	0.063618	0.040148	0.009223	0.045110
0.3	0.038278	0.010005	0.035684	0.022520	0.005214	0.025504
0.2	0.017071	0.004461	0.015768	0.009951	0.002341	0.011449
0.1	0.004311	0.001126	0.003873	0.002444	0.000602	0.002947
0	0	0	0	0	0	0
-0.1	0.004138	0.001081	0.004150	0.002619	0.000533	0.002606
-0.2	0.016726	0.004371	0.016322	0.010300	0.002201	0.010767
-0.3	0.037759	0.009869	0.036512	0.023042	0.005005	0.024479
-0.4	0.067234	0.017573	0.064716	0.040841	0.008943	0.043740
-0.5	0.105144	0.027481	0.100927	0.063693	0.014014	0.068544

is in the range of several hundred ohms. It still responses both magnitude and direction. The Lorentz's force F_L is greater than Hall electric force F_H [7].

Table 1 shows the selected of W/L condition. The $W/L < 1$, $W/L = 1$, $W/L > 1$ are 5/50, 5/5 and 50/5 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ of low concentration 10^{14} cm^{-3} . At 0.5 T 1 mA, when the length is longer from 5 to 50 μm , ΔR is changed from 300 Ω to 5k Ω and $\%MR(B)$ is changed from 0.39 to 0.57. When the width is changed from 5 to 50 μm , ΔR is decreased from 300 to 120 Ω but $\%MR(B)$ is increased from 0.39 to 1.30. They are so well according to $R = (\rho L/A) = (\rho/t).(L/W)$ in Eq.1. The resistance change ΔR come from the unbalance between Lorentz's force F_L and Hall electrical force F_H that will change the effective thickness Δt in Eq. 1 and will become as follow

$$R(B) = \rho \left(\frac{L}{W} \right) \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (4)$$

The ΔR and $\%MR(B)$ of long resistors ($W/L < 1$) from Table 1 are 5 kilo ohms and 0.57 % and short resistors ($W/L > 1$) are 119 ohms and 1.30 %, respectively. Even though the high ΔR of long resistor, the $\%MR(B)$ is less than that of short resistor. It comes from the factor $\rho(L/W)$ in Eq.2 which has resistivity greater than the short resistor. In the case of $W/L = 1$, 5/5 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ from Table 1, the ΔR and $\%MR(B)$ are 301 ohms and 0.39 %, respectively.

At concentration 10^{17} cm^{-3} from Fig.3, all aspect ratio $W/L < 1$, $W/L = 1$ and $W/L > 1$ are not response to magnetic field. ΔR and $\%MR(B)$ are very little changed less than 0.1 Ω and 0.02 % at

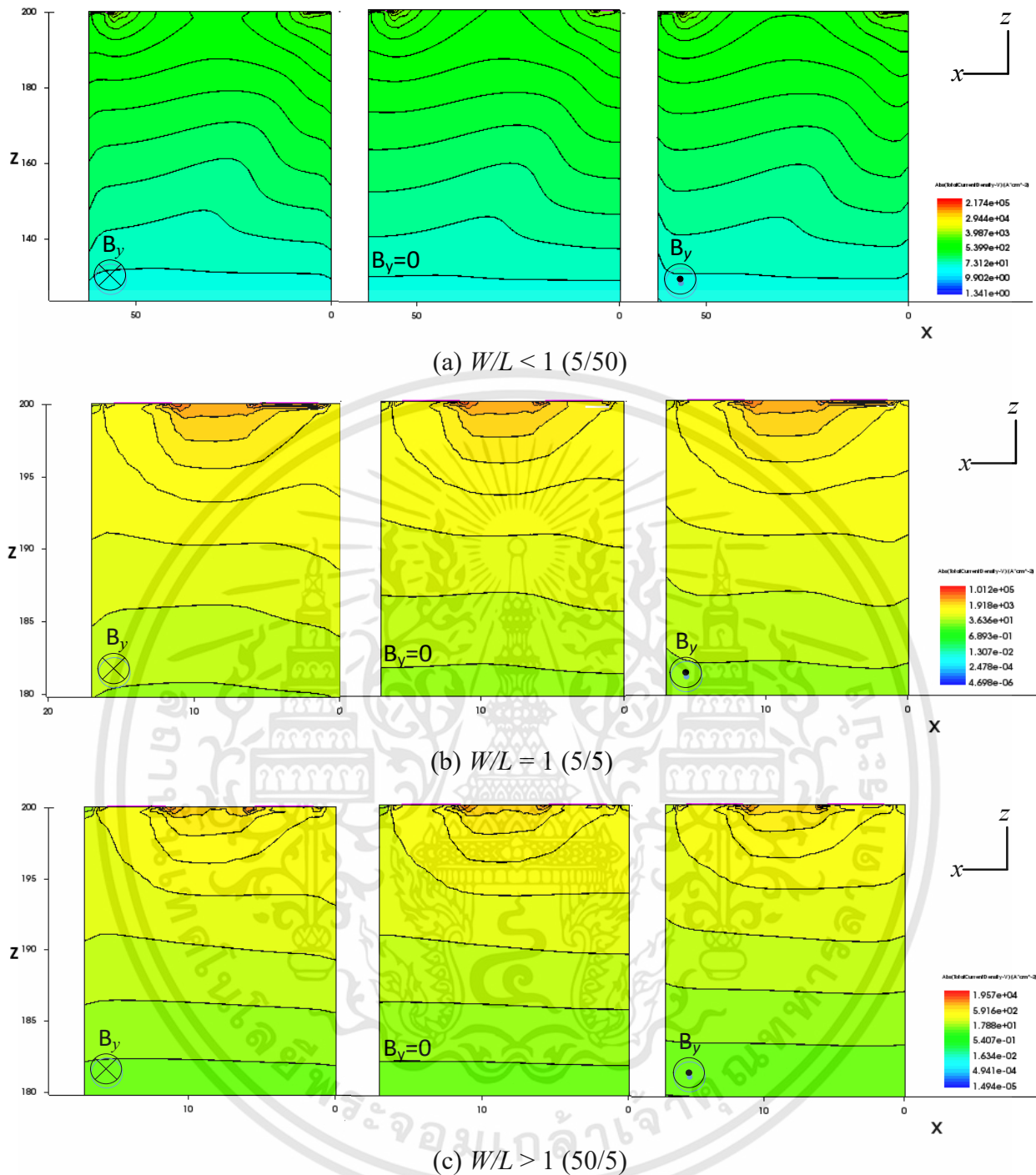


Fig.4 Current density distribution at low substrate concentration 10^{14} cm^{-3} .

0.5 T, 1 mA or we can say that they do not response with magnetic field. Table 2 shows the ΔR and $\%MR(B)$ that do not change with magnitude and direction of magnetic field.

Fig. 4 and 5 are cross section of current distribution of resistors. The aspect ratios (W/L) are the same as shown in Table 1 and 2 which are 5/50, 5/5 and 50/5 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. We observe that long resistor ($W/L < 1$) current is uniformly distributed deep into the bulk. The depth shown in Fig. 4(a) and 5(a) is 80 μm from the surface that current is relatively uniform entire area with no current crowding.

In short resistor ($W/L = 5/5, 50/5$) in Fig. 4 and 5 (b) and (c), the currents are mostly crowded on the surface and are not uniform distribution deep into the bulk. The ΔR in this case is mainly caused by Δt and current density distribution. Because the higher current density distribution from short structure, $\%MR(B)$ is higher than the long structure that has lower current density distribution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

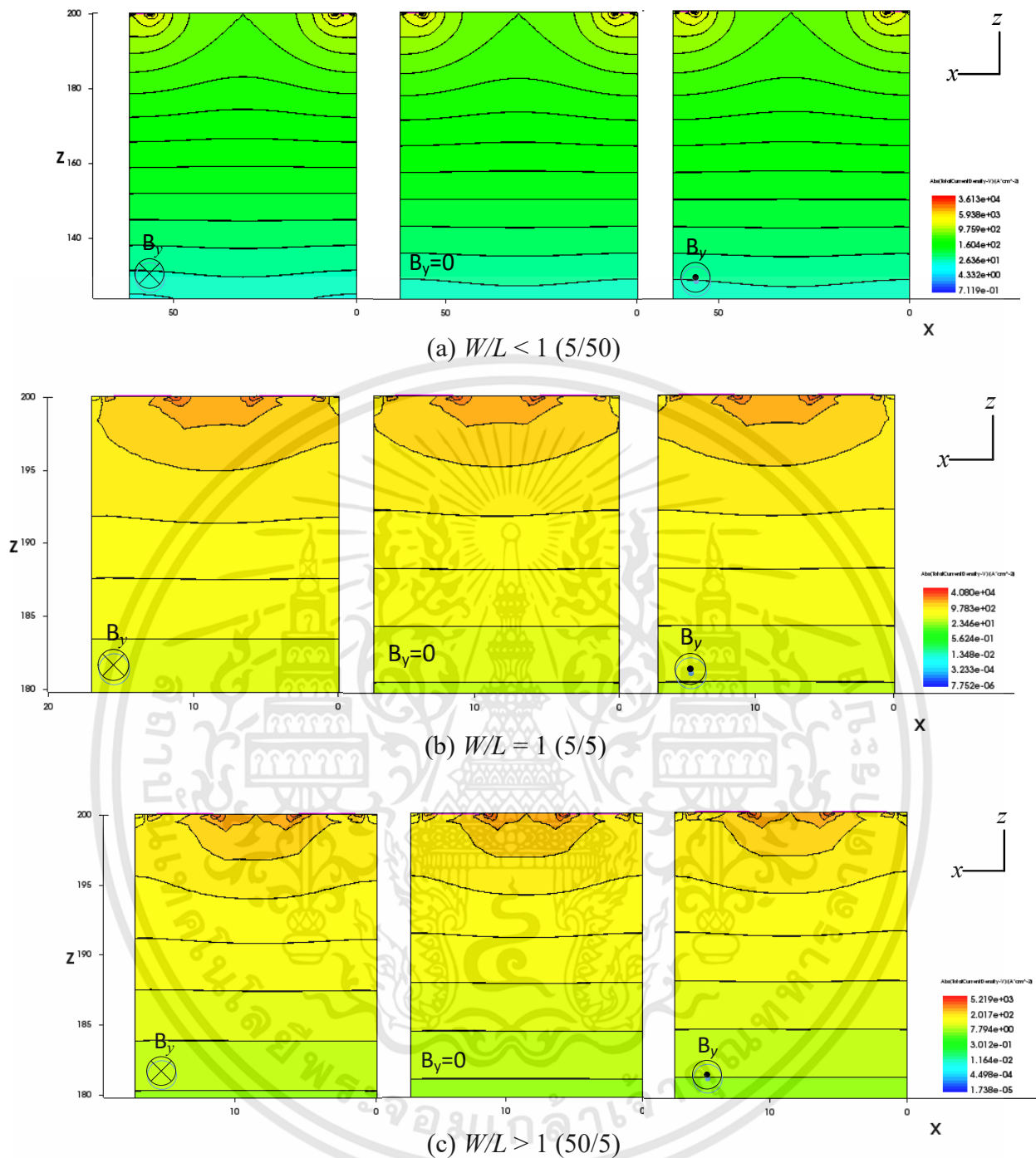


Fig.5 Current density distribution at high substrate concentration 10^{17} cm^{-3} .

Even though the higher $\%MR(B)$ of short structure but the $\rho(L/W)$ is lower so the total ΔR is less than long structure so much which are shown in Table 1.

On the other hand, at the high concentration 10^{17} cm^{-3} , even though the long and short current distribution are like in the case of low concentration that are long resistor current uniformly distribute deep into the bulk and short resistor currents are crowded on the surface but the magnetoresistance does not response to magnetic field. The current distribution does not change in magnitude and direction of magnetic field because the high concentration low resistance. The current distribution lines in Fig. 5 are flatter than low concentration so much. It looks like in the case of symmetry planar Hall effect device at high concentration. The Hall voltage cannot induce for high carrier concentration material such as high doping semiconductor and metal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Conclusion

The magnetoresistance by horizontal magnetic field affects the low concentration condition such as 10^{14} cm^{-3} more than high concentration 10^{17} cm^{-3} so much because the Hall effect hardly occurs for high concentration material. The $\%MR(B)$ is around 1 % in y and -y direction at 0.5 T, 1 mA in any aspect ratio. Only 1 $\%MR(B)$ can create significant resistance difference ΔR of the long resistor ($W/L < 1$) in several kilo ohms and several hundred ohms for short resistor ($W/L > 1$). The current distribution of long resistor is uniform deep into the bulk that gives $\%MR(B)$ lower than 1 %. The resistance difference ΔR mostly depend on factor $\rho(L/W)$ than $(I/\Delta t)$. In short resistor ($W/L > 1$), the currents are crowded near the surface and current density is much higher than long resistor and the effective Δt sensitive with horizontal field means that the short resistance that give $\%MR(B)$ more than 1 %. In this case, the main factor of resistance difference ΔR normally depends on $(I/\Delta t)$. The high concentration 10^{17} cm^{-3} , current distribution is very flat and current crowding occurs near surface for short resistor. It is similar to Hall effect in planar device that Hall voltage cannot induce in high concentration material. From this study, we can design the resistor for horizontal magnetic field by low concentration as possible and aspect ratio for high $\%MR(B)$.

Acknowledgement

The authors would like to thank Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial support of this research.

References

- [1] R. S. Popovic, Hall Effect Devices, 2nd ed., IoP Publishing Ltd., London, 2004.
- [2] C. S. Roumenin, "Solid State Magnetic Sensors" Elsevier Science B. V., Amsterdam, 1994.
- [3] E. Ramsden, "Hall-Effect Sensors: Theory and Applications", Elsevier Inc., USA, 2006.
- [4] R. S. Popovic, The Vertical Hall-Effect Device, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. EDL-5, No.9, 1984.
- [5] T. Phetchakul, S. Poosawat and A. Poyai, "The effect of deviation current to 5-contacts vertical Hall device", ECTI-CON 2016, 28 Jun-1 Jul, Chiang Mai, Thailand.
- [6] S. V. Lozanova and C. S. Roumein, "Parallel-Field Silicon Hall Effect Microsensors with Minimal Design Complexity", IEEE Sensors Journal, vol.9, No.7, 2009.
- [7] Y. Chemthung, T. Phetchakul and A. Poyai "Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance", ECTI-CON 2018, 18-21 Jul, Chiang Rai, Thailand.
- [8] S. Li and Y. Fu, "3D TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics", Springer New York, 2012.
- [9] A. M. Huizer and H. P. Baltes, "Numerical modeling of vertical Halleffect devices" IEEE Electron Device Lett., vol. EDL-5, pp. 482-484, 1984.
- [10] TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version L-2016.03.
- [11] C. K. Maiti, "Introduction Technology Computer-Aided Design (TCAD)", Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., USA, 2017.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย โยธิน แจ่มทุ่ง
 วัน เดือน ปีเกิด 17 สิงหาคม พ.ศ. 2525
 ที่อยู่ เลขที่ 92 หมู่ 5 ตำบลหนองหลวง อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร
 62170
 ประวัติการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Y. Chemthung, T. Phetchakul, and A. Poyai “Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 15th (ECTI-CON 2018), 18-21 July, Chiang Rai, Thailand, 2018.
2. T. Phetchakul, Y. Chemthung, and A. Poyai “Effect of Aspect Ratio on Horizontal Field Magnetoresistance” International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials 8th (ICAMEM2019), April 18–19, HongKong, China, 2019.