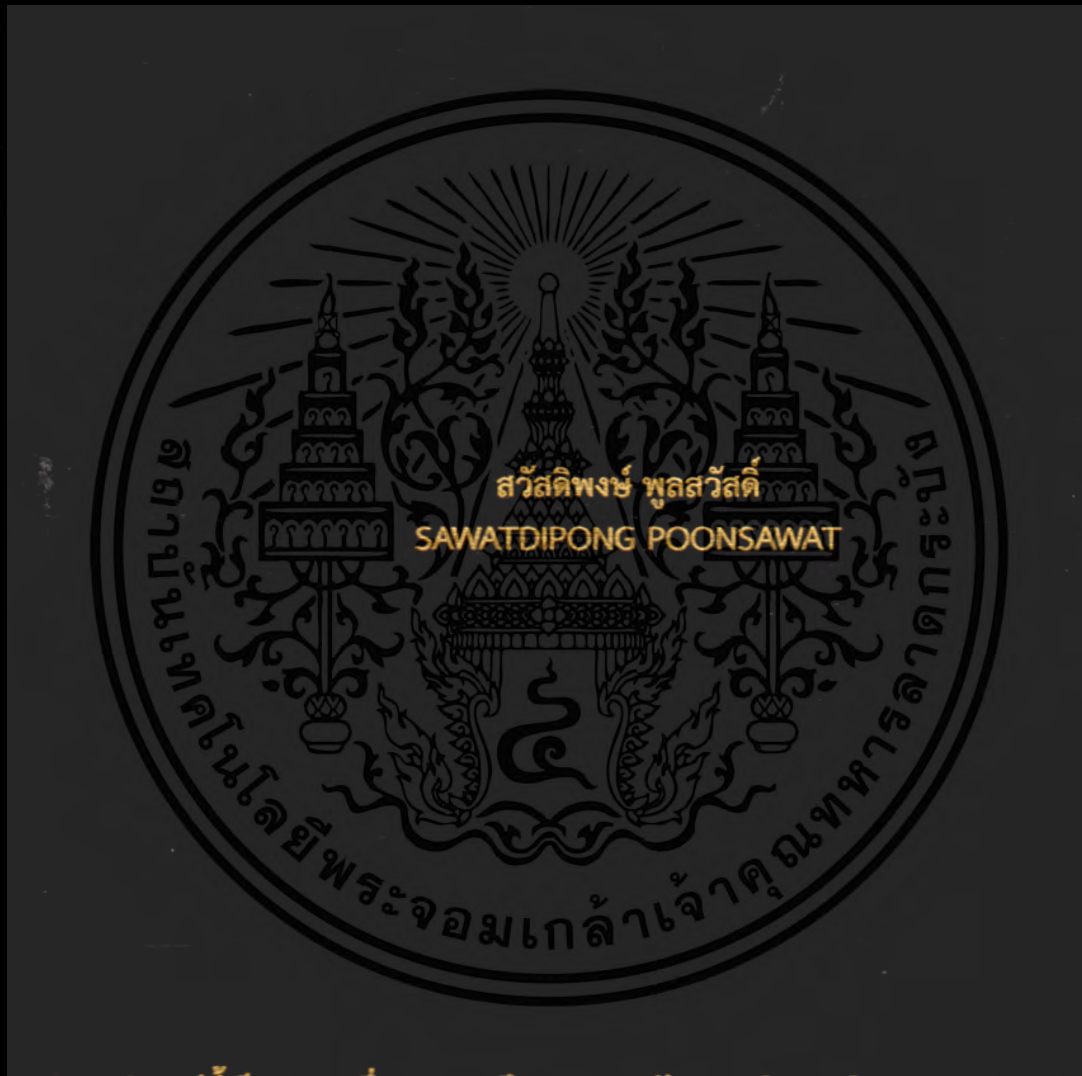


การศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วในโหมดกระแสโดยการจำลองแบบ

THE STUDY OF 5-CONTACT VERTICAL HALL DEVICE IN CURRENT MODE  
BY SIMULATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-043-020

การศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วในโหมดกระแสโดยการจำลองแบบ

THE STUDY OF 5-CONTACT VERTICAL HALL DEVICE IN CURRENT MODE  
BY SIMULATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-043-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF 5-CONTACT VERTICAL HALL DEVICE IN CURRENT MODE  
BY SIMULATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2018-EN-M-043-020  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วในโหมดกระแสโดยการจำลองแบบ  
Thesis Title The Study of 5-Contact Vertical Hall Device in Current Mode by Simulation  
นักศึกษา นายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์  
รหัสประจำตัว 58601172  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-043-020

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตติรุ่งเรือง	
รศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.รังสรรค์	เมืองเหลือ	
ผศ.ดร.วีระ	เพ็ญจันทร์	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมตัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นในโหมตกระแส โดยการจาสองแบบ
นักศึกษา	นายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	58601172
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสเป็นกลไกในการตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเรียกว่าการทำงานในโหมตกระแส โดยในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD ในการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก เพื่อช่วยลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษา ตัวอุปกรณ์จะถูกศึกษาภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางโครงสร้าง ความกว้าง ความลึก ระยะห่างระหว่างขั้วกระแส และตัวแปรทางคุณสมบัติอย่างความเข้มข้นของฐานรองอุปกรณ์ รวมถึงการศึกษาผลของกระแสไบอัสและการเปลี่ยนแปลงมุมของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่ออุปกรณ์ ซึ่งผลการจำลองแบบที่ได้ทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสที่เป็นไปตามสมมติฐานทางโครงสร้างที่ตัวอุปกรณ์ถูกออกแบบให้มีขั้วกระแสทั้งหมดสามขั้ว โดยการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมตกระแสทั้งหมดนั้นมีลักษณะการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นและมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสไบอัส นอกจากนี้การตอบสนองในโหมตกระแสยังสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระทำมุมต่าง ๆ ได้ในลักษณะเดียวกับปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมในการทำงานด้วยโหมตกระแสควรมีความเข้มข้นของฐานรองอยู่ในช่วง  $2 \times 10^{15} - 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  มีความลึกของฐานรองตั้งแต่  $40 \text{ }\mu\text{m}$  ขึ้นไป มีความกว้าง  $10 \text{ }\mu\text{m}$  และมีความยาว  $15 \text{ }\mu\text{m}$  จึงจะทำได้ความไวในการตอบสนองสูงสุดเท่ากับ  $0.0476 \text{ A/AT}$  ที่ปริมาณกระแสไบอัส  $0.5 \text{ mA}$  ดังนั้นแล้วจากผลการศึกษานี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์เฉพาะ ที่อาศัยการเบี่ยงเบนกระแสในแนวตั้งสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

<b>Thesis</b>	The Study of 5-Contact Vertical Hall Device in Current Mode by Simulation
<b>Student</b>	Mr. Sawatdipong Poonsawat
<b>Student ID.</b>	58601172
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

## ABSTRACT

This thesis study 5-contact vertical Hall device base on deflection current mechanism or called “current mode of operation.” In this work, 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: width, depth, current contact spacing, substrate concentration, bias current and direction of magnetic field. The overall simulation result shows existence of current deflection effect that follows in hypothesis of structure of the device (the device is split current contact into three current contacts). All magnetic response of current mode are linearity and depend on bias current. The optimal device for operation in current mode should contain substrate concentration in the range of  $2 \times 10^{15}$  to  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , depth is 40  $\mu\text{m}$  or higher, width is 10  $\mu\text{m}$  and length is 15  $\mu\text{m}$  that make maximum sensitivity 0.0476 A/AT for bias current 0.5 mA. 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

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้คำชี้แนะในการแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center:TMEC) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับการจำลองแบบของงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ คุณวิวัฒน์ แยมวงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการออกแบบและใช้งานเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอให้คุณงามความดีอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่งถึงครอบครัวและผู้ให้ความอนุเคราะห์แก่ข้าพเจ้า ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง

สวัสดีพงษ์ พูลสวัสดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์.....	8
2.1.1 ปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติก.....	8
2.1.1.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	8
2.1.1.2 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส.....	13
2.1.1.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์.....	17
2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์.....	19
บทที่ 3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD.....	31
3.1 Sentaurus TCAD.....	31
3.1.1 Sentaurus Workbench.....	32
3.1.2 Sentaurus Visual.....	33
3.1.3 Sentaurus Structure Editor.....	34
3.1.3.1 Ligament.....	34
3.1.4 Sentaurus Device.....	36
3.2 การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นด้วย TCAD.....	39
3.2.1 การออกแบบ layout ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น.....	40
3.2.2 การกำหนดลวดลายกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น.....	42
3.2.3 การสร้าง mesh และการกำหนดคุณสมบัติไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 การจ าลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ด้วยแบบจ าลองทางฟิสิกส์.....	49
3.3 สมมุติฐานในการจ าลองแบบ .....	62
บทที่ 4 ผลการจ าลองแบบ .....	64
4.1 ผลการจ าลองแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น .....	64
4.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น.....	65
4.2.1 ผลการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน .....	69
4.2.2 ผลการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีความลึกแตกต่างกัน.....	73
4.2.3 ผลการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีความกว้างแตกต่างกัน .....	78
4.2.4 ผลการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกรวด์แตกต่างกัน.....	82
4.2.5 ผลการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน .....	85
4.2.6 ผลการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ท มุมค่าต่าง ๆ ต่ออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	93
เอกสารอ้างอิง .....	95
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก. คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน .....	102
ภาคผนวก ข. ค าสั่งที่ใช้ในการจ าลองแบบด้วย Sentaurus TCAD .....	106
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	133

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ตัวแปรส าหรับวิเคราะห์ bandgap narrowing ส าหรับวัสดุซิลิคอน.....51
3.2	สัมประสิทธิ์มาตรฐานส าหรับโมเดลของ Masetti .....52
3.3	สัมประสิทธิ์มาตรฐานส าหรับซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่.....53
3.4	ตัวแปรของโมเดล Conwell-Weisskopf ส าหรับซิลิคอน .....53
3.5	ตัวแปรของโมเดล Canali (ค่ามาตรฐานส าหรับซิลิคอน).....54
3.6	ตัวแปรการอิมตัวของความเร็ว.....54
3.7	ค่าตัวแปรมาตรฐานของช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับการเจือสาร (doping-dependent SRH lifetimes).....56
3.8	ค่ามาตรฐานของตัวแปรส าหรับช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....57
3.9	ตัวแปรการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH .....61
4.1	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน .....71
4.2	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน .....73
4.3	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความลึกแตกต่างกัน .....75
4.4	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความลึกแตกต่างกัน .....77
4.5	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความกว้างแตกต่างกัน .....79
4.6	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความกว้างแตกต่างกัน .....81
4.7	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน.....83
4.8	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน.....85
4.9	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน .....87
4.10	ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์ แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน .....89

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เซ็นเซอร์ประเภทต่าง ๆ..... 5
2.2	ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ชนิด $p$ และ $n$ ..... 9
2.3	แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ชนิด $p$ และ $n$ ..... 12
2.4	แผ่นสารกึ่งตัวนำ วัสดุซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)..... 14
2.5	แผ่นคอร์ปิโน..... 15
2.6	แผนภาพของสมการเวกเตอร์ (2.19), (2.21) และ (2.23) ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำ วัสดุสำหรับสารกึ่งตัวนำ ชนิด $p$ และ $n$ ..... 16
2.7	ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำ วัสดุที่ถูกป้อนด้วยแรงดันคงที่ (a) และกระแสคงที่ (b)..... 17
2.8	โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ ..... 19
2.9	แพ็คเกจโครงสร้างของแผ่นฮอลล์สี่เหลี่ยม..... 20
2.10	แพ็คเกจโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ..... 21
2.11	แพ็คเกจฮอลล์ที่ขึ้นกับความเข้มข้นอะตอมของสารเจือผู้ให้..... 22
2.12	โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่พัฒนามาจากโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ ..... 23
2.13	โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง ..... 24
2.14	ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (a) และแนวราบ (b)..... 25
2.15	อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ..... 26
2.16	อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ..... 26
2.17	ท่อกระแสและท่อกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนที่เป็นไปได้ทั้งหมด (รูปสี่เหลี่ยมคางหมู)..... 28
2.18	อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส (a) และสมมุติฐานของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสที่อาจเกิดขึ้นบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (b) .. 28
3.1	ชุดเครื่องมือของ Sentaurus TCAD ..... 32
3.2	Sentaurus Workbench ..... 33
3.3	Sentaurus Visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .plt..... 33
3.4	Sentaurus Visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .tdr ..... 34
3.5	หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor ..... 35
3.6	หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor..... 35
3.7	Sentaurus Structure Editor ..... 36
3.8	ผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตของ Sentaurus Device..... 37
3.9	layout ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ถูกสร้างด้วย Ligament Layout Editor ..... 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ส่วน Environment สำหรับกำหนดตัวแปรและเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโครงสร้าง.....	42
3.11 ส่วน Substrate ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง.....	42
3.12 ส่วน Comment ที่ใช้ระบุข้อความ .....	43
3.13 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุชนิด, วัสดุ, ความเข้มข้นของสารเจือ, และความถี่รอยต่อ.....	43
3.14 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุรูปแบบการเจือสาร.....	44
3.15 ส่วน Pattern สำหรับกำหนดบริเวณที่จะถูกเจือสาร .....	44
3.16 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุการยิงฝั่งประจุ.....	44
3.17 ส่วน Anneal สำหรับกระบวนการแอนนัลหลังยิงฝั่งประจุ .....	45
3.18 ส่วน Etch สำหรับกำหนดการกัดชั้นนำไวแสงก่อนสร้างชั้นโลหะ .....	45
3.19 ส่วน Deposit ที่ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ.....	45
3.20 ส่วน Pattern สำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้า.....	46
3.21 ส่วน Etch ที่ใช้กัดชั้นโลหะ.....	46
3.22 ส่วน Etch ชั้นสุดท้ายสำหรับกัดชั้นนำ ไวแสงที่ผิวออกทั้งหมด .....	46
3.23 ขั้นตอนการขึ้นรูปโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงด้วย Ligament Flow Editor.....	47
3.24 โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจาก กำหนดโครงสร้างขั้วและหน้าสัมผัสไฟฟ้าแล้ว .....	47
3.25 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้วและภาคตัดขวางที่แสดงบริเวณที่ถูกเจือสาร ..	48
3.26 รูปแบบการเจือสาร (Doping Profile) ที่ขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว .....	48
3.27 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่ใช้ในการอ้างอิง .....	63
4.1 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว.....	64
4.2 การวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง ....	65
4.3 การสะสมประจุพาหะของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว (a) ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (b) ขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน .....	66
4.4 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว .....	66
4.5 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ในโหมดแรงดัน.....	67
4.6 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ในโหมดกระแส .....	67
4.7 ความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว (a) ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (b) ขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน .....	68
4.8 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ..	69
4.9 แผนภาพแสดงการจลาจลรูปแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่มี ฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน .....	70
4.10 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ที่มี ฐานรองความเข้มข้นตั้งแต่ $1 \times 10^{15}$ จนถึง $1 \times 10^{16}$ อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร.....	70
4.11 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้วที่ ฐานรองความเข้มข้นต่าง ๆ ณ ความเข้มข้นแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา .....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีฐานรองความเข้มข้นตั้งแต่ $1 \times 10^{15}$ จนถึง $1 \times 10^{16}$ อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร.....	72
4.13 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ฐานรองความเข้มข้นต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	73
4.14 แผนภาพแสดงการจลของแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกัน.....	74
4.15 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกัน.....	74
4.16 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ความลึกต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	75
4.17 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกัน.....	76
4.18 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ความลึกต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	76
4.19 แผนภาพแสดงการเกิดกระแสเบี่ยงเบนในอุปกรณ์ที่มีฐานรองตั้งและลิก.....	77
4.20 แผนภาพแสดงการจลของแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความกว้างแตกต่างกัน.....	78
4.21 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความกว้างแตกต่างกัน.....	78
4.22 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ขนาดความกว้างค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	79
4.23 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความกว้างแตกต่างกัน.....	80
4.24 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ขนาดความกว้างค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	80
4.25 แผนภาพแสดงการแพร่กระจายของกระแสระหว่างอุปกรณ์ที่มีความกว้างแตกต่างกัน.....	81
4.26 แผนภาพแสดงการจลของแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน.....	82
4.27 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน.....	82
4.28 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน.....	84
4.30 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีระยะห่างระหว่างชั้นไบอัสและกราวด์ค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มข้นแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา .....	84
4.31 แผนภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของกระแสในอุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน .....	85
4.32 แผนภาพแสดงการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน .....	86
4.33 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน .....	86
4.34 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มข้นแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	87
4.35 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน .....	88
4.36 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มข้นแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา.....	88
4.37 แผนภาพแสดงการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ $\theta$ มุมแตกต่างกันในระนาบ x-y ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น .....	89
4.38 แผนภาพแสดงการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ $\theta$ มุมแตกต่างกันในระนาบ y-z ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น .....	90
4.39 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ $\theta$ มุมต่าง ๆ บนระนาบ x-y.....	90
4.40 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ $\theta$ มุมต่าง ๆ บนระนาบ y-z.....	91
4.41 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ $\theta$ มุมต่าง ๆ บนระนาบ x-y.....	91
4.42 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ $\theta$ มุมต่าง ๆ บนระนาบ y-z.....	92

# บทที่ 1

## บทนำ

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายๆ ด้าน เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ มีการนำอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ในการวัดตำแหน่งการเปลี่ยนเกียร์ วัดตำแหน่งเพลาลูกเบี้ยว (Camshaft) และเพลาช้อเหวี่ยง (Crankshaft) วัดความเร็วของเครื่องยนต์และอื่นๆ เป็นต้น นอกจากนี้จากอุตสาหกรรมยานยนต์แล้ว อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กยังถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นสวิทช์ ในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่า บอกตำแหน่งหรือระดับ ในอุตสาหกรรมต่างๆอีกด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมบางประเภท โดยอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เป็นที่นิยมคือ เช่น เซอร์ฮอลล์ (Hall effect sensor) ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีข้อดีในด้านของประสิทธิภาพ ความทนทาน และความง่ายต่อการนำไปสร้างลงในวงจรรวม อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กประเภทนี้จึงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

อุปกรณ์ฮอลล์หรือเซ็นเซอร์ฮอลล์ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการจากปรากฏการณ์ฮอลล์ ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยทั่วไปไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยขั้วทั้งหมดสี่ขั้ว สองขั้วใช้สำหรับจ่ายกระแสให้กับตัวอุปกรณ์และอีกสองขั้วใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์ โครงสร้างของตัวอุปกรณ์ได้รับแบบมาจากแผ่นฮอลล์ (Hall plate) แบบดั้งเดิม ที่เป็นแผ่นตัวนำสี่เหลี่ยมผืนผ้าบางๆ ซึ่งตัวอุปกรณ์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ หรืออาจเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แบบแนวนอน (Horizontal Hall device) เนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นในแนวนอนหรือขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ นอกจากนี้แล้วได้มีการออกแบบให้อุปกรณ์ฮอลล์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ ซึ่งมันถูกเรียกว่า อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (Vertical Hall device) โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจะประกอบไปด้วยขั้วห้าขั้ว สองขั้วใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ส่วนอีกสามขั้วจะถูกใช้สำหรับจ่ายกระแสให้กับตัวอุปกรณ์ การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจะอาศัยกลไกจากปรากฏการณ์ฮอลล์เช่นเดียวกับอุปกรณ์ฮอลล์แบบแนวนอน ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทั้งสองแบบจะทำให้เกิดการสะสมของพาหะภายในอุปกรณ์ ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอุปกรณ์ ดังนั้นจากหลักการและโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ง่ายต่อการนำไปพัฒนาจึงทำให้อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง

### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาโครงสร้างมาจากอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอน ให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ฮอลล์แนวนอนไม่สามารถตอบสนองได้ โดยโครงสร้างของตัวอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยขั้ว 5 ขั้ว ซึ่งแบ่งออกเป็นขั้วที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กระแสไหลผ่าน (current contacts) 3 ขั้วและขั้วที่ใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวอุปกรณ์ (sense contacts) 2 ขั้ว ตัวอุปกรณ์จะอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก แต่ด้วยการที่ออกแบบให้ขั้วกระแสไหลผ่านมี 3 ขั้ว จึงทำให้ตัวอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งมีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสหรือพาหะ ที่มีเอาต์พุตในรูปความไม่สมดุลของกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาเสนอการศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในโหมดกระแสหรือการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยเอาต์พุตในรูปความไม่สมดุลหรือความแตกต่างของกระแส เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในรูปแบบนี้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการท างานและกระบวนการจ าลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง
2. ศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความเข้มข้นของฐานรองของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความลึก ความกว้างและความยาวของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง
4. ศึกษาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการท างานที่มีต่ออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ท างานในโหมดกระแสและแรงดัน
5. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ทามุมต่าง ๆ ต่อการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสและแรงดัน
6. ศึกษาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในโหมดกระแสไฟฟ้าและโหมดแรงดันไฟฟ้า
7. เปรียบเทียบการท างานของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในโหมดกระแสและโหมดแรงดัน

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. การแบ่งขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งอาจส่งผลให้เกิดผลกระทบที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเพิ่มเติมในรูปของความแตกต่างกระแส
2. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฐานรองอาจส่งผลต่อเอาต์พุตทั้งในรูปของแรงดันไฟฟ้าและความแตกต่างของกระแส ตามปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส
3. โครงสร้างของตัวอุปกรณ์ทั้งความลึก ความกว้าง และความยาว ต้องมีผลต่อเอาต์พุตของตัวอุปกรณ์ในการท างานทั้งสองโหมด เพราะเป็นตัวแปรทางโครงสร้าง (geometrical factor)
4. ผลของการไปอัสกระแสอาจส่งผลโดยตรงต่อเอาต์พุตทั้งสองรูปแบบตามปรากฏการณ์ฮอลล์และการเบี่ยงเบนของกระแส
5. หากมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสเกิดขึ้นในอุปกรณ์ ทิศของสนามแม่เหล็กที่กระท าดอุปกรณ์จะต้องมีผลต่อการท างานในโหมดกระแสด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่เราท การศึกษาในงานวิจัยนี้จะถูกศึกษาลงลึกในรายละเอียดด้านการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส โดยปกติแล้วอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงจะอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า หรืออีกนัยหนึ่งอาจเรียกการทำงานแบบนี้ว่าอยู่ในโหมดแรงดัน แต่เนื่องจากว่าอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมักจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 3 ขั้ว โดยมีหนึ่งขั้วสำหรับการป้อนกระแสเข้าส่วนอีกสองขั้วที่เหลือจะถูกใช้วัดความแตกต่างของกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังนั้นด้วยเหตุที่อุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงมีขั้วกระแส 3 ขั้ว จึงทำให้มีลักษณะโครงสร้างเช่นเดียวกับอุปกรณ์ประเภทนี้ ด้วยลักษณะเด่นข้อนี้ทำให้อุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสได้เช่นเดียวกับปรากฏการณ์ฮอลล์

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ที่ใช้โหมดกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรทางโครงสร้างและผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นฐานรองของตัวอุปกรณ์ รวมถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าในด้านการป้อนกระแสและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระตามต่าง ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานด้วยโหมดกระแส โดยอาศัยการวิเคราะห์และคาดการณ์ด้วยการจำลองแบบผ่านโปรแกรมเสมือน

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว
2. ศึกษาปรากฏการณ์กัลป์วาโนแมกเนติกที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ฮอลล์ที่อยู่ภายใต้สภาวะแม่เหล็ก
3. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส
4. ศึกษาการใช้งานและการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD
5. ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ในโหมดแรงดันและโหมดกระแสผ่านการจำลองแบบ
6. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างที่มีต่ออุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่ใช้งานในโหมดแรงดันและโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ
7. ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของฐานรองที่มีต่ออุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่ใช้งานในโหมดแรงดันและโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ
8. ศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดการป้อนกระแสที่มีต่อความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง
9. ศึกษาผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่หาค่าต่าง ๆ ที่มีต่ออุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส าหรับเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนา

เป็นบทที่กล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษา ส าหรับงานวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ฮอลล์ เช่น ปรัชญาการณฮอลล์ ปรัชญาการณการเบี่ยงเบนของกระแส รวมถึงหลักการในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว และอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแส

บทที่ 3 การจ าลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

เป็นบทที่กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการจาลองแบบสาหรับงานวิจัยนี้ และยังกล่าวถึงขั้นตอน การจ าลองแบบอุปกรณ์รวมถึงรายละเอียดของโมเดลทางฟิสิกส์ที่อยู่เบื้องหลัง

บทที่ 4 ผลการจ าลองแบบ

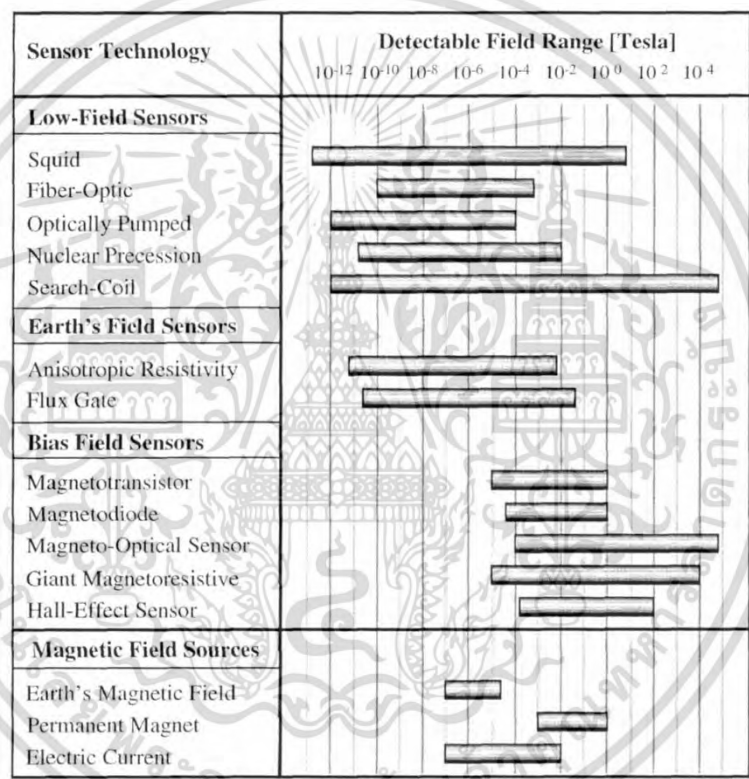
กล่าวถึงผลที่ได้จากการจ าลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง แบบ 5 ขั้ว ที่ถูกเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตัวอุปกรณ์ เพื่อแสดงพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการท างานในโหมดกระแส

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการจาลองแบบทั้งหมด

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซ็นเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนความเข้มของสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า การนาเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่สร้างจากสารกึ่งตัวนาไปประยุกต์ใช้งานโดยส่วนมากจะถูกนาไปใช้สำหรับวัดตาแหน่ง มุม ระยะทาง หรือกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ ทนทาน มีความน่าเชื่อถือ และดูแลรักษาง่ายเมื่อเทียบกับเทคนิคการตรวจจับแบบอื่นๆ เซ็นเซอร์แม่เหล็กสามารถแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ Low-field sensor (nT), Earth's field sensor ( $\mu\text{T}$ ), และ Bias field sensor (mT) (รูปที่ 2.1) [1]



รูปที่ 2.1 เซ็นเซอร์ประเภทต่างๆ

### Low-Field Sensors

อุปกรณ์ในกลุ่ม low-field sensor ประกอบไปด้วย superconducting quantum interference device, fiber-optic magnetometer, optically pumped magnetometer และ search coil magnetometer

อุปกรณ์ที่ไวต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในกลุ่ม low-field sensor มากที่สุดก็คือ superconducting quantum interference device (SQUID) [2] โดยอาศัยการหล่อเย็นวัสดุตัวนายิ่งยวดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในวัสดุดังกล่าวสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนากระแสไฟฟ้าโดยไม่มี ความต้านทาน และจากรอยต่อ Josephson ที่อยู่ในวงแหวนตัวนา ยิ่งยวดจะท ให้กระแสเริ่มอสสิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลตเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน ตัวเซ็นเซอร์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในระดับ  $10^{-13}$  T

Fiber-optic magnetometer จะใช้เส้นใยแก้วสองเส้นซึ่งนามาต่อกันแบบ Mach-Zehnder interferometer [3, 4] โดยจะมีเส้นใยแก้วหนึ่งเส้นที่ถูกเคลือบวัสดุจากพวก magnetostrictive material ซึ่งวัสดุจากพวกนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัววัสดุ เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงนี้ก็จะทำให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดที่เอาต์พุตของ interferometer ขึ้น fiber-optic magnetometer สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง  $10^{-10}$  ถึง  $10^{-3}$  T

Optically pumped magnetometer อาศัยปรากฏการณ์ Zeeman ซึ่งเส้นสเปกตรัมของอะตอมจะเกิดการแยกเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก เมื่อแสงผ่านแก๊สฮีเลียมหรือซีเซียมการดูดกลืนแสงของแก๊สจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก optically pumped magnetometer มีข้อดีตรงที่มีขนาดใหญ่และกินพลังงานเยอะ มันสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง  $10^{-12}$  ถึง  $10^{-4}$  T [5]

Nuclear precession magnetometer ใช้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของนิวเคลียสในอะตอมของเหลวไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน (benzene) เนื่องจากโมเมนต์เชิงมุมของโปรตอนในของเหลวสามารถจัดเรียงแบบชั่วคราวโดยสนามแม่เหล็กได้ เมื่อทำการปิดสนามที่ใช้สำหรับจัดเรียงโปรตรอน ตัวโปรตรอนจะเริ่มหมุนควงตามสนามแม่เหล็กรอบๆ โดยความถี่ของการหมุนควงจะขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมันสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ในช่วง  $10^{-11}$  ถึง  $10^{-2}$  T

Search-coil magnetometer ใช้หลักการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ โดยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะเหนี่ยวนำกระแสซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวด โดยทั่วไปแล้วตัวขดลวดมักจะใช้แกนเป็นวัสดุ ferromagnetic เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในระดับ  $10^{-12}$  T ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก [6]

### Earth's Field Sensors

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน (anisotropic resistance) นั่นก็คือกลุ่มของ magnetoresistive sensor ซึ่งสนามแม่เหล็กภายนอกจะเบี่ยงเบนกระแสที่เกิดขึ้นในวัสดุเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทาน โดยปรากฏการณ์ magnetoresistive ครั้งแรกถูกสังเกตพบในวัสดุ ferromagnetic [7, 8] ปรากฏการณ์นี้จะแสดงออกมาในรูปสมการพหุนามกำลังสอง (quadratic) ที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก แต่ว่าเราสามารถทำให้มันเป็นเชิงเส้นได้โดยใช้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างแบบ barberpole [9] ซึ่งโครงสร้างนี้จะมีการทามุมกับสนามแม่เหล็ก ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในช่วง  $10^{-11}$  ถึง  $10^{-2}$  T [10, 11]

ระบบนาทางแบบใช้เข็มทิศอาศัย flux gate magnetometer ซึ่งมีขดลวดที่ใช้กระตุ้นและขดลวดสำหรับวัดสัญญาณ (pick-up coil) พันอยู่รอบๆ แกนวัสดุ ferromagnetic ที่มีสภาพยอมให้แม่เหล็กซึมได้สูง (High-permeability) ผลของมันจะทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณระหว่างจุดอิมตัว สนามแม่เหล็กภายนอกจะเข้าไปรบกวนความสมมาตรของสัญญาณที่แกว่งทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่สองขึ้นที่ขดลวดสำหรับวัดสัญญาณ ขนาดของฮาร์มอนิกที่สองจะแปรผันกับสนามแม่เหล็กที่ให้ ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง  $10^{-10}$  ถึง  $10^{-2}$  T [12, 13] อุปกรณ์ชนิดนี้มีทั้งแบบขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่ มองเห็นด้วยตาเปล่าได้ (macroscopic form) และแบบขนาดเล็กที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ [14, 15] และเมื่อเร็วๆ นี้ อุปกรณ์ชนิดนี้ได้ถูกทำขึ้นในเชิงพาณิชย์โดยใช้กระบวนการ CMOS [16]

### *Bias Magnetic Field Sensors*

การประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้แม่เหล็กถาวรเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก [17, 18] ความเข้มของ bias magnetic field โดยทั่วไปอยู่ในระดับ mT ซึ่งอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับสนามแม่เหล็กกลุ่มนี้ คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (magnetotransistor), แมกนีโตไดโอด (magnetodiode), เซ็นเซอร์แมกนีโต-ออปติคัล (magneto-optical sensor), เซ็นเซอร์โจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟ (giant magnetoresistive sensor) และอุปกรณ์ฮอลล์

แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (magnetotransistor) เป็นทรานซิสเตอร์ที่ถูกสร้างบนเทคโนโลยี CMOS [19, 20] ให้มีขั้วคอลเลคเตอร์ (collector) สองขั้ว สนามแม่เหล็กภายนอกจะเหนี่ยวนำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสคอลเลคเตอร์อันเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กได้ต่ำถึง  $10^{-5}$  T และเมื่อไม่นานมานี้ข้อด้อยหลักในด้าน offset ของอุปกรณ์ถูกทำให้ลดทอนอย่างรวดเร็ว [21, 22]

แมกนีโตไดโอด (magnetodiode) เป็นไดโอดสารกึ่งตัวนำที่มีบริเวณ p และ n ถูกแบ่งแยกกันด้วยบริเวณอินทรินสิค (intrinsic) หรือซิลิคอนที่ถูกเจือในระดับต่ำ บริเวณอินทรินสิคจะติดอยู่กับพื้นผิวทั้งสองด้านที่มีอัตราการรวมตัวที่พื้นผิวแตกต่างกัน (surface recombination rate) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดพาหะระดับสูง (high-injection) โดยแรงลอเรนซ์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพนำไฟฟ้า (modulation of conductivity) ในบริเวณอินทรินสิค โดยทั่วไปแมกนีโตไดโอดถูกสร้างในซิลิคอนที่อยู่บนแซฟไฟร์ [23, 24] แต่อย่างไรก็ตามก็ได้มีการนำเสนอตัวอุปกรณ์ที่สร้างด้วยเทคโนโลยี CMOS ซึ่งมีค่าความไว (sensitivity) ถึง 25V/T [25]

เซ็นเซอร์แมกนีโต-ออปติคัล (magneto-optical sensor) ใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์โพลาไรเซชันของฟาราเดย์ซึ่งทิศทางการโพลาไรเซชันของแสงจะเปลี่ยนไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุแม่เหล็ก [26]

เซ็นเซอร์โจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟ (giant magnetoresistive sensor) จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่อาจสูงถึง 70% ซึ่งขึ้นกับสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน [27] อุปกรณ์โจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟประกอบไปด้วยระบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) และนอนเฟอร์โรแมกเนติก (non-ferromagnetic) แบบหลายชั้น ความต้านทานของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกบางๆ สองแผ่นซึ่งถูกชั้นด้วยชั้นการนำของนอนเฟอร์โรแมกเนติก สามารถถูกปรับเปลี่ยนโดยการเปลี่ยนแปลงแนวโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกจากที่ขนานกันแบบสวนทิศทาง (antiparallel) เป็นทิศทางเดียวกันโดยสนามแม่เหล็กภายนอก ชั้นที่มีโมเมนต์แม่เหล็กขนานกันมีความเป็นไปได้ที่จะมีการกระเจิงที่ผิวต่ำ ชั้นพวกนี้จะมีระยะทางก่อนการชน (mean free path) ที่ยาว ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานลดลง โดยความหนาของชั้นต้องมีค่าน้อยกว่าระยะทางก่อนการชนของอิเล็กตรอนในชั้น ซึ่งน้อยกว่า 10 นาโนเมตร [28]

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่มีการใช้ขนาดสนามแม่เหล็กที่ไม่สูงดังนั้นเซ็นเซอร์ฮอลล์จึงสามารถใช้แทนอุปกรณ์โจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟ [29] เซ็นเซอร์ฮอลล์มีความง่ายในแง่ของการทำงาน และสามารถรวมเข้ากับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ได้ อุปกรณ์ชนิดนี้เหมาะอย่างยิ่งกับการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรซึ่งอยู่ในช่วงไม่กี่ mT หรือตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้า การทำงานของม้วนอาศัยการเบี่ยงเบนลอเรนซ์ของพาหะซึ่งทำให้เกิดแรงดันในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส เพราะฉะนั้นในการใช้งานที่ต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง mT เซ็นเซอร์ฮอลล์คือตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ประสิทธิภาพโดยรวม

## 2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device)

### 2.1.1 ปรากฏการณ์กัลวานโนแมกเนติก (Galvanomagnetic effect)

ปรากฏการณ์กัลวานโนแมกเนติกทั้งหมดเป็นผลมาจากการที่แรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ในตัวกลาง แรงลอเรนซ์คือแรงที่กระทำกับอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแสดงดังสมการ

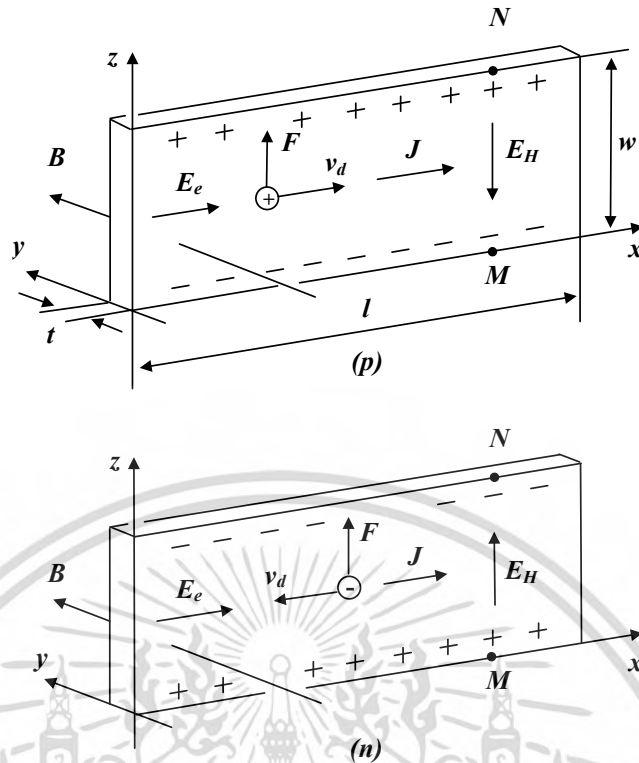
$$F = eE + e[v \times B] \quad (2.1)$$

โดยที่  $e$  แสดงถึงประจุของอนุภาค (สำหรับอิเล็กตรอน  $e = -q$  สำหรับโฮล  $e = q$  ซึ่ง  $q$  คือขนาดของประจุอิเล็กตรอน),  $E$  คือสนามไฟฟ้า,  $v$  คือความเร็วของพาหะ, และ  $B$  คือขนาดของสนามแม่เหล็ก เทอมแรกของฝั่งขวามือจะใช้อ้างถึงแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และเทอมที่สองจะเป็นแรงลอเรนซ์ บางครั้งเราอาจเรียกเทอมทั้งสองว่าส่วนของไฟฟ้าและส่วนของแม่เหล็กตามลำดับ ในการพิจารณาสนามแม่เหล็กของแรงลอเรนซ์เพื่อที่จะเข้าสู่สมการลอยเลื่อนของพาหะ เราจะประมาณค่าซึ่งประกอบไปด้วยสมมติฐานว่าประจุพาหะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมออันเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าหรือแรงขับอื่นๆ และความเร็วของพาหะทั้งหมดจะมีขนาดเท่ากันและเท่ากับค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ดังนั้นเราจึงสามารถแทนที่ความเร็วของอนุภาคแต่ละตัว ( $v$  ในสมการที่ (2.1)) ด้วยความเร็วลอยเลื่อนเฉลี่ยของพาหะทั้งหมด และเราจะไม่พิจารณาการเคลื่อนที่เชิงความร้อน (thermal motion) ของพาหะเพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อพาหะ

#### 2.1.1.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์จัดเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่อยู่ในกลุ่มของปรากฏการณ์กัลวานโนแมกเนติก ซึ่งถูกค้นพบโดย เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปี ค.ศ. 1879 [30] อุปกรณ์การทดลองของฮอลล์ดั้งเดิมนั้นจะใช้แผ่นตัวนำยาวซึ่งทามาจากทอง (long gold leaf) แต่เพื่อเข้าใกล้การนำปรากฏการณ์ฮอลล์ไปใช้ในปัจจุบัน เราจะศึกษาปรากฏการณ์นี้บนสารกึ่งตัวซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปรากฏการณ์นี้มากที่สุด

พิจารณาการเคลื่อนที่ของพาหะในแท่งสารกึ่งตัวนำบางและยาว (รูปที่ 2.2) ค่า “ยาว” ในที่นี้หมายความว่าความยาวของแผ่น  $l$  มีค่ามากกว่าความกว้าง  $w$  ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเราสามารถละเลยอิทธิพลของขั้วไฟฟ้าที่บ่อนให้แก่แผ่นสารกึ่งตัวนำได้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวโดยส่วนใหญ่จะมีระยะทางที่สั้นจึงส่งผลให้เกิดผลกระทบที่น้อยจนละเลยได้ เราจะให้แผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวถูกกำหนดประเภทเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  และ  $p$  อย่างละแผ่น โดยเราจะไม่คิดผลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยในแผ่นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดเพื่อความง่ายต่อการอธิบาย



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ชนิด  $p$  และ  $n$

ในรูปที่ 2.2  $E_e$  คือสนามไฟฟ้าภายนอก,  $B$  คือสนามแม่เหล็ก,  $v_d$  คือความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ,  $F$  คือแรงแม่เหล็ก,  $J$  คือความหนาแน่นกระแส, และ  $E_H$  สนามไฟฟ้าฮอลล์ แรงแม่เหล็กจะผลักพาหะที่มีประจุลบและบวกไปยังขอบข้างบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ปรากฏระหว่างประจุที่ขอบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ

จากรูปสมมุติว่าให้สนามไฟฟ้าตามแนวแกน  $x$  ( $E_e = E_x, 0, 0$ ) และสนามแม่เหล็กทำกับศูนย์ ดังนั้นแรงลอเรนซ์ (สมการที่(2.1)) จะมีเพียงเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งคือเทอมแรงทางไฟฟ้า แรงทางไฟฟ้าจะทำให้พาหะที่มีประจุจะลอยเลื่อนไปตามแผ่นในทิศทางที่ตรงข้ามกัน (แกน  $x$  และ  $-x$  สำหรับสารกึ่งตัวนำ ชนิด  $p$  และ  $n$  ตามลำดับ) โดยความเร็วลอยเลื่อนนั้นหาได้จาก

$$v_{dp} = \mu_p E_e \quad v_{dn} = \mu_n E_e \quad (2.2)$$

ซึ่ง  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือสภาพคล่องของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสจะหาได้ด้วย

$$J_p = q\mu_p p E_e \quad J_n = q\mu_n n E_e \quad (2.3)$$

ซึ่ง  $p$  และ  $n$  แทนความหนาแน่นโฮลและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ชนิด  $p$  และ  $n$  ตามลำดับ

### สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำในแนวแกน  $y$  ตอนนี้นำพาหะที่มีประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทั้งสองส่วน เนื่องจากเราสมมุติให้ความเร็วของพาหะทั้งหมดในแผ่นสารกึ่งตัวนำ มีค่าสม่ำเสมอ ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  และ  $p$  จะเป็น

$$F_p = e[v_{dp} \times B] \quad F_n = e[v_{dn} \times B] \quad (2.4)$$

แรงที่เกิดขึ้นกับพาหะประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางเดียวกัน เนื่องจาก  $e = q$  และ  $e = -q$  สำหรับโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นจากสมการที่ (2.2) และ (2.4) จะได้ว่า

$$F_p = q\mu_p[E_e \times B] \quad F_n = q\mu_n[E_e \times B] \quad (2.5)$$

โดยแรงที่เกิดขึ้นกับพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ทั้งสองชนิดจะอยู่ในแกน  $z$  จึงสามารถเขียนอยู่ในรูปขนาดของแต่ละแนวแกนเป็น

$$F_p = (0, 0, q\mu_p E_x B_y) \quad F_n = (0, 0, q\mu_n E_x B_y) \quad (2.6)$$

แรงนี้จะผลักพาหะไปทางขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะที่ขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของพาหะที่ขอบด้านล่างจะเริ่มลดลง ด้วยเหตุนี้ความสมดุลของประจุจะถูกรบกวนและทำให้มีสนามไฟฟ้าปรากฏระหว่างขอบด้านบนและด้านล่าง สนามไฟฟ้าที่ปรากฏนั้น (รูปที่ 2.2) จะกระทำต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับแรงทางแม่เหล็ก ซึ่งผลจากสนามไฟฟ้าจะผลักพาหะไปยังทิศที่จะลดประจุส่วนเกินที่ขอบจนในที่สุดแรงทางไฟฟ้าจะมีค่ามากพอที่จะสมดุลกับแรงทางแม่เหล็ก

$$e[v_d \times B] + eE_H = 0 \quad (2.7)$$

หลังจากนี้พาหะที่เคลื่อนที่ในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองจะเคลื่อนที่ในแนวขนานกับแกน  $x$  ซึ่งเหมือนกับมีแรงทางไฟฟ้าภายนอกกระทำเพียงอย่างเดียว สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส ( $E_H$ ) ซึ่งถ่วงดุลกับแรงทางแม่เหล็กจะเรียกว่า “สนามไฟฟ้าฮอลล์”

$$E_H = -[v_d \times B] \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.2) เราจะได้สนามไฟฟ้าฮอลล์เป็น

$$E_{Hp} = -\mu_p[E \times B] \quad E_{Hn} = \mu_n[E \times B] \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากเขียนในรูปของขนาดในแต่ละแนวแกน

$$E_{Hp} = (0, 0, -\mu_p E_x B_y) \quad E_{Hn} = (0, 0, \mu_n E_x B_y) \quad (2.10)$$

ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าและมีการตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก ส่วนแม่เหล็กของแรงมีแนวโน้มที่จะดันไฟฟ้าไปชิดกับขอบด้านหนึ่งของตัวอย่าง (ค ข่า “การดันกระแสไฟฟ้า” หรือ “pressing electricity” เป็นแนวคิดที่ถูกใช้โดยเอ็ดวิน ฮอลล์)

*แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)*

ผลกระทบที่สามารถจับต้องได้อย่างชัดเจนของสนามไฟฟ้าฮอลล์ก็คือการปรากฏแรงดันไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับทิศของกระแสระหว่างขอบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ หากเลือกจุดสองจุด  $M$  และ  $N$  ที่ขอบตรงข้ามกันของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ภายใต้เงื่อนไขจุดทั้งสองจะมีระนาบศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากันเมื่อ  $B = 0$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถหาได้จาก

$$V_H = \int_M^N E_H dz \quad (2.11)$$

และสำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  และ  $p$  จะได้ (ในที่นี้เราจะแสดงเฉพาะขนาดโดยละเลยเครื่องหมายลบไว้และ  $w$  หมายถึงความกว้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำ )

$$V_{Hp} = \mu_p E_x B_y w \quad V_{Hn} = \mu_n E_x B_y w \quad (2.12)$$

การสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์และแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปมักจะเรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ ในปรากฏการณ์ฮอลล์ยังมีคุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งนั่นก็คือ มุมฮอลล์

*มุมฮอลล์ (Hall angle)*

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่เกิดในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าว  $E = E_e + E_H$  จะไม่ได้อยู่ในแนวแกนเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก  $E_e$  ในกรณีปกติ กระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกจำกัดทิศทางตามสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้ความหนาแน่นกระแสอยู่ในแกนเดียวกันกับสนามไฟฟ้าภายนอก (รูปที่ 2.2) เนื่องจากสนามไฟฟ้าลัพธ์ไม่ได้มีทิศทางร่วมกับแนวแกนของความหนาแน่นกระแส (แนวแกนของสนามไฟฟ้าภายนอก) ดังนั้นปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวจะแสดงผ่านการเอียงของสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอกและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำ ตัวอย่าง มุมที่เกิดจากการเอียง  $\theta_H$  จะเรียกว่า “มุมฮอลล์” จากรูปที่ 2.2 สามารถหามุมฮอลล์ได้จาก

$$\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E_e|} \quad (2.13)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถวัดมุมฮอลล์ได้ตามความสัมพันธ์ของทิศทางสนามไฟฟ้าทั้งหมด นอกจากนี้ยังอาจระบุมุมฮอลล์เป็นมุมเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส  $J$  ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าลัพธ์  $E$  ตามรูปที่ 2.2 (เนื่องจากความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศทางเดียวกัน) ด้วยสมการ (2.9) และ (2.13) เราสามารถระบุมุมฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น

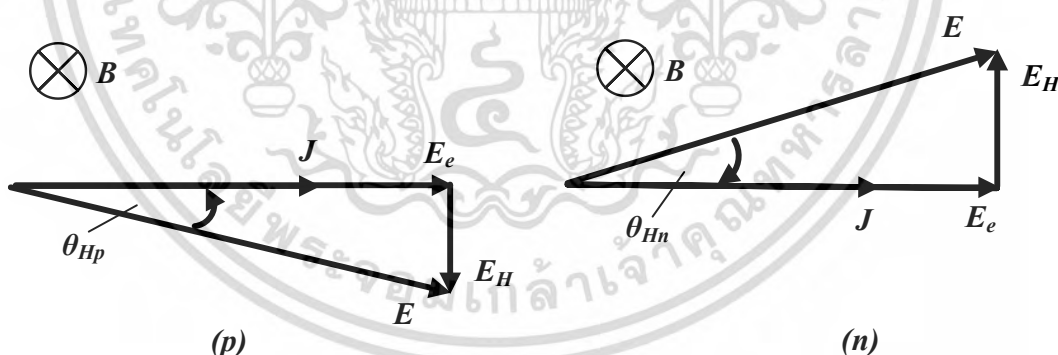
$$\tan \theta_{Hp} = \mu_p B_y \quad \tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_y \quad (2.14)$$

ค่าของมุมฮอลล์จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กและสภาพคล่องของประจุพาหะเท่านั้น เครื่องหมายของมุมฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของประจุพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำ

*สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)*

จากสมการที่ (2.3) และ (2.9) เราสามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็น

$$E_{Hp} = -\frac{1}{qp} [J \times B] \quad E_{Hn} = \frac{1}{qn} [J \times B] \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.3 แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์ชนิด  $p$  ( $p$ ) และชนิด  $n$  ( $n$ ) โดย  $J$  คือความหนาแน่นกระแส,  $E_e$  สนามไฟฟ้าภายนอก,  $E_H$  สนามไฟฟ้าฮอลล์,  $E$  สนามไฟฟ้าลัพธ์, และ  $\theta_H$  คือมุมฮอลล์

จากสมการข้างต้น (สมการที่ (2.15)) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$E_H = -R_H [J \times B] \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $R_H$  คือตัวแปรที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ สมการที่ (2.16) เป็นตัวแทนล่าสุดของบทสรุปที่ถูกสร้างโดยฮอลล์หลังจากการทดลองของเขา

สัมประสิทธิ์ฮอลล์เป็นตัวแปรทางวัสดุ (material parameter) ที่อธิบายลักษณะความเข้มและเครื่องหมายของปรากฏการณ์ฮอลล์ในวัสดุเฉพาะ หน่วยของสัมประสิทธิ์ฮอลล์คือ  $VmA^{-1}T^{-1}$  (โวลต์เมตรต่อแอมแปร์เทสลา) ซึ่งบางครั้งจะแสดงในรูปแบบที่กะทัดรัดมากขึ้นเป็น  $\Omega mT^{-1}$  (โอห์มเมตรต่อเทสลา) หรือเทียบเท่ากับ  $m^3T^{-1}$  (ลูกบาศก์เมตรต่อเทสลา)

จากการเทียบสมการ (2.15) และ (2.16) เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดเป็น

$$R_{Hp} = \frac{1}{qp} \quad R_{Hn} = -\frac{1}{qn} \quad (2.17)$$

เครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของพาหะข้างมาก และขนาดของสัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรผกผันกับความเข้มข้นของพาหะข้างมาก สำหรับการนำไปใช้จริงนั้น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.11) และ (2.16)

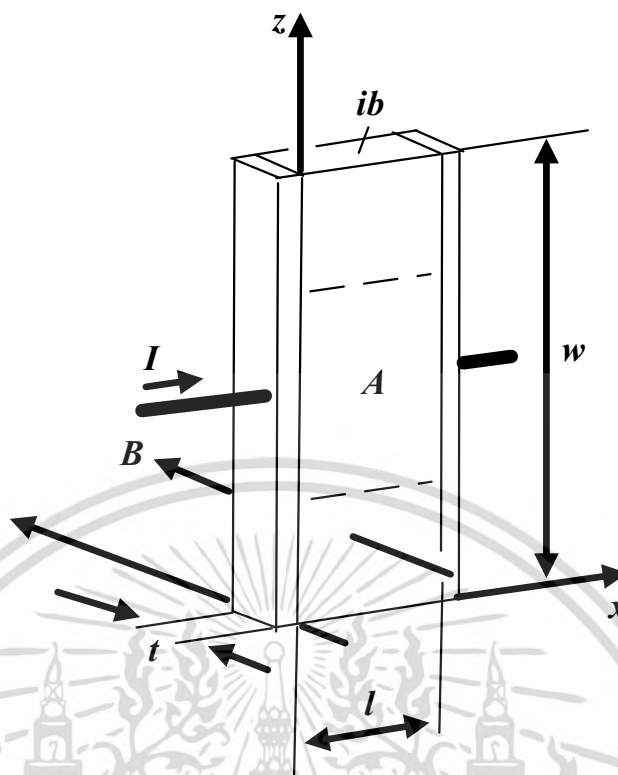
$$V_H = \frac{R_H}{t} IB_{\perp} \quad (2.18)$$

ซึ่ง  $t$  คือความหนาของแผ่นสารกึ่งตัวนำ,  $I$  คือกระแสที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ที่กำหนดโดย  $I = Jwt$ , และ  $B$  คือสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับระนาบผิวของอุปกรณ์ (ในที่นี้เราจะไม่คิดเครื่องหมายของแรงดันไฟฟ้า)

สมการที่ (2.18) แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของตัวอุปกรณ์ฮอลล์จะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตโดยอุปกรณ์ที่มีความบางจะได้ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าอุปกรณ์ที่มีความหนามากๆ

### 2.1.1.2 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส (Current deflection effect)

พิจารณาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น แผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่างสำหรับการทดลองนี้จะเรียกว่าสั้นก็ต่อเมื่อขนาดตามทิศทางกระแสมีค่าน้อยกว่าขนาดตามทิศทางแรงที่กระทำต่อพาหะ ตัวอย่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นจะแสดงในรูป 2.4 โดยใช้ระบบพิกัดและสัญลักษณ์เหมือนกับรูปที่ 2.2 ด้วยความที่เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น  $l \ll w$  ทำให้รูปร่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำคล้ายกับแชนนัลที่ประกบกันระหว่างขั้วไฟฟ้า ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดในรูปแบบซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส

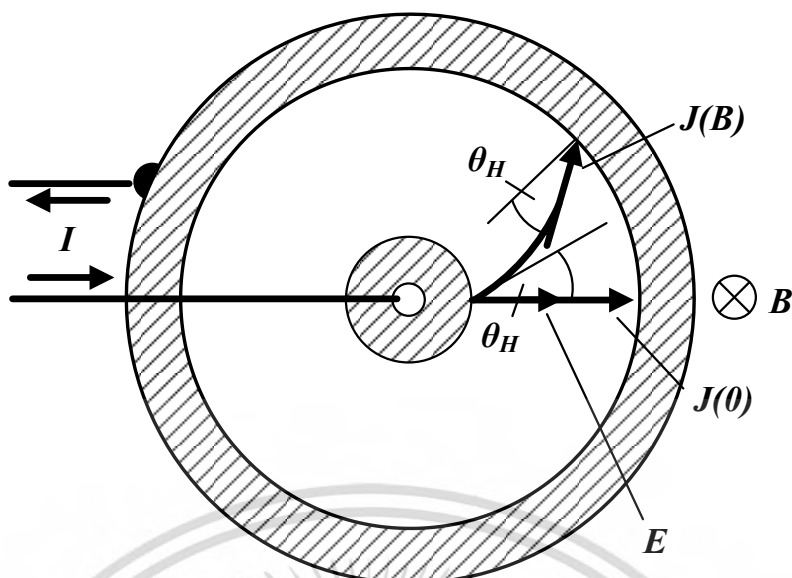


รูปที่ 2.4 แผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะห่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)

#### แผ่นคอบินโน (Corbino disc)

เพื่อที่จะเข้าใจลักษณะพิเศษของปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยม เราจะพิจารณากรณีพิเศษข้อแรกคือ แผ่นสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยมที่มีรูปร่างเป็นวงแหวนซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 แผ่นดังกล่าวจะถูกรเรียกว่า “แผ่นคอบินโน” [31] แผ่นคอบินโนมีลักษณะเป็นแผ่นหรือวงแหวนของวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำเช่น สารกึ่งตัวนำ ซึ่งถูกติดด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงไว้ที่ตรงศูนย์กลางและรอบๆแผ่น ถ้าทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เส้นศักย์ไฟฟ้า (equipotential line) จะมีจุดร่วมศูนย์กลางเดียวกันและสนามไฟฟ้าจะแผ่ออกตามแนวรัศมี ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก กระแสจะไหลในแผ่นไปตามแนวรัศมีของวงกลม เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับแผ่นกระแสจะเอียงไปเมื่อเทียบกับทิศทางของรัศมี (ดูรูปที่ 2.5) ในแผ่นคอบินโนนั้นจะไม่มีบริเวณขอบที่เป็นฉนวนให้พาหะสามารถสะสมอยู่ได้เหมือนกับกรณีแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวก่อนหน้านี้ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะไม่ปรากฏออกมา ทำให้ไม่มีตัวไปถ่วงดุลแรงทางแม่เหล็กส่งผลให้พาหะถูกแรงทางแม่เหล็กเบี่ยงเบนเส้นทางจากเส้นทางที่สั้นที่สุด

แผ่นสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.4 สามารถมองเป็นแผ่นคอบินโนที่มีรัศมีขนาดใหญ่ไม่สิ้นสุด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าส่วนภายในของตัวอย่าง (A) ซึ่งห่างจากขอบที่เป็นฉนวน (ib) ควรจะเหมือนส่วนของแผ่นคอบินโนจริงๆ ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมนี้จะไม่มีการเกิดฮอลล์ขึ้นแต่จะมีการเบี่ยงเบนของกระแสเกิดขึ้นแทน



รูปที่ 2.5 แผ่นคอร์บีโน เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลมที่มีขั้วหนึ่งขั้วอยู่ตรงกลางและอีกขั้วอยู่ล้อมรอบเส้นรอบวงของแผ่น ในแผ่นคอร์บีโนสนามไฟฟ้า  $E$  จะแผ่ตามรัศมีวงกลมโดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ส่วนความหนาแน่นกระแส  $J$  จะถูกทำให้เฉียงตามมุมฮอลล์  $\theta_H$

การที่แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ไม่ปรากฏในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานยังสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองวงจรรไฟฟ้า ตามแบบจำลองนี้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะไม่ปรากฏเพราะแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางแม่เหล็ก (magnetic electromotive force) จะถูกลัดวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่

การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection)

ตอนนี้เราจะมาหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส เราจะใช้การประมาณค่าที่พูดไปก่อนหน้านี้อีกครั้งนั่นคือ เราจะไม่สนใจการเคลื่อนที่เชิงความร้อนของพาหะและสมมติว่าพาหะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอภายใต้การกระทำของแรงลอเรนซ์ สมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$F_p = qE + q[v_p \times B] \quad F_n = qE - q[v_n \times B] \quad (2.19)$$

ซึ่ง  $v_p$  และ  $v_n$  หมายถึงความเร็วโวลและอิเล็กตรอน ที่มีสาเหตุมาจากแรงลอเรนซ์  $F_p$  และ  $F_n$

เพื่อให้การวิเคราะห์ต่อไปชัดเจนขึ้น เราจะแทนแรงลอเรนซ์  $F_p$  และ  $F_n$  ในสมการที่ (2.19) เทียบเท่ากับแรงทางไฟฟ้า  $qE_p$  และ  $-qE_n$  เป็น

$$qE_p = qE + q[v_p \times B] \quad -qE_n = qE - q[v_n \times B] \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะจะลอยเลื่อนเนื่องจากสนามไฟฟ้าสมมูล (equivalent electric field)  $E_p$  และ  $E_n$  ในทิศทางเดียวกับที่แรงลอเรนซ์กระทำ เมื่อ  $\mu_p p$  และ  $-\mu_n n$  คูณทั้งสองสมการใน (2.20) จะได้

$$\begin{aligned} J_p(B) &= J_p(0) + \mu_p [J_p(B) \times B] \\ J_n(B) &= J_n(0) - \mu_n [J_n(B) \times B] \end{aligned} \quad (2.21)$$

ซึ่ง  $J_p(B)$  และ  $J_n(B)$  คือความหนาแน่นกระแสโฮลและอิเล็กตรอนในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน  $B$  ตามลาดับ

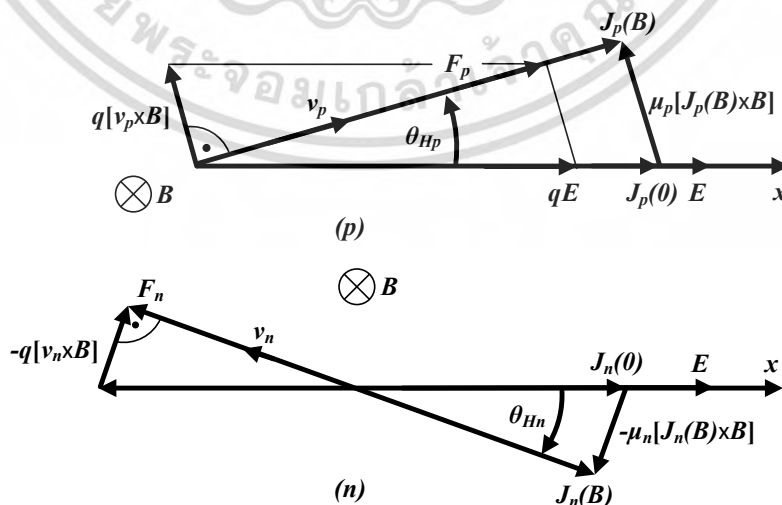
$$\begin{aligned} J_p(B) &= q\mu_p p E_p = \mu_p p F_p = q p v_p \\ J_n(B) &= q\mu_n n E_n = \mu_n n F_n = -q n v_n \end{aligned} \quad (2.22)$$

และ  $J_p(0)$  และ  $J_n(0)$  คือความหนาแน่นกระแสลอยเลื่อนเนื่องจากสนามไฟฟ้า  $E$  เมื่อ  $B = 0$

$$J_p(0) = q\mu_p p E \quad J_n(0) = q\mu_n n E \quad (2.23)$$

สมการ (2.19), (2.21) และ (2.23) จะแสดงออกมาเป็นแผนภาพในรูปที่ 2.6 ทิศทางของเวกเตอร์  $E$  และ  $B$  จะสอดคล้องกับรูปที่ 2.3 ซึ่งสนามไฟฟ้าภายนอก  $E$  จะมีทิศทางตามแนวแกน  $x$  สนามแม่เหล็กมีทิศในแนวแกน  $y$  และสมมุติว่าสนามไฟฟ้าภายนอกและสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ คุณสมบัติที่สำคัญของแผนภาพในรูปที่ 2.5 คือเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าภายนอก  $E$  และความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้น  $J_p(B)$  และ  $J_n(B)$  จะไม่ได้อยู่ร่วมแกนเดียวกัน สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำ สันสนามแม่เหล็กจะเบี่ยงเบนกระแสจากเส้นทางปกติตามสนามไฟฟ้า

มุมฮอลล์ (Hall angle)



รูปที่ 2.6 แผนภาพของสมการเวกเตอร์ (2.19), (2.21) และ (2.23) ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำ สำหรับสารกึ่งตัวชนิด  $p$  ( $p$ ) และชนิด  $n$  ( $n$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณปรากฏการณ์ฮอลล์จะแสดงออกมาในรูปการเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส  $J(B)$  จากสนามไฟฟ้าภายนอก  $E$  มุมของการเบี่ยงเบนคือมุมฮอลล์  $\theta_H$

ใน extreme case ของแผ่นคอร์บิโนจะไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นเลยและสนามไฟฟ้าภายนอกจะเป็นสนามไฟฟ้าลัพท์ ดังนั้นมุมฮอลล์ก็คือมุมการเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแสเทียบกับทิศของสนามไฟฟ้าลัพท์ในแผ่นตัวอย่าง ค่าจำกัดความของมุมฮอลล์จะเหมือนกับที่เสนอไว้ก่อนหน้านี้ (สมการที่ (2.13)) ยิ่งไปกว่านั้นด้วยการใช้แผนภาพในรูปที่ 2.6 เราจะได้

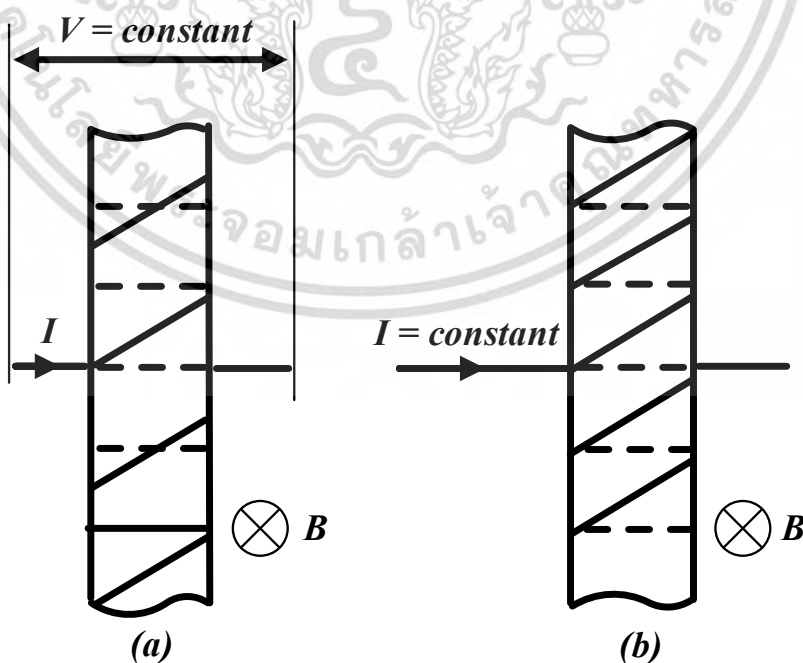
$$\tan \theta_{Hp} = \mu_p B_{\perp} \quad \tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_{\perp} \quad (2.24)$$

ความสัมพันธ์ที่กำหนดค่าและเครื่องหมายของมุมฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวและสั้นจะเหมือนกัน (สมการที่ (2.13) และ (2.24))

โปรดสังเกตว่าในการอธิบายข้างต้นของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณ เราจะได้กล่าวถึงความหนาของแผ่น  $t$  ในรูป 2.4 นั้นหมายความว่าไม่เหมือนกรณีของปรากฏการณ์ฮอลล์ธรรมดา อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสอาจไม่จำเป็นต้องเป็นแผ่น (plate-like) เสมอไป แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่มีความบางจะทำให้มีความต้านทานสูงและทำให้ต้องการกระแสในการทำงานต่ำ ด้วยเหตุผลนี้รูปร่างที่คล้ายกับแผ่นยังคงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแส

### 2.1.1.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

จากการตรวจสอบแผนภาพในรูป 2.6 เราจะสังเกตเห็นว่าเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแส  $J(B)$  จะมีขนาดน้อยกว่า  $J(0)$  นั้นหมายความว่าในแผ่นสารกึ่งตัวนำ แบบสั้นสนามแม่เหล็กยังทำให้เกิดปรากฏการณ์เพิ่มเติม โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลง



รูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณที่ถูกป้อนด้วยแรงดันคงที่ (a)

และกระแสคงที่ (b) เส้นประคือเส้นกระแสที่  $B = 0$  ในขณะที่เส้นทึบแสดงถึงเส้นกระแสที่  $B \neq 0$  เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7 ดังแสดงในรูปที่ 2.7(a) ความหนาแน่นกระแสเมื่อมีสนามแม่เหล็กจะน้อยกว่าตอนที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก การลดทอนความหนาแน่นกระแสเป็นผลมาจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส โดยเส้นกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนระหว่างขั้วไฟฟ้าของแผ่นตัวอย่างจะยาวขึ้น ด้วยเส้นทางการเดินกระแสที่ยาวขึ้น นั้นหมายความว่า มันจะส่งผลให้ความต้านทานของแผ่นตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับแผ่นตัวอย่างที่ถูกไบอัสด้วยแรงดันคงที่ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านแผ่นตัวอย่างลดลง ในขณะที่แผ่นตัวอย่างที่ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแผ่นตัวอย่างสูงขึ้น

เพื่อที่จะหาว่าความหนาแน่นกระแสลดลงไปเนื่องจากสนามแม่เหล็ก เราจะหาผลเฉลยของสมการที่ (2.21) สำหรับสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉาก  $E \cdot B = 0$  ผลเฉลยของสมการ (2.21) จะเป็น

$$\begin{aligned} J_p(B) &= \sigma_{pB} E + \sigma_{pB} \mu_p [E \times B] \\ J_n(B) &= \sigma_{nB} E - \sigma_{nB} \mu_n [E \times B] \end{aligned} \quad (2.25)$$

โดย

$$\sigma_{pB} = \frac{\sigma_{p0}}{1 + (\mu_p B)^2} \quad \sigma_{nB} = \frac{\sigma_{n0}}{1 + (\mu_n B)^2} \quad (2.26)$$

เป็นสภาพนำไฟฟ้ายังผล (effective conductivity) ของแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  และ  $n$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ส่วน  $\sigma_{p0}$  และ  $\sigma_{n0}$  เป็นสภาพนำไฟฟ้าตอนที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก โปรดทราบว่าสัมประสิทธิ์  $\sigma_B$  (สมการที่ (2.26)) ใช้สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น เนื่องจากเราพิจารณาแผ่นกึ่งตัวนำสั้นโดยหิบบมาจากส่วนของแผ่นคอร์บิโน ดังนั้นเราจะเรียกสัมประสิทธิ์  $\sigma_B$  ว่าสภาพนำไฟฟ้าของคอร์บิโน (Corbino conductivity)

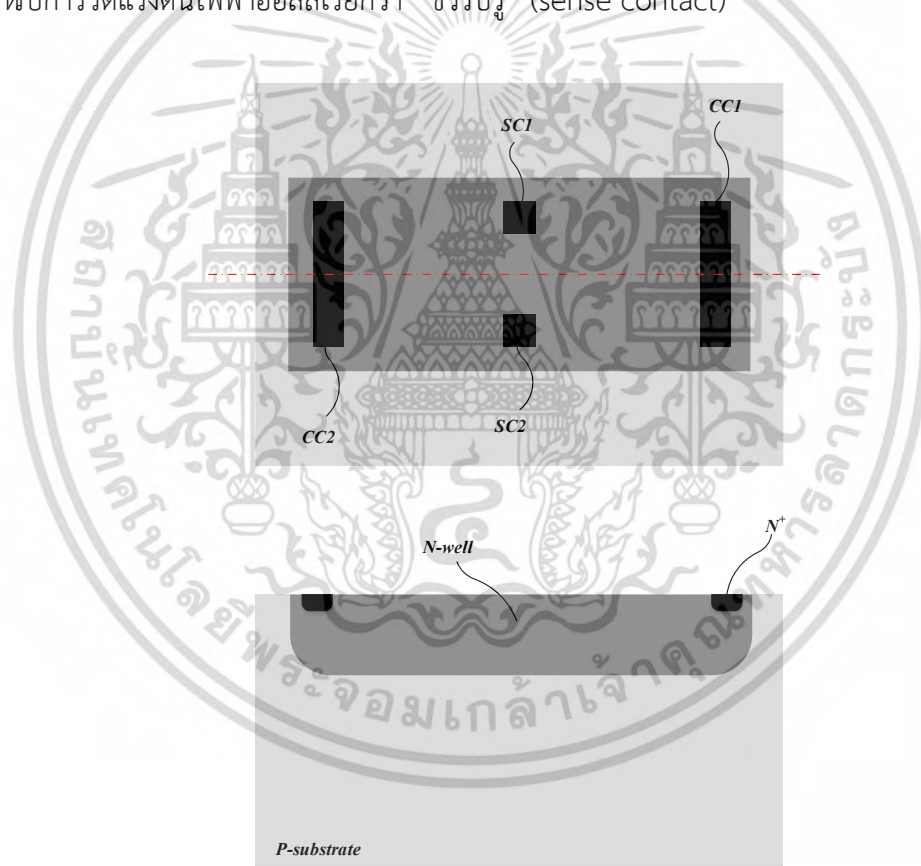
จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) เราสามารถอนุมานได้ว่ากระแสภายในอุปกรณ์จะมีค่าลดลงเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นถ้าแผ่นตัวอย่างมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุจะลดลง สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\rho_{pB} - \rho_{p0}}{\rho_{p0}} = (\mu_p B)^2 \quad \frac{\rho_{nB} - \rho_{n0}}{\rho_{n0}} = (\mu_n B)^2 \quad (2.27)$$

การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าในวัสดุภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์” การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นตัวอย่างสั้นจะถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์เชิงเรขาคณิต (geometrical magnetoresistance effect)” คำว่าเชิงเรขาคณิตสะท้อนถึงความจริงที่ว่าปรากฏการณ์เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของเส้นกระแสดังแสดงในรูป 2.7

### 2.1.2 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ถูกพัฒนามบนเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำจะมาจากแผ่นตัวนำที่ใช้ในการทดลองของฮอลล์ (อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของฮอลล์จะตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศที่ตั้งฉากกับพื้นผิวและให้กำเนิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในแนวราบที่ขนานกับพื้นผิว เราจึงอาจเรียกอุปกรณ์ที่มีลักษณะแบบนี้ว่า Hall-plate หรืออุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ (Horizontal Hall Device หรือ Lateral Hall Device)) [32, 33] โดยลักษณะโครงสร้างของตัวอุปกรณ์จะถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายแผ่นของตัวนำบาง ซึ่งอาจสร้างด้วยการยิงฝังประจุ การแพร่สารเจือหรืออาจใช้ฐานรองเป็นตัวอุปกรณ์โดยตรง แต่สำหรับการสร้างบนเทคโนโลยี CMOS [34] จะนิยมสร้างเป็นบ่อ (well) ด้วยการยิงฝังประจุหรือการแพร่ เพราะสามารถควบคุมบริเวณทำงาน (active area) ของตัวอุปกรณ์ได้ ตัวอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยขั้ว 4 ขั้วที่ถูกสร้างลงบนบ่อ แต่ละขั้วจะถูกเจือด้วยความเข้มข้นสูงเพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก ตำแหน่งของขั้วจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8 ขั้ว CC1 และ CC2 จะใช้สำหรับการไบอัสกระแสเรียกว่า “ขั้วกระแส” (current contact) ส่วนขั้ว SC1 และ SC2 จะใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เรียกว่า “ขั้วรับรู้” (sense contact)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ

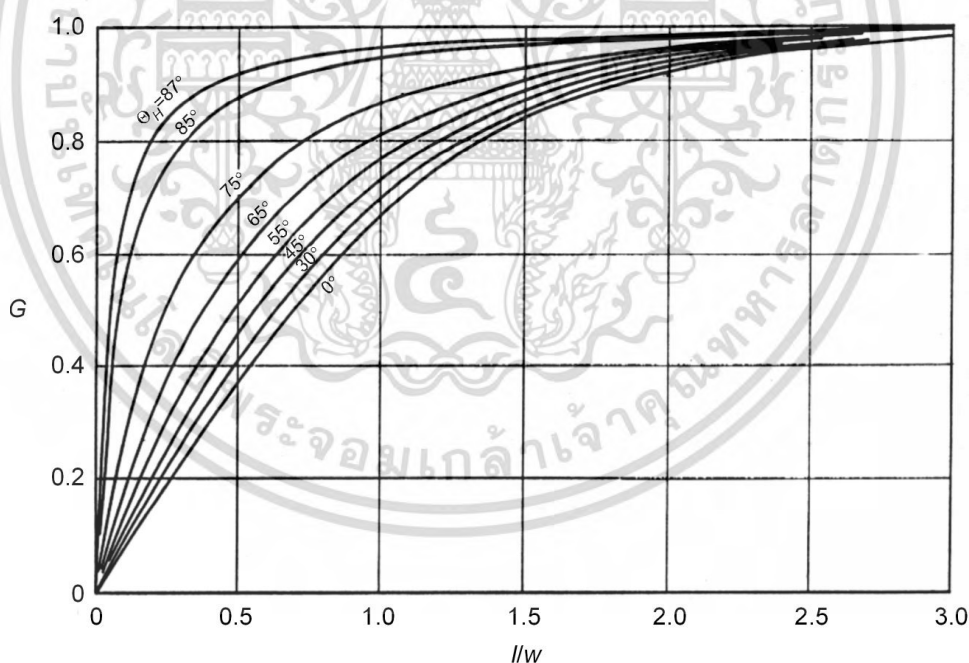
การสร้างอุปกรณ์ฮอลล์บนเทคโนโลยี CMOS โดยส่วนใหญ่จะสร้างลงบนฐานรองชนิด  $p$  เนื่องจากการสร้างตัวอุปกรณ์ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  มีข้อดีก็คือ สารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  มีสภาพคล่องของพาหะที่สูงกว่าชนิด  $p$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (สมการที่ (2.12)) รูปร่างของตัวอุปกรณ์ยังสามารถออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างกันออกไปเพื่อให้ได้การตอบสนอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดีที่สุด [35] สำหรับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อธิบายไปตอนต้น แต่เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างที่อาจทำให้ลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์มีความแตกต่างกัน เพื่อความถูกต้องเราจะกำหนดตัวแปรขึ้นมาเพิ่มอีกตัวเรียกว่า “Geometrical correction factor” ( $G$ ) ดังนั้นจากสมการที่ (2.18) จะได้

$$V_H = G \frac{R_H}{t} IB_{\perp} \quad (2.28)$$

โดยที่  $R_H$  คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient),  $G$  คือแฟคเตอร์โครงสร้าง (Geometrical factor),  $t$  คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์,  $B_{\perp}$  คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์

สำหรับ Geometrical factor ของโครงสร้างฮอลล์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมได้ถูกคำนวณโดย Lippmann และ Khurt [36] และ Haeusler [37] ด้วยวิธีการ conformal mapping ซึ่งได้ผลแสดงดังรูป 2.9 เราจะสมมติว่าขั้วรับรูมีขนาดเล็กมากและวางอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง ซึ่งแฟคเตอร์โครงสร้างจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอัตราส่วนความยาว ( $l$ ) ต่อความกว้าง ( $w$ ) และมุมฮอลล์ ( $\theta_H$ )



รูปที่ 2.9 แฟคเตอร์โครงสร้างของแผ่นฮอลล์สี่เหลี่ยม

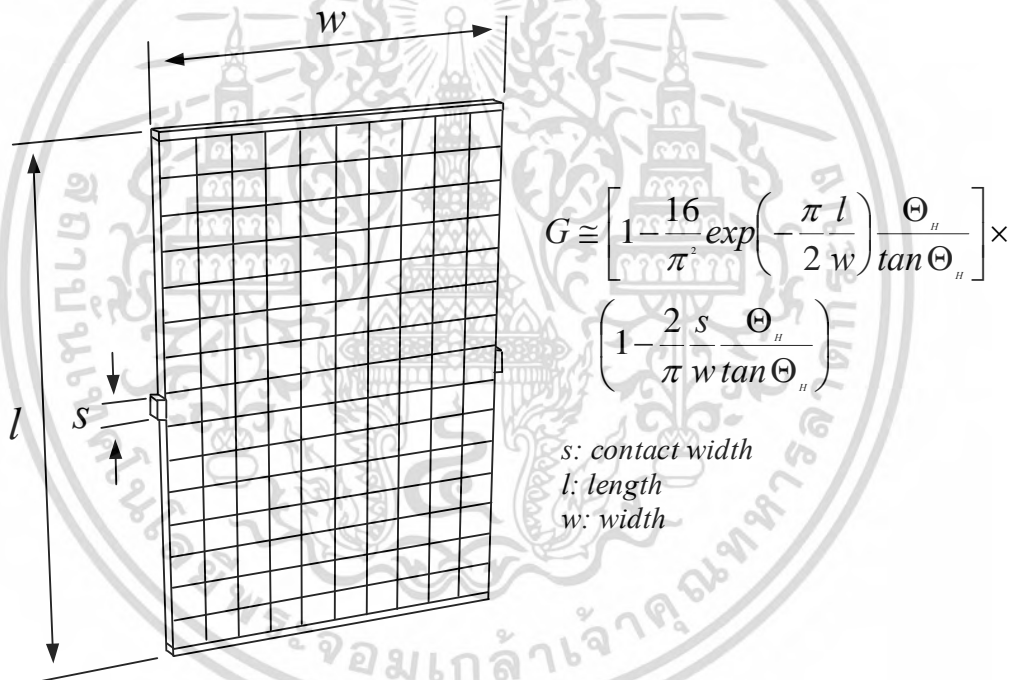
สำหรับแผ่นฮอลล์หรืออุปกรณ์ฮอลล์ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและมีขั้วรับรูที่เล็กมากเราสามารถประมาณค่าแฟคเตอร์โครงสร้างได้จาก

$$G \cong 1 - \frac{16}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi l}{2w}\right) \left[1 - \frac{8}{9} \exp\left(-\frac{\pi l}{2w}\right)\right] \left(1 - \frac{\theta_H^2}{3}\right) \quad (2.29)$$

เมื่อ  $0.85 \leq l/w < \infty$  และ  $0 \leq \theta_H \leq 0.45$

สำหรับแผ่นฮอลล์ที่ค่อนข้างยาว  $l/w > 1.5$  และมีขนาดขั้วรับรู้อเล็ก  $s/w < 0.18$  ( $s$  คือความกว้างของขั้วรับรู้อ (รูปที่ 2.10)) ค่าแฟคเตอร์ของอุปกรณ์จะเข้าใกล้ 1 เมื่ออัตราส่วน  $l/w > 3$  และ  $s/w < 20$  [37]

$$G \cong \left[1 - \frac{16}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi l}{2w}\right) \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right] \left(1 - \frac{2s}{\pi w \tan \theta_H}\right) \quad (2.30)$$



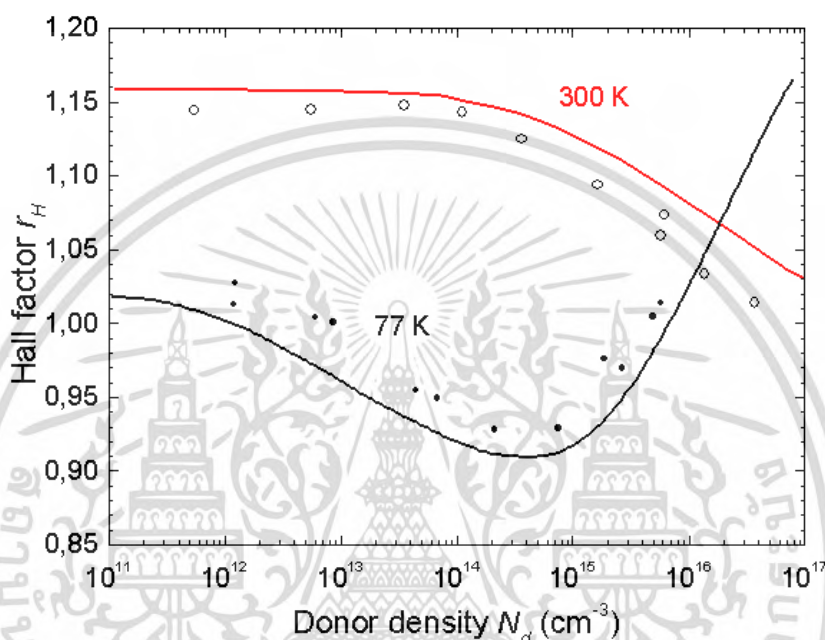
รูปที่ 2.10 แฟคเตอร์โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม

จากการอธิบายช่วงต้นเราจะไม่ได้พูดถึงการกระเจิงเนื่องจากการชนของพาหะ เพื่อให้สมการเข้าใกล้ค่าความจริงมากยิ่งขึ้นเราจะท การเพิ่มตัวแปรที่ขึ้นกับการชนของพาหะเรียกว่า “Hall scattering factor หรือ Hall factor” ( $r_H$ ) เข้าไปดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (2.28) ใหม่โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.17) เป็น สมการที่ (2.31) (ส่วนนี้เราจะสนใจเฉพาะขนาดจึงไม่น่าเครื่องหมายเข้ามาพิจารณา) แฟคเตอร์ฮอลล์ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือผู้ให้ในสารกึ่งตัวน ชนิด  $n$  ที่อุณหภูมิห้องจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.11 [38] โดยเส้นที่บคือผลจากการคำนวณส่วนสัญลักษณ์จุดและวงกลมคือผลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = G \frac{r_H}{qnt} IB_{\perp} \quad (2.31)$$

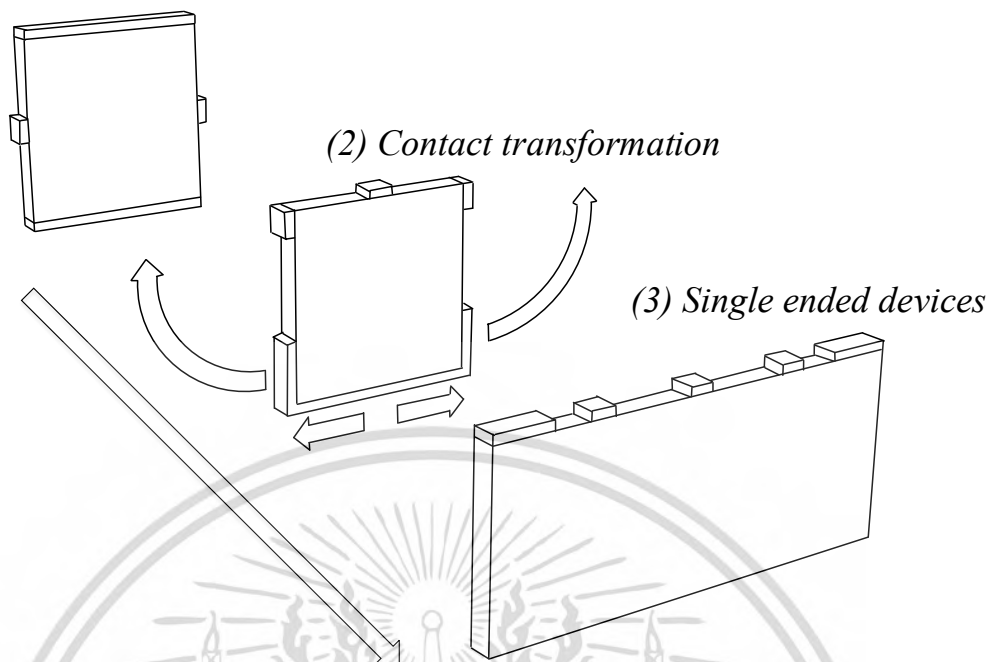
โดยที่  $r_H$  คือ แฟคเตอร์การกระเจิงของฮอลล์ (Hall scattering factor),  $G$  คือแฟคเตอร์โครงสร้าง,  $t$  คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์,  $B_{\perp}$  คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์



รูปที่ 2.11 แฟคเตอร์ฮอลล์ที่ขึ้นกับความเข้มข้นอะตอมของสารเจือผู้ให้

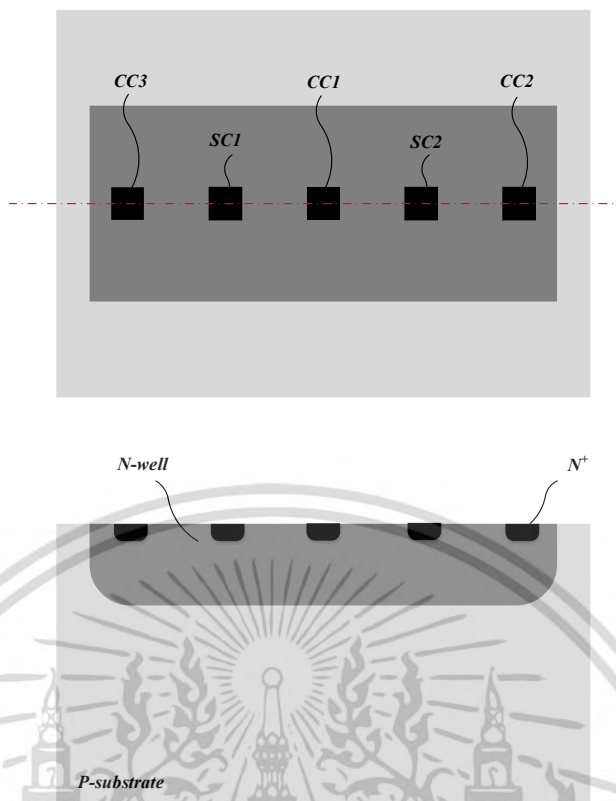
นอกจากอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวแกนที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์แล้ว (รูปที่ 2.8) ยังมีการพัฒนาอุปกรณ์ฮอลล์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวแกนที่สนามแม่เหล็กขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ เรียกว่า “อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง” (Vertical Hall Device) ซึ่งถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย R.S. Popovic [39] โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งได้รับการพัฒนามาจากอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบโดยการพิจารณาว่าหากนาอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบที่มีลักษณะเป็นแผ่นมาวางตั้งในแนวขวางจะทำให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในอีกแนวแกน เพื่อให้กระบวนการสร้างเป็นไปได้จริงและง่ายที่สุดเราจะทำการย้ายขั้วที่ต้องอยู่ด้านล่างขึ้นมาไว้บนพื้นผิวด้านหน้าทั้งหมดให้เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีพลาโน (Planar technology) โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ดัดแปลงมาจากอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.12 [40] (คำว่า “แนวตั้ง” อ้างอิงตามแนวของสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ เช่นเดียวกับกับอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ) จากรูปจะเห็นได้ว่าหากจับอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบทั่วไปมาตั้งในแนวตั้งฉากและย้ายขั้วทั้งหมดให้ขึ้นมาไว้ที่ผิวจะท ให้เราได้อุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวแกนที่สนามขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์ได้

## (1) Conventional Hall plate



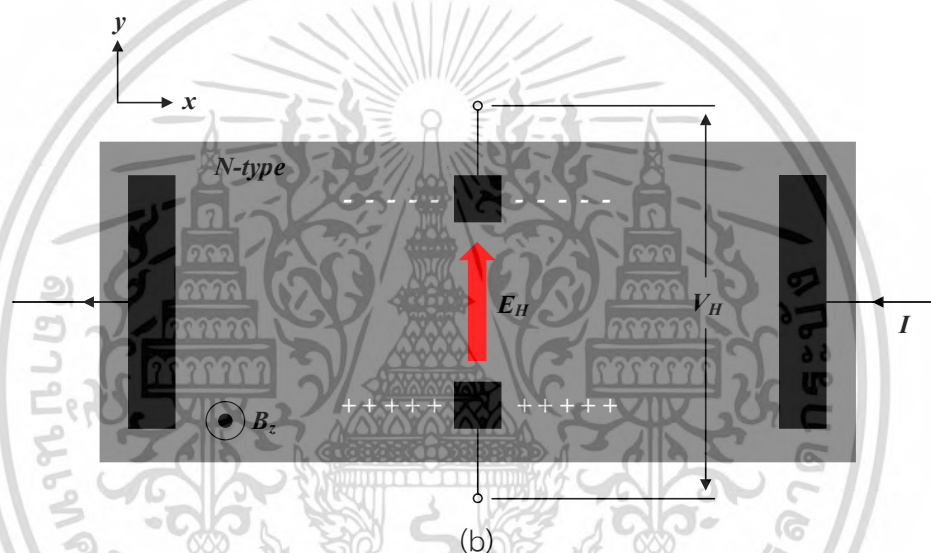
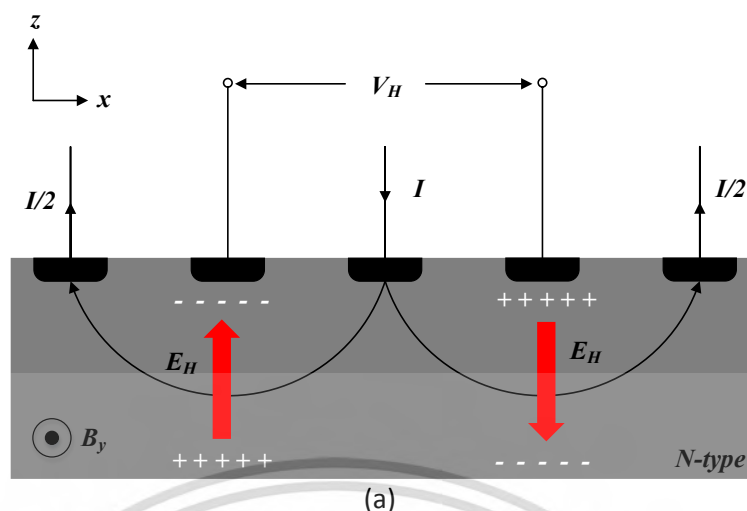
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่พัฒนามาจากโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนราบ

โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยขั้ว 5 ขั้วที่ถูกสร้างลงบนฐานรองโดยตรงหรือสร้างลงบนบ่อในเทคโนโลยี CMOS (รูปที่ 2.13) แต่ละขั้วจะถูกเจือด้วยความเข้มข้นสูงเพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก ขั้วกระแสของตัวอุปกรณ์จะมีอยู่ 3 ขั้ว (CC1, CC2 และ CC3 ในรูปที่ 2.13) เนื่องจากการยกขั้วทั้งหมดขึ้นมามีขนาดเดียวกันทำให้ขั้วกระแสที่อยู่ด้านกลางจำเป็นต้องแยกออกเป็น 2 ขั้ว ทำให้อุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงมีขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมาอีก 1 ขั้วเมื่อเทียบกับอุปกรณ์แวนราบ ส่วนขั้วรับรู้จะวางอยู่กึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสามคล้ายกับอุปกรณ์ฮอลล์แวนราบเดิม (SC1 และ SC2 ในรูปที่ 2.13) สำหรับหลักการทางานของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงจะใช้กลไกที่เหมือนกับอุปกรณ์ฮอลล์แวนราบนั่นก็คือปรากฏการณ์ฮอลล์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์จะทำให้เกิดการสะสมพาหะบริเวณขั้วรับรู้ทั้งสองฝั่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นสองฝั่งในลักษณะที่มีทิศตรงข้ามกัน เนื่องจากสนามไฟฟ้าทั้งสองถูกอนุกรมด้วยฐานรองเราจึงสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จากสนามไฟฟ้าทั้งสองที่ขั้วรับรู้ได้ จากปรากฏการณ์กลับว่าโนแมกเนติกที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้จะเห็นได้ว่าเมื่ออุปกรณ์ฮอลล์อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กนอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นแล้วยังมีปรากฏการณ์อีกสองอย่างที่เกิดขึ้นมาด้วย แต่ความโดดเด่นของปรากฏการณ์แต่ละอย่างจะขึ้นอยู่กับการออกแบบให้อุปกรณ์มีความสามารถในการตอบสนองต่อปรากฏการณ์นั้นๆ ได้ดีแค่ไหน



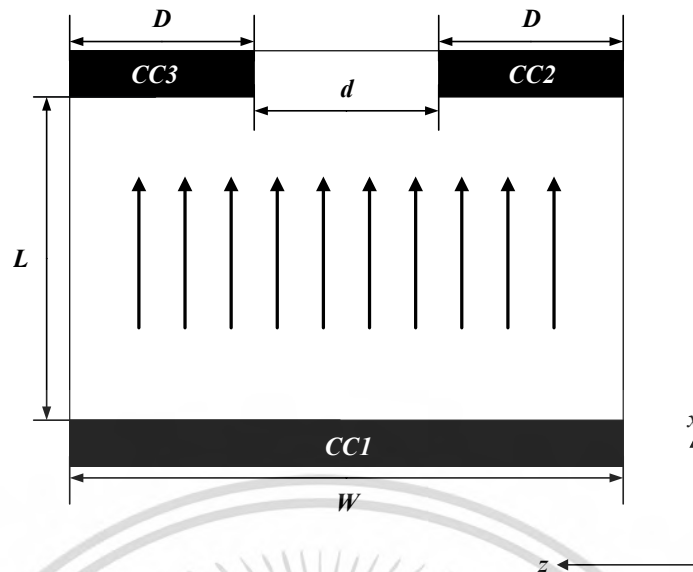
รูปที่ 2.13 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบถึงแม้จะมีปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสและปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์เกิดขึ้น แต่ด้วยการออกแบบให้อุปกรณ์มีความยาวมากกว่าความกว้างเพื่อตอบสนองต่อปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ดีและมีขั้วกระแสที่เข้าและออกเพียงสองขั้วจึงทำให้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสไม่สามารถนำมาใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ส่วนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์เนื่องจากอุปกรณ์ไม่ได้ออกแบบมาให้มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานและเพื่อให้กระแสสำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอ เราจึงจะทำการไบอัสอุปกรณ์ด้วยกระแสคงที่เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ดังนั้นอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบจึงมีเฉพาะปรากฏการณ์ฮอลล์ที่โดดเด่น อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบเป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาและออกแบบให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์แต่มีทิศทางการตอบสนองและการสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้เราไม่ต้องยุ่งยากในการตั้งอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบให้ขึ้นมาวางตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก โดยเราสามารถใช้อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวแทนได้เลย รูปเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบและแนวตั้งจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.14 (ในรูปแสดงการสะสมของประจุพาหะและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่สอดคล้องกับทิศของสนามแม่เหล็กและทิศของกระแสหรือทิศของความเร็วพาหะ)

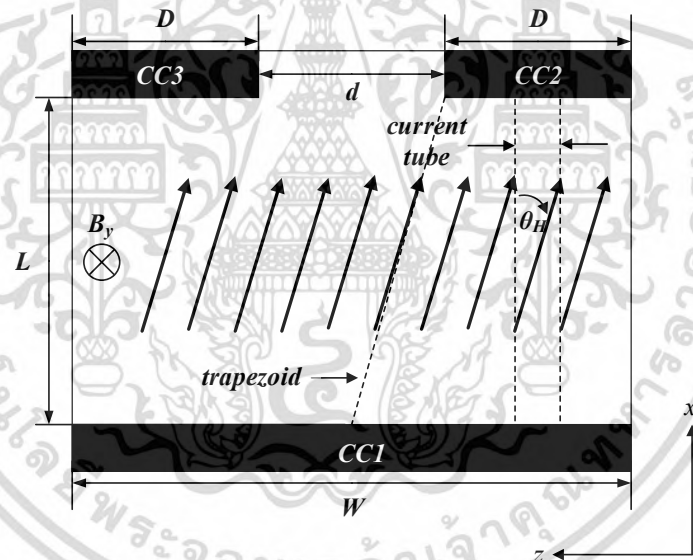


รูปที่ 2.14 ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (a) และแนวราบ (b)

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส ตัวอุปกรณ์มักจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมือนแผ่นฮอลล์แบบสี่เหลี่ยมและมีขั้วกระแสอย่างน้อย 3 ขั้ว (รูปที่ 2.15) เพื่อที่จะป้อนกระแสให้ขั้วหนึ่งและอีกสองขั้วใช้สำหรับวัดความแตกต่างของกระแสที่ออกมาจากขั้วทั้งสอง โดยตัวอุปกรณ์ประเภทนี้สามารถพิจารณาการเกิดความแตกต่างของกระแสได้ตามรูปที่ 2.15 และ 2.16 ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสจะแบ่งไหลไปยังขั้วทั้งสองฝั่งเท่า ๆ กัน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาครอบงวน สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ ทำให้พาหะมีเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะหรือการเบี่ยงเบนของพาหะจะทำให้เกิดมุมการเบี่ยงเบนหรือมุมฮอลล์ขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.24) เพื่อความง่ายในการพิจารณาความแตกต่างของกระแส ( $\Delta I$ ) เราอาจประมาณค่ากระแสจากท่อกระแสเล็ก ๆ (current tube) ตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็กขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็กขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

ท่อกระแสตามรูปที่ 2.17 จะถูกประมาณการว่ามีอิเล็กตรอนไหลจากฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่ง และมีความหนาแน่นกระแสที่ไหลในท่อคงที่และสม่ำเสมอ โดยความหนาแน่นกระแสภายในท่อคือ  $J_{nx}$  ความกว้างของท่อกระแสคือ  $W_z$  ความหนาของช่องทางเดินกระแสคือ  $T_y$  และ  $L$  คือความยาวช่องทางเดินกระแส เราจะอนุมานว่าด้านที่มีสองขั้วมีระยะห่างระหว่างขั้ว  $d \ll W$  กระแสที่ไหลในท่อกระแสขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก สำหรับฝั่งขั้ว CC2 สามารถเขียนได้เป็น

$$I_{2,0} = J_{nx,2} T_y W_{z,2} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อหาความแตกต่างของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็ก การไหลของกระแสจะถูกเบี่ยงเบนด้วยมุม  $\theta_H$  ตามสมการ

$$\tan\theta_H = \mu B_y = \frac{\Delta Z}{L} \quad (2.33)$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสในท่อกระแสเนื่องจากการเบี่ยงเบนของกระแสสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta I_2 = J_{nx,2} T_y \Delta Z \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.33) และ (2.34) เราจะได้

$$\Delta I_2 = J_{nx,2} T_y \mu B_y L \quad (2.35)$$

ด้วยสมการที่ (2.32) และ (2.35) เราสามารถแทน  $J_{nx,2}$  เป็นฟังก์ชันของ  $I_{2,0}$  เป็น

$$\Delta I_2 = I_{2,0} \mu B_y \frac{L}{W_{z,2}} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.36) สามารถทำให้ครอบคลุมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoid) ซึ่งเป็นความกว้างของท่อกระแสที่เป็นไปได้ทั้งหมด ด้วย  $W_{z,CC0} = D + d/2$  ดังแสดงในรูป 2.17 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็ก  $B_y$  ของขั้ว CC2 สามารถเขียนเป็น

$$\Delta I_{CC2} = I_{CC2,0} K \quad (2.37)$$

เมื่อ  $K = \mu B_y \frac{L}{D + d/2}$  และ  $I_{CC2,0} = J_{nx,2} T_y \left( D + \frac{d}{2} \right)$

เพราะฉะนั้นผลของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก  $B_y$  ทั้งหมดคือ

$$I_{CC2} = I_{CC2,0} (1 + K) \quad (2.38)$$

$$I_{CC3} = I_{CC3,0} (1 - K) \quad (2.39)$$

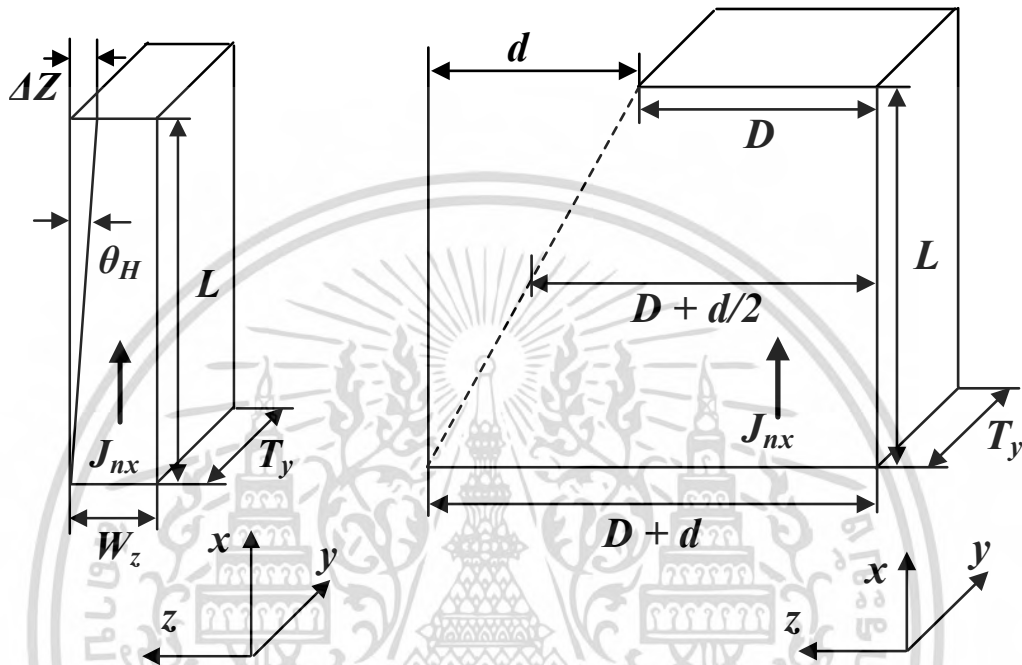
ที่  $B_y = 0$  กระแส  $I_{CC2,0} = I_{CC3,0}$  ดังนั้นกระแสทั้งหมดจะเท่ากับ

$$I_{CC1,0} = I_{CC2,0} + I_{CC3,0} = 2I_{CC2,0} \quad (2.40)$$

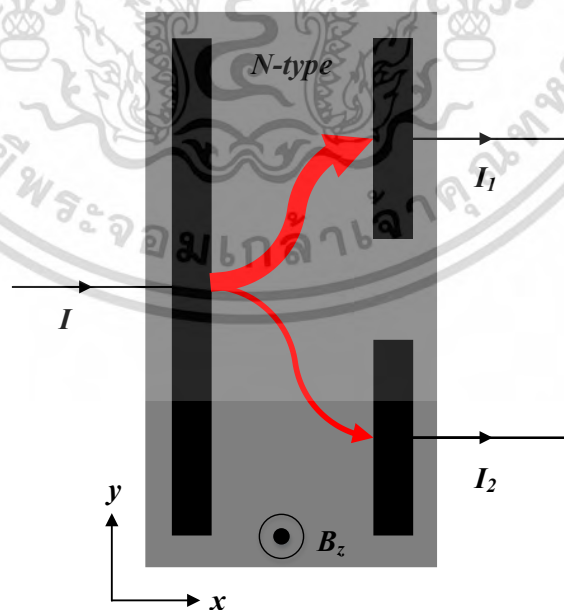
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถระบุความแตกต่างของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็ก  $B_y$  ได้ โดย

$$\Delta I = |I_{CC2} - I_{CC3}| = 2I_{CC2,0}K \tag{2.41}$$



รูปที่ 2.17 ท่อกระแสและท่อกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนที่เป็นไปได้ทั้งหมด (รูปสี่เหลี่ยมคางหมู)

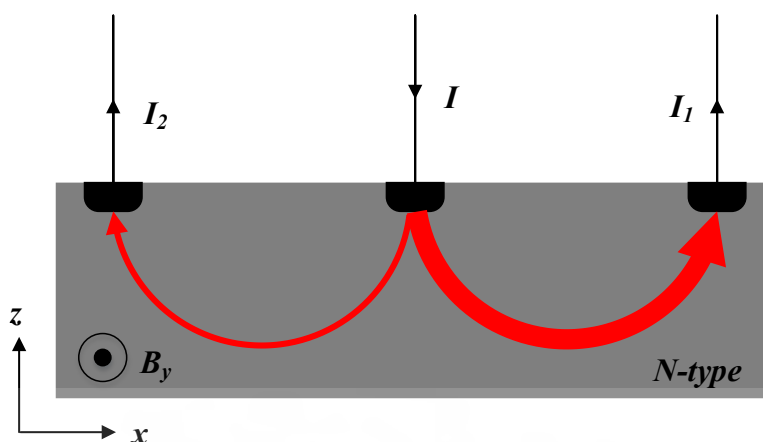


(a)

รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส (a) และ

สมมติฐานของปรากฏการณ์การเบี่ยงของกระแสที่อาจเกิดขึ้นบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 2.18 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส (a) และ สมมุติฐานของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสที่อาจเกิดขึ้นบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (b)

จากโครงสร้างตัวอุปกรณ์และการพิจารณาความแตกต่างของกระแสข้างต้น ท ให้สามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ถูกออกแบบให้มีขั้วกระแสสามขั้วอาจจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสขึ้น (รูปที่ 2.18) สำหรับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ในอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบเนื่องจากตัวอุปกรณ์ถูกออกแบบมาให้ตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ในการใช้งานเราจึงเลือกไบอัสกระแสคงที่เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสแทนปรากฏการณ์ฮอลล์หรืออาจเรียกว่า “การทำงานในโหมดกระแส” แทนที่ “การทำงานในโหมดแรงดัน” โดยเราจะศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่อาจมีผลดีหรือเสียต่ออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในโหมดกระแส

สำหรับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง สามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีของอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ (สมการที่ (2.31)) ดังนั้นเราสามารถระบุความไว (sensitivity) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันได้ตามสมการ (ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก คือค่าที่บอกความสามารถของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไปเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตได้มากน้อยแค่ไหน)

$$S_H = \frac{\Delta V_H}{\Delta B} \quad [V/T] \quad (2.42)$$

ในกรณีที่เราไบอัสอุปกรณ์ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ที่จะทำให้เราสามารถระบุความไวที่สัมพันธ์กับกระแสที่ไบอัส (current-related sensitivity) ได้ตามสมการ

$$S_{H_I} = \frac{\Delta V_H}{I(\Delta B)} \quad [V/AT] \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือในกรณีที่ไปอัสสุปกรณด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ เราสามารถระบุความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันเป็น

$$S_{H_V} = \frac{\Delta V_H}{V(\Delta B)} \quad [V/VT] \quad (2.44)$$

หากวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ฮอลล์ในโหมดกระแสเราอาจจะระบุความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเป็น

$$S_{\Delta I} = \frac{\Delta I}{\Delta B} \quad [A/T] \quad (2.45)$$

หรืออาจจะระบุในรูปแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการนำตัวต้านทานไปต่อที่ขั้วกระแสที่ถูกแบ่งออกเป็นสองขั้ว (CC2 และ CC3) แล้ววัดผลต่างของแรงดันที่เกิดจากความแตกต่างกระแส

$$S'_{\Delta I} = \frac{\Delta V_{\Delta I}}{\Delta B} \quad [V/T] \quad (2.46)$$

ดังนั้นความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโหมดกระแส ที่สัมพันธ์กับกระแสไปอัสสามารถระบุได้ตามสมการ

$$S_{\Delta I} = \frac{\Delta I}{I(\Delta B)} \quad [A/AT] \quad (2.47)$$

และความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันสามารถระบุได้ตามสมการ

$$S_{\Delta V} = \frac{\Delta V}{V(\Delta B)} \quad [A/VT] \quad (2.48)$$

## บทที่ 3

# การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

เนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ชั้น นั่นก็คือ Sentaurus TCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับทางวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้โดยบริษัทชั้นนำในด้านนี้ อย่างเช่น GlobalFoundries, Qualcomm, Microsemi, ON Semiconductor เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้เราเลือกใช้การจำลองแบบเพื่อลดระยะเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งตัวเครื่องมือยังมีข้อดีในด้านที่สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ได้ในเชิงลึก ซึ่งการวัดจริงไม่สามารถทำได้

ในช่วงต้นจะเป็นการกล่าวรายละเอียดอย่างคร่าวๆ ของตัวโปรแกรม จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ชั้น ซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบโครงสร้างและการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้า โดยทั้งสองส่วนจะถูกกล่าวโดยละเอียดเพื่อให้ความเข้าใจในวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้

### 3.1 Sentaurus TCAD

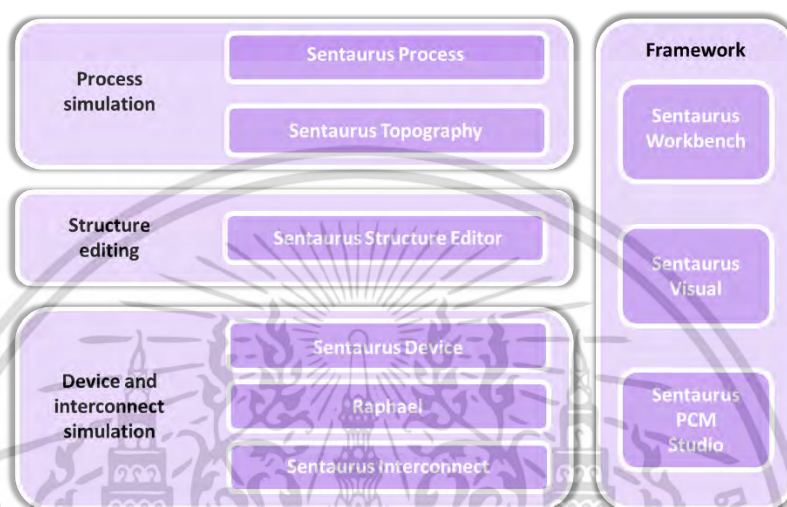
Technology Computer-Aided Design หรือ Technology CAD (TCAD) ถูกจัดอยู่ใน Electronic Design Automation (EDA) หรืออาจเรียกว่า Electronic Computer-Aided Design (ECAD) ซึ่งเป็นกลุ่มซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรรวม, แผ่น PCB เครื่องมือนี้ถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ชิปสารกึ่งตัวนำทั้งหมด เนื่องจากชิปสารกึ่งตัวนำสมัยใหม่มีส่วนประกอบที่เยอะมาก ทำให้เครื่องมือ EDA จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

TCAD เป็นกลุ่มซอฟต์แวร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการจำลองกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเอง โดยการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่ในรูปแบบของ Process TCAD ในขณะที่การจำลองแบบการใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะอยู่ในรูปแบบของ Device TCAD ตัวเครื่องมือจะประกอบไปด้วยการจำลองแบบกระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอน (เช่น การยิงฝังประจุ, การแพร่สารเจือ) และการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โดยอาศัยโมเดลพื้นฐานทางฟิสิกส์

การจำลองแบบด้วย TCAD ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำ มีความซับซ้อนมากและมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนที่สูง ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์แก้ไขและป้องกันข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตรวมทั้งการวิเคราะห์และออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จึงนิยมใช้ TCAD เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความน่าเชื่อถือในกระบวนการผลิตและออกแบบ

Sentaurus เป็นชุดเครื่องมือ TCAD ซึ่ง ครอบคลุมการสร้างและการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยชุดเครื่องมือทั้งหมดของ Sentaurus TCAD สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม 3 กลุ่มหลักๆ ตามรูปที่ 3.1 กลุ่ม Process simulation เป็นกลุ่มสำหรับจำลองกระบวนการสร้างแต่ละขั้นตอนโดยมีเครื่องมืออยู่สองตัวนั่นคือ Sentaurus Process และ Sentaurus Topography กลุ่ม Structure เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

editing เป็นกลุ่มสำหรับใช้ขึ้นโครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างลงมีเครื่องมือคือ Sentaurus Structure editor กลุ่ม Device and interconnect simulation เป็นกลุ่มสำหรับจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์โดยใช้โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆ ซึ่งมีเครื่องมือคือ Sentaurus Device, Raphael, Sentaurus Interconnect โดยชุดเครื่องมือทั้งหมดจะใช้งานผ่านหน้า Frame work ซึ่งประกอบไปด้วย Sentaurus Workbench, Sentaurus Visual และ Sentaurus PCM Studio

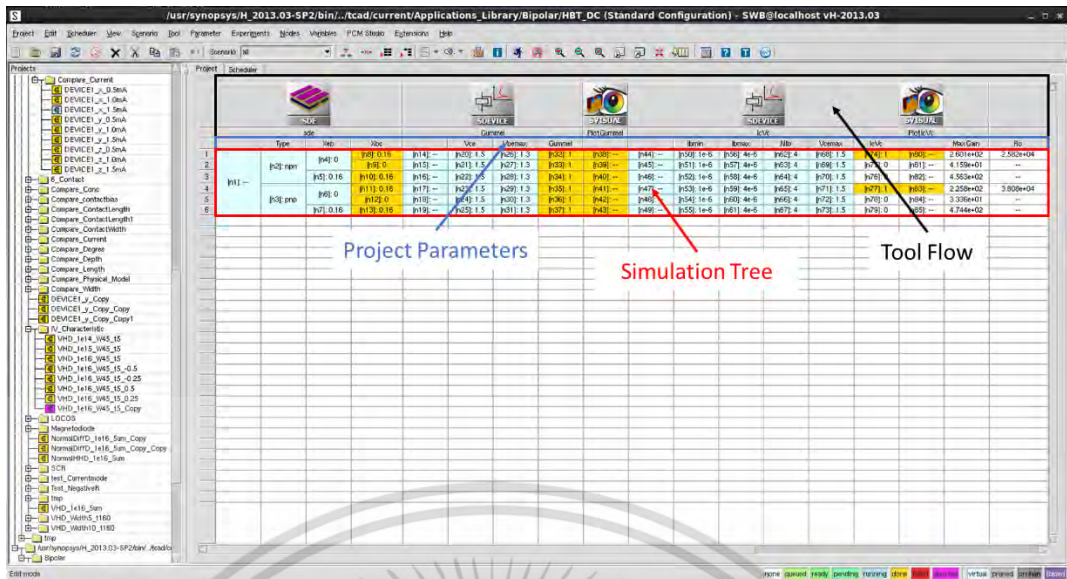


รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือของ Sentaurus TCAD

ในการจำลองแบบเราจะใช้งานเครื่องมือหลักๆ คือ Sentaurus Structure Editor สำหรับขึ้นรูปโครงสร้างของอุปกรณ์และ Sentaurus Device สำหรับการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าและการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยเราจะใช้งานและดูผลการจำลองแบบผ่าน Sentaurus Workbench และ Sentaurus Visual ดังนั้นเนื้อหาในส่วนนี้เราจะพูดถึงแค่เครื่องมือที่เราใช้งาน

### 3.1.1 Sentaurus Workbench

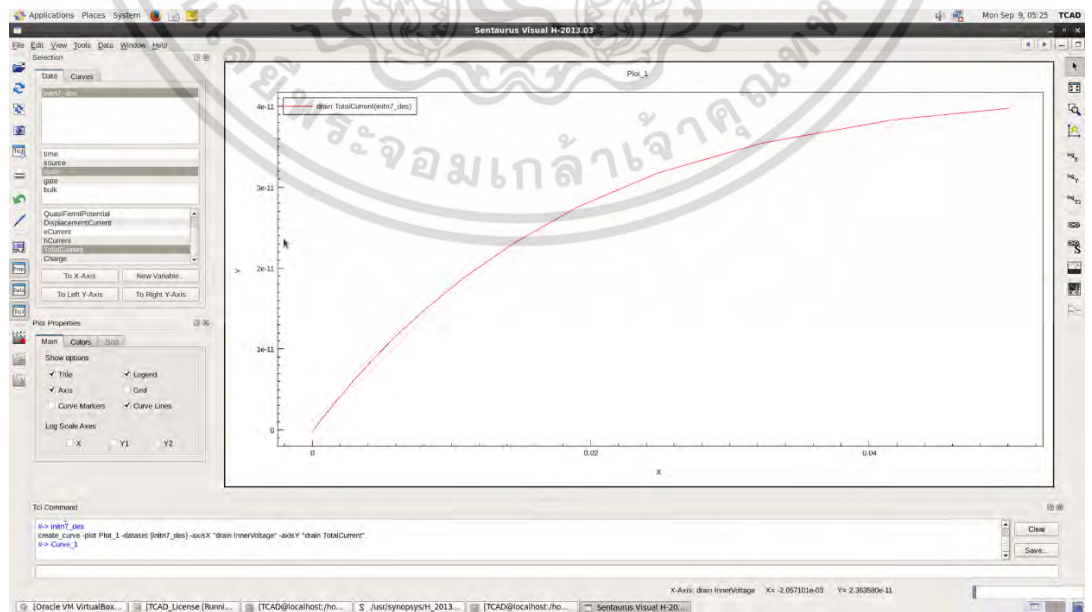
Sentaurus Workbench เป็น graphical environment ของ Sentaurus TCAD ซึ่งใช้สำหรับสร้าง จัดการ และทำการจำลองแบบ ส่วนนี้จะเป็นตัวจัดการเครื่องมือและการจำลองแบบของ Sentaurus TCAD ช่วยให้ผู้ใช้สะดวกในการสร้างการทดลอง ลำดับการจำลองแบบ ดูผลการจำลอง รวมถึงการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละเครื่องมือเพื่อความสะดวกต่อการทดลอง หน้าต่างโปรแกรมจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 เราสามารถเลือกใช้เครื่องมือต่าง ๆ ของ Sentaurus TCAD ผ่านส่วนของ Tool Flow และตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ผ่าน Project Parameters (ตัวแปรที่จะใช้ได้ในส่วนนี้ต้องผ่านการกำหนดให้เป็นตัวแปรอิสระที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ก่อนซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป) ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรไปตามการทดลองที่ต้องการในส่วน Simulation Tree เมื่อกำหนดเครื่องมือและตั้งค่าการทดลองเสร็จแล้ว Sentaurus Workbench จะถูกใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสั่ง Run การจำลองแบบ เมื่อการจำลองแบบเสร็จสิ้นจะแสดงสถานะตามสีที่ระบุอยู่บริเวณขอบล่างด้านขวาของหน้าต่าง



รูปที่ 3.2 Sentaurus Workbench บริเวณ Tool Flow ใช้สำหรับกำหนดเครื่องมือและลำดับการใช้เครื่องมือโดยเริ่มจากเครื่องมือทางซ้ายก่อน จากนั้นจะนำไฟล์เอาต์พุตจากเครื่องมือนั้นมาประมวลผลต่อ, Project Parameters ใช้สำหรับกำหนดพารามิเตอร์ที่เราสนใจเพื่อความง่ายต่อการปรับเปลี่ยน และ Simulation Tree เป็นส่วนสำหรับควบคุมการจำลองแบบและตรวจสอบผลการจำลองแบบที่ได้ โดยสีในแต่ละช่อง (node) จะบ่งบอกถึงสถานะของการจำลองแบบ

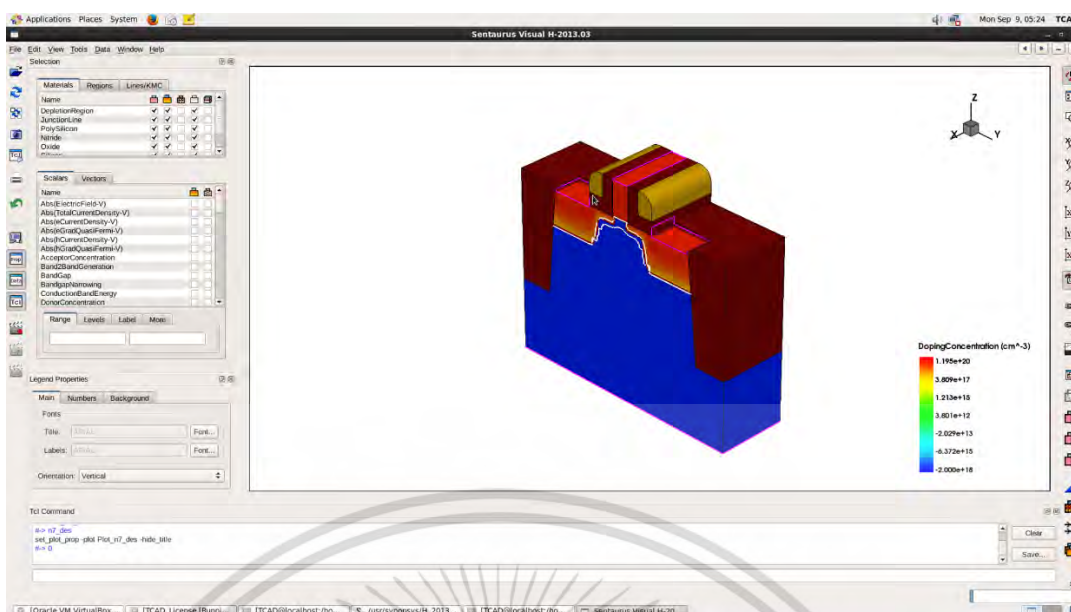
### 3.1.2 Sentaurus Visual

หลังจากการจำลองแบบเสร็จสิ้นลงเราสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบของแต่ละเครื่องมือ โดยใช้ Sentaurus visual ซึ่งสามารถแสดงผลในรูปแบบของกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้ากระแสและแรงดันที่ขั้วไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ (ไฟล์เอาต์พุตจะมีนามสกุลเป็น .plt) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .plt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .tdr

นอกจากนี้ Sentaurus visual ยังสามารถใช้แสดงผลในรูปแบบกราฟของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ได้ด้วย (ไฟล์เอาต์พุตนามสกุล .tdr) (รูปที่ 3.4) เช่น สนามไฟฟ้า (Electric field) ความหนาแน่นกระแสทั้งหมด (Total current density) ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Potential) รูปแบบการเจือ (Doping profile) เป็นต้น

### 3.1.3 Sentaurus Structure Editor

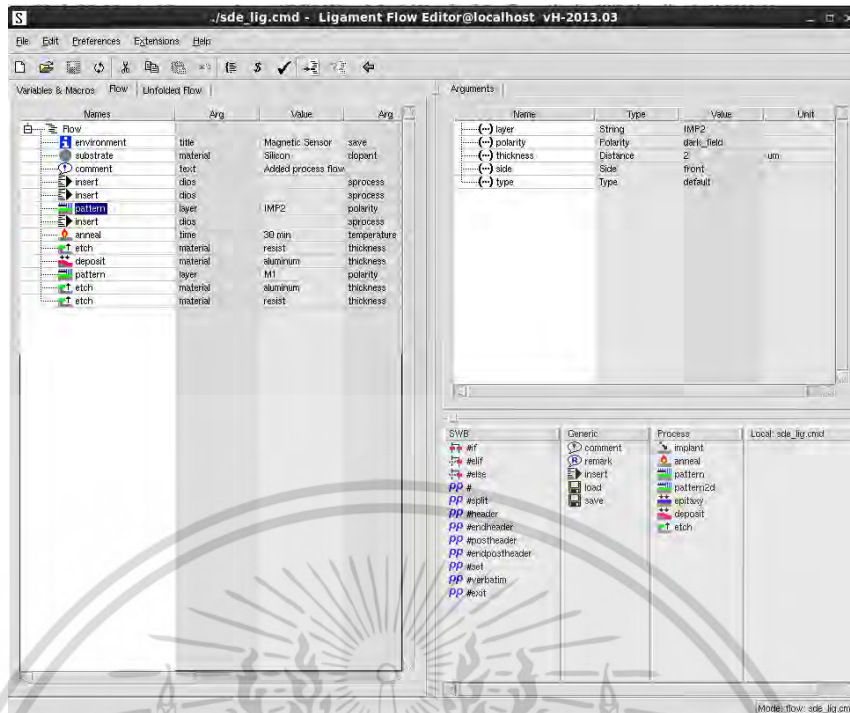
เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างตัวอุปกรณ์โดยอาศัยเครื่องมือทางเรขาคณิตในการขึ้นรูปโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ สำหรับการใช้งานเครื่องมือนี้ เราสามารถใช้งานเครื่องมือผ่าน graphical user interface (รูปที่ 3.7) เพื่อสร้างโครงสร้างขึ้นมา หรืออาจขึ้นรูปโครงสร้างโดยใช้คำสั่ง (command line) ผ่านเครื่องมือได้โดยตรง ในการออกแบบโครงสร้างด้วย Sentaurus Structure Editor เราจะเริ่มจากการขึ้นรูปโครงสร้างด้วยเครื่องมือหรือคำสั่ง แต่สำหรับการทดลองนี้เราจะใช้ Ligament ซึ่งเป็นเครื่องมืออีกตัวที่สามารถใช้สำหรับการขึ้นรูปโครงสร้างผ่านการจำลองกระบวนการสร้างเสมือนจริง (process emulation)

#### 3.1.3.1 Ligament

เป็นเครื่องมือย่อยที่อยู่ใน Sentaurus Structure Editor สำหรับการสร้างตัวอุปกรณ์ผ่านกระบวนการสร้างที่ถูกเลียนแบบมา โดย Ligament จะประกอบไปด้วย

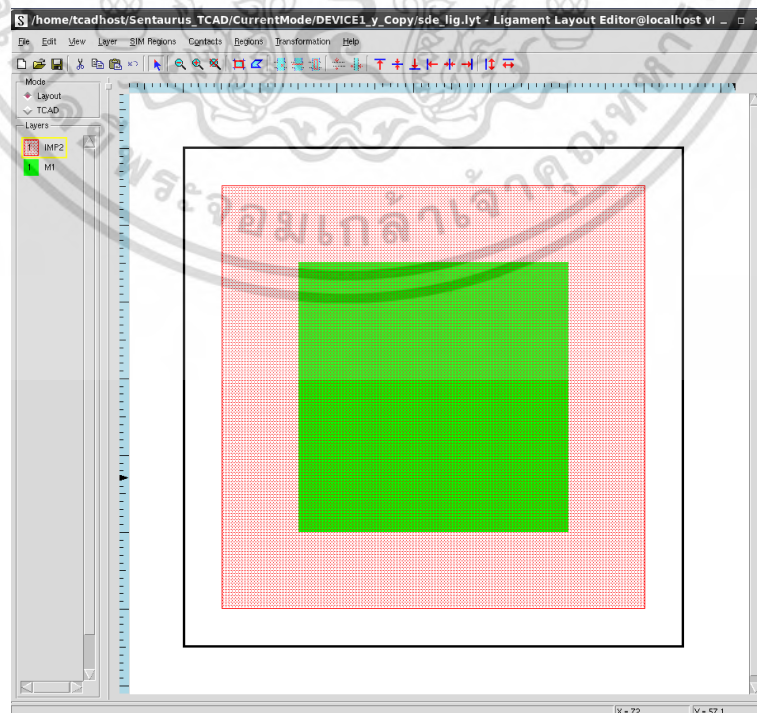
- Ligament Flow Editor เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ใช้ลำดับกระบวนการสร้างจำลอง (process emulation) เช่น การยิงฝังประจุ (ion implantation) การปลูกผลึก (epitaxy, deposition) การกัด (etching) เป็นต้น นอกจากนี้เรายังสามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ได้อีกด้วย เช่น พลังงานในการยิงฝังประจุ ความหนาของชั้นผลึกที่ปลูก ความลึกในการกัดและประเภทของการกัด เป็นต้น (รูปที่ 3.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



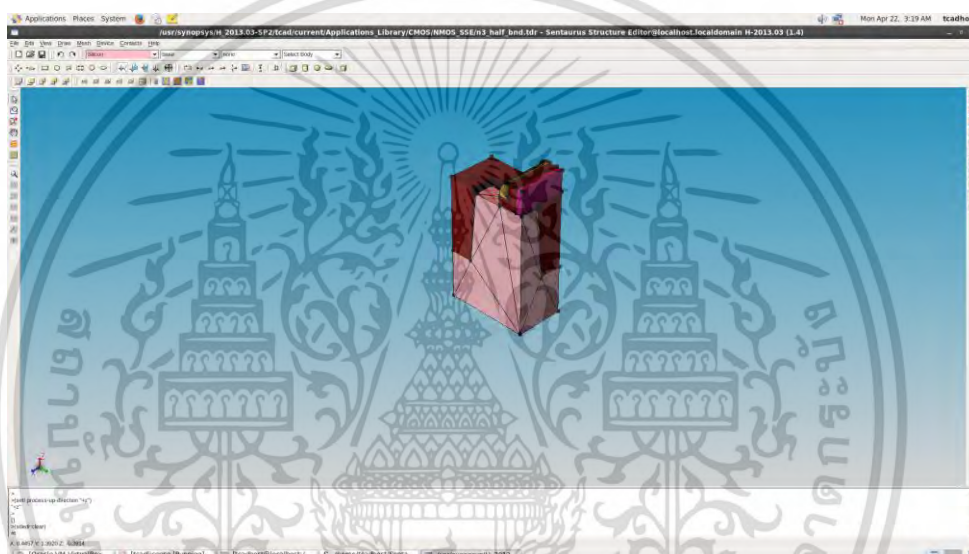
รูปที่ 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

- Ligament Layout Editor เป็นเครื่องมือสำหรับออกแบบลวดลายที่จะถูกสร้างลงบนฐานรอง (รูปที่ 3.6) เสมือนกับการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการ photolithography (โดยในส่วนของ pattern ของ Ligament Flow Editor ต้องอาศัยการสร้าง pattern จาก Ligament Layout Editor เพื่อเป็นตัวกำหนดรูปแบบในการสร้างลวดลายการกัดหรือบริเวณที่จะเจือสาร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์รูปที่ 3.6 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor ที่มีลิขสิทธิ์ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากขึ้นรูปโครงสร้างด้วย Ligament เรียบร้อยแล้ว ลำดับต่อไปคือการกำหนด mesh หรือ grid สำหรับกระบวนการ finite element การกำหนด mesh สามารถทำได้ผ่านทาง graphical user interface หรือเขียนเป็นคำสั่ง (command line) เราสามารถกำหนดจำนวนความละเอียด ขนาด และรูปทรงของ mesh ได้ โดยต้องคำนึงว่า mesh ยังมีจำนวนความละเอียดเยอะยิ่งส่งผลดีต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์แต่ก็ต้องการแลกมากับระยะเวลาในการคำนวณที่มากขึ้น สำหรับการกำหนดขนาดของ mesh ในแต่ละแนวแกนอ้างอิงควรกำหนดให้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งในสี่ของความด้านนั้น ๆ นอกจากนี้ mesh จะยังส่งผลต่อการแสดงความละเอียดของ doping profile ของตัวอุปกรณ์ด้วย เมื่อกำหนด mesh เสร็จสิ้นแล้วขั้นตอนต่อไปเราต้องกำหนดขั้วไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อที่จะใช้สำหรับการไบอัสกระแสและแรงดัน โดยขั้วไฟฟ้าที่กำหนดจะต้องประกาศชื่อและตำแหน่งเพื่อที่จะนำไปใช้ในเครื่องมือ Sentaurus Device อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3.7 Sentaurus Structure Editor

### 3.1.4 Sentaurus Device

เมื่อได้โครงสร้างที่ถูกกำหนด mesh และ ขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำโครงสร้างนั้นไปจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าโดยใช้ Sentaurus Device ซึ่งจะใช้ในรูปของคำสั่ง (command) เท่านั้น Sentaurus Device สามารถจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น ความร้อน แสง แม่เหล็ก เป็นต้น การจำลองพฤติกรรมดังกล่าวต้องอาศัยโมเดลทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมด้วย ดังนั้นในการจำลองแบบอุปกรณ์ต้องคำนึงถึงโมเดลทางฟิสิกส์ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์นั้นๆ ด้วยเสมอ สำหรับชุดคำสั่งของ Sentaurus Device ประกอบไปด้วย

- *File* เป็นส่วนที่ระบุไฟล์อินพุตและเอาต์พุต สำหรับ Sentaurus Device

File {

\* Input Files

Grid = "nmos\_msh.tdr"

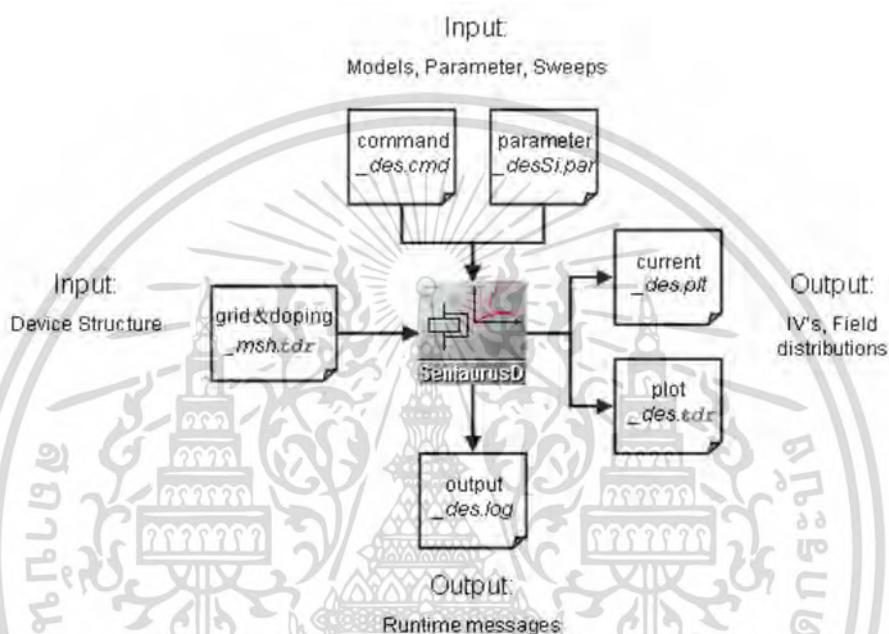
\* Output Files

Current = "n1\_des.plt"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Plot = "n1_des.tdr"
}
```

ในส่วนของ Input file จะเป็นไฟล์ `_msh.tdr` ซึ่งได้จาก Sentaurus Structure Editor ไฟล์นี้เป็นไฟล์โครงสร้างที่ถูกกำหนด mesh เรียบร้อยแล้ว ส่วน Output file ของ Sentaurus Device จะประกอบไปด้วยไฟล์ `_des.plt` ซึ่งเป็นไฟล์สำหรับใช้ตรวจสอบกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ และไฟล์ `_des.tdr` ซึ่งเป็นไฟล์ที่ใช้แสดง contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 ผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตของ Sentaurus Device หลังจากออกแบบโครงสร้างด้วย Sentaurus Structure Editor เสร็จเรียบร้อยแล้วไฟล์ `_msh.tdr` จะถูกนำไปใช้เป็นไฟล์อินพุตสำหรับ Sentaurus Device เพื่อทำการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้า โดยมีไฟล์ `_des.cmd` เป็นไฟล์คำสั่งในการทำการจำลองพร้อมด้วยไฟล์ `_des.par` ที่เป็นไฟล์ตัวแปรต่างๆ ของโมเดลทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการจำลอง สถานะในการจำลองแบบและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกแสดงออกมาใน log file (`_des.log`)

- *Electrode* เป็นส่วนที่ไขก หนดขั้วไฟฟ้าเพื่อท ำการ ำลองแบบอุปกรณ์ ในส่วนนี้เราสามารถ ำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่แต่ละขั้ว ค่าความต้านทานที่ขั้วไฟฟ้ำ รวมถึงค่าความสูงของ ก ำแพศย์ที่รอยต่อ (barrier)

```
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}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการกำหนดขั้วไฟฟ้า เราต้องประกาศชื่อให้สอดคล้องกับตอนที่กำหนดขั้วไฟฟ้าใน Sentaurus Structure Editor ด้วย

- *Physics* เป็นส่วนที่ใช้กำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่จะถูกนำมาใช้ในการจำลองแบบอุปกรณ์ เช่น โมเดลสภาพคล่องของพาหะ โมเดลการพังทลายแบบอะวาลานซ์ โมเดลการเกิดและการผสมกลับของพาหะ โมเดลกักตักพาหะ เป็นต้น

```
Physics {
  Mobility ( DopingDep HighFieldSat )
  Avalanche (Okuto)
  EffectiveIntrinsicDensity (Slotboom)
  Recombination (surfaceSRH)
}
```

การจำลองแบบอุปกรณ์ ซึ่งเป็นที่จะต้องเลือกให้โมเดลทางฟิสิกส์ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์แต่ละชนิดหากขาดโมเดลบางอย่างผลที่ได้อาจไม่แสดงพฤติกรรมบางอย่างออกมา ยกตัวอย่างเช่น การจำลองไดโอดแบบรอยต่อ p-n หากไม่ใส่โมเดลการพังทลายแบบอะวาลานซ์เข้าไป ในกรณีที่ไดโอดถูกไบแอสแบบกลับด้านอยู่ เราจะไม่พบการพังทลายแบบอะวาลานซ์ในกราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้ หลังจากการจำลองแบบ วงเล็บข้างหลังโมเดลทางฟิสิกส์เป็นตัวบ่งบอกว่าเราใช้โมเดลรูปแบบไหน เช่น ส่วนสภาพคล่องของพาหะเราใช้โมเดลสภาพคล่องแบบที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ (DopingDependence) และมีการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (HighFieldSaturation) เป็นต้น

- *Plot* เป็นส่วนที่กำหนดการแสดงผล contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ หลังจากการจำลองแบบเสร็จสิ้นเราสามารถเปิดการแสดงผล contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ผ่าน Sentaurus visual ดังที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้

```
Plot {
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent
  Potential SpaceCharge ElectricField
  eMobility hMobility eVelocity hVelocity
  Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
}
```

ส่วน Plot เราสามารถกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่ต้องการจะตรวจสอบหลังจากการจำลองแบบเสร็จสิ้นลง เช่น ความหนาแน่นของพาหะแต่ละชนิด สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความเร็วของพาหะ จำนวนสารเจือผู้ให้และผู้รับ เป็นต้น

- *Math* เป็นส่วนที่กำหนดตัวแปรของการคำนวณทางคณิตศาสตร์
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Math {
  Extrapolate
  RelErrControl
  NotDamped=50
  Iterations=20
}

```

Sentaurus Device จะหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในแต่ละ mesh ด้วยการวนซ้ำ สำหรับการวนซ้ำแต่ละครั้งจะมีการคำนวณข้อผิดพลาด (error) และ Sentaurus Device จะพยายามมุ่งไปที่ผลเฉลยที่มีข้อผิดพลาดที่ยอมรับได้ ในส่วนนี้เราสามารถกำหนดชนิดของตัวแก้ปัญหา (solver type) กำหนดเกณฑ์ข้อผิดพลาด (error criteria) และตัวเลือกอื่นๆ ได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น Extrapolate เป็นการคาดเดาขั้นตอนเริ่มต้นจากการอนุมานผลเฉลยของสองขั้นตอนก่อนหน้า (ถ้าหากมี) RelErrControl เป็นการสลับการควบคุมข้อผิดพลาดระหว่างการวนซ้ำจากการใช้ internal error parameter ไปยัง physically meaningful parameter (ErrRef) เป็นต้น

- Solve เป็นส่วนที่กำหนดลำดับของผลเฉลยที่ได้รับจากตัวแก้ปัญหาและกำหนดสมการที่ใช้ในการแก้ปัญหา

```

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

```

Poisson เป็นส่วนที่ระบุว่าผลเฉลยเริ่มต้น (initial solution) เป็นของสมการปัวซองที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว Coupled {Poisson Electron} เป็นส่วนแนะนำสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ของอิเล็กตรอนในขณะที่มีเงื่อนไขการไบอัสเริ่มต้น ซึ่งกรณีนี้จะถูกแก้ปัญหามาควบคู่กับสมการปัวซองโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน (Newton Method) คำสั่ง Quasistationary เป็นการระบุว่าเราจะได้รับผลเฉลยที่อยู่ในสภาวะสมดุลคงตัว (steady state 'equilibrium') ส่วน Goal เป็นส่วนกำหนดเป้าหมายการไบอัสที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าจะถูกไบอัสเพิ่มขึ้นจนไปถึงค่าที่ถูกตั้งไว้โดยใช้สมการความต่อเนื่องและสมการปัวซองในการหาผลเฉลย

### 3.2 การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วด้วย TCAD

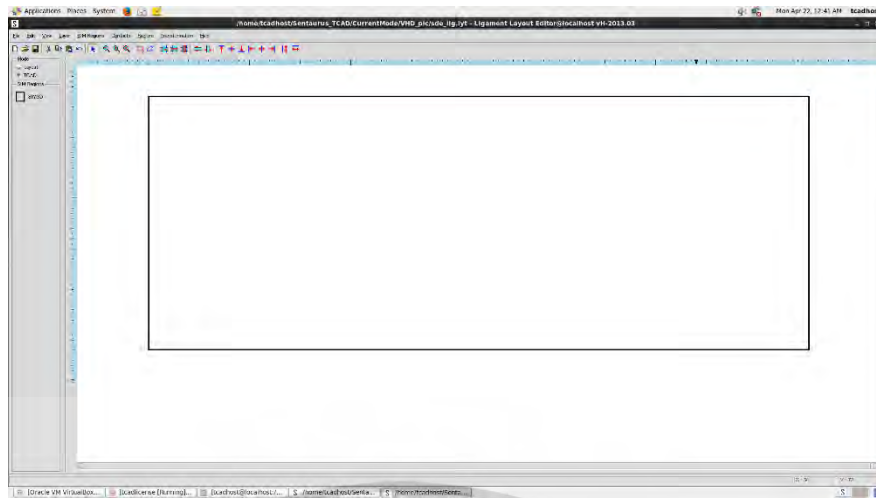
สำหรับการจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ตัวโครงสร้างของอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยขั้ว 5 ขั้วที่สร้างอยู่บนฐานรอง โดยมี 3 ขั้วเป็นขั้วสำหรับให้กระแสไหลเข้าหรือออก เราจะเรียกว่า “ขั้วกระแส” (current contact) ส่วนอีกสองขั้วที่เหลือเรียกว่า “ขั้วรับรู้” (sense contact) จะไว้ใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ในการจำลองแบบเราจะไบอัสกระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เพื่อหลีกเลี่ยงผลจากปรากฏการณ์แมกนีตรีซีสแดนซ์ ที่ทำให้กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ลดลงเมื่อไอส์ด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ เพื่อศึกษาผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวอุปกรณ์ เราจะทำการป้อนสนามแม่เหล็กให้มีทิศที่ขนานกับพื้นผิวของอุปกรณ์และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส จากนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เพื่อดูผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ว่า มากน้อยแค่ไหน สิ่งที่เราจะตรวจสอบในรูปแบบเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีอยู่สองลักษณะ อย่างแรกก็คือแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ส่วนเอาต์พุตอีกรูปแบบก็คือความต่างของกระแสที่ขั้วกระแสสองขั้วซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส ซึ่งเอาต์พุตรูปแบบหลังนั้นนอกจากจะวัดในรูปแบบความแตกต่างของกระแสได้แล้ว ยังสามารถวัดในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าได้ ด้วยการนำตัวต้านทานเข้าไปต่อที่ขั้วกระแสสองฝั่งแล้วอาศัยการวัดผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานทั้งสอง

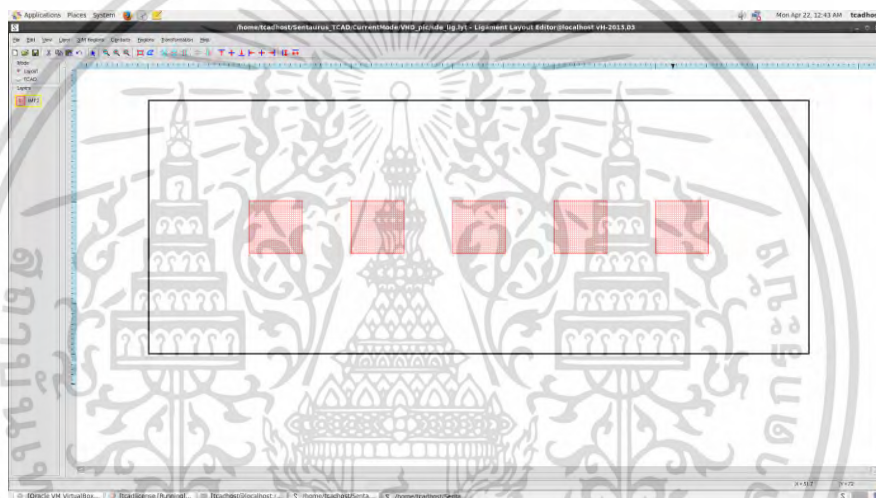
การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD เราจะแบ่งการดำเนินการเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการขึ้นโครงสร้างและกำหนด mesh ให้กับตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือ Sentaurus Structure Editor ส่วนต่อมาหลังจากขึ้นโครงสร้างเสร็จ เราจะทำการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือ Sentaurus Device ซึ่งขั้นตอนการจำลองแบบสามารถอธิบายได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

### 3.2.1 การออกแบบ layout ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว

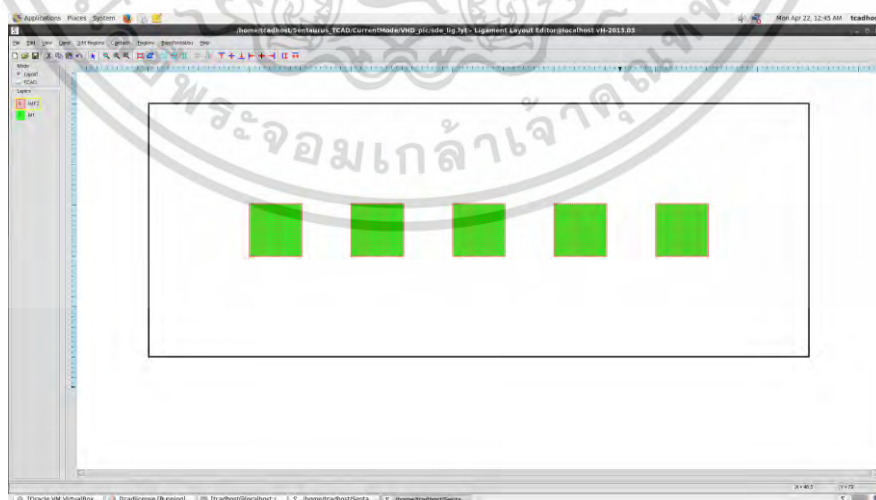
ในการออกแบบ layout ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการออกแบบ layout ให้ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วน layout จะสร้างโดยใช้ Ligament Layout Editor ที่อยู่ในเครื่องมือ Sentaurus Structure Editor การออกแบบ layout เป็นการจำลองการสร้างลวดลายบนกระจกต้นแบบ (Mask) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) หลังจากเข้าสู่ Ligament Layout Editor แล้ว อันดับแรกเราจะกำหนดบริเวณที่จะจำลองแบบเป็น 3 มิติ (รูปที่ 3.9(a)) บริเวณนี้จะใช้กำหนดขนาดของตัวอุปกรณ์ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่แทนฐานรองของตัวอุปกรณ์ โดยเราออกแบบให้มีความยาวเท่ากับ 75 ไมโครเมตรและกว้าง 45 ไมโครเมตรและกำหนดชื่อเป็น SIM3D ขั้นตอนต่อมา เราจะทำการออกแบบ layout ของบริเวณที่จะสร้างขั้วทั้ง 5 โดยการออกแบบเราจะกำหนดบริเวณเจือสารเพื่อทำให้อรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก เป็น layer ที่มีชื่อว่า IMP2 ซึ่งมีขนาดกว้างและยาวเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (รูปที่ 3.9(b)) และขั้วทั้งหมดจะวางห่างกัน 5 ไมโครเมตร ส่วนระยะจากขั้วริมสุดทั้งสองฝั่งจนถึงขอบด้านข้างของอุปกรณ์จะมีระยะห่าง 15 ไมโครเมตร ในขณะที่ระยะห่างระหว่างขั้วกับขอบบนและขอบล่างของตัวอุปกรณ์จะถูก กำหนดเป็น 20 ไมโครเมตร จากนั้นเราจะกหนด layer ขึ้นมาอีกหนึ่งอัน ชื่อ M1 เพื่อเป็น layer สำหรับสร้างชั้นโลหะในการทำเป็นขั้วไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ โดยจะออกแบบให้มีขนาดเท่ากับขนาดของบริเวณที่ถูกเจือสารและสร้างลงบนตาแหน่งเดียวกัน (รูปที่ 3.9(c)) หลังจากกำหนด layer และวาดโครงสร้างของแต่ละ layer ลงบน layout ก็เป็นอันเสร็จขั้นตอนการออกแบบ layout สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว (layout ที่ได้จากการออกแบบจะถูกรัน ไปใช้ในส่วน pattern ของ Ligament Flow Editor ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป)



(a)



(b)



(c)

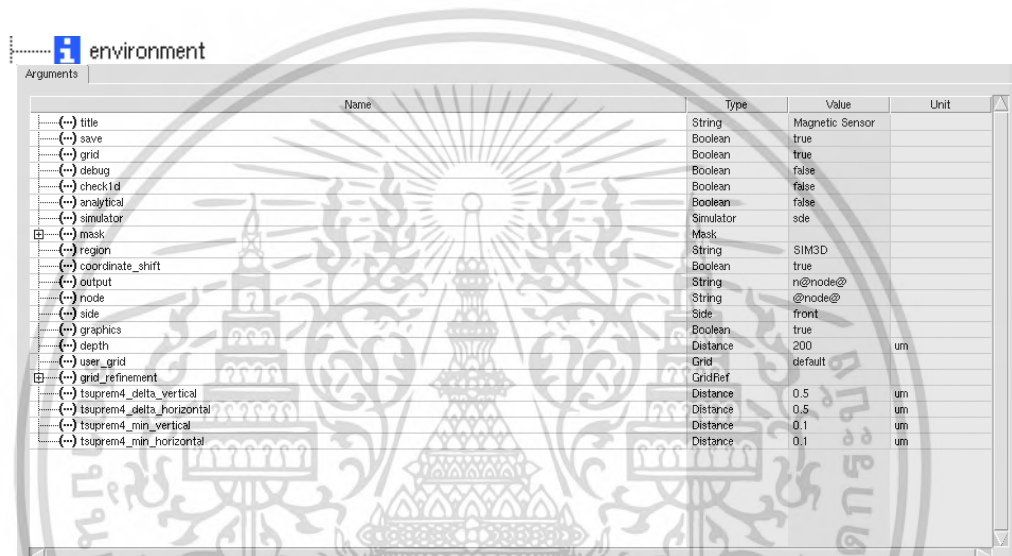
รูปที่ 3.9 layout ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ถูกสร้างด้วย Ligament Layout Editor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การกำหนดลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น

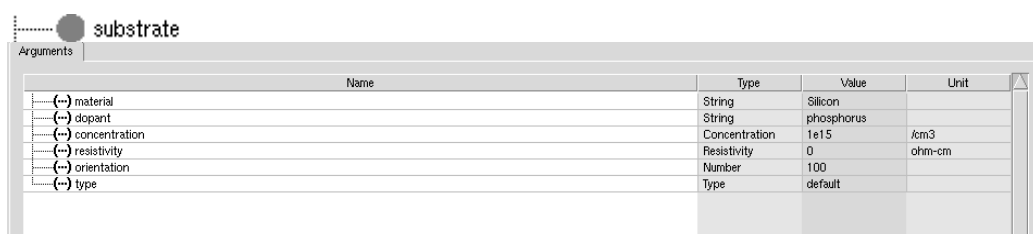
เมื่อทำการออกแบบ layout เสร็จเรียบร้อยแล้วต่อมาเราจะต้องกำหนดขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์โดยใช้ Ligament Flow Editor ซึ่งในส่วนนี้เราสามารถเลือกใช้กระบวนการต่างๆ มากำหนด process flow เพื่อสร้างอุปกรณ์ขึ้นมา โดยลำดับกระบวนการที่ใช้สร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งใน Ligament Flow จะมีรายละเอียดคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

- *Environment* เป็นส่วนที่กำหนดชื่อของอุปกรณ์, กำหนดบริเวณจำลองแบบ 3 มิติซึ่งต้องตรงกับชื่อที่กำหนดใน Ligament Layout (SIM3D), กำหนดเครื่องมือที่จะใช้จำลองแบบ (เรากำหนดให้จำลองผ่าน Sentaurus Structure Editor (SDE)), และยังสามารถกำหนดความหนาของแผ่นฐานรองได้อีกด้วย (กำหนดให้หนา 200 ไมโครเมตร) (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 ส่วน Environment สำหรับกำหนดต้นแปรและเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโครงสร้าง

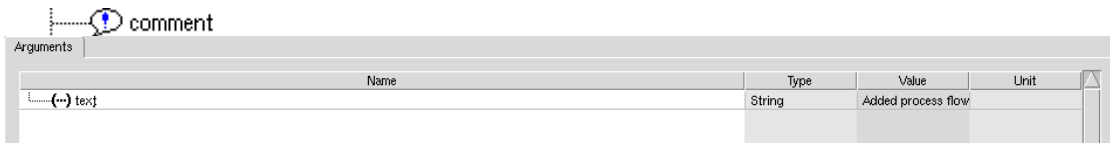
- *Substrate* เป็นส่วนที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองอย่างเช่น ชนิดของวัสดุ (material), สารเจือ (dopant), ความเข้มข้น (concentration), สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) และระนาบผลึก (orientation) ซึ่งเราใช้วัสดุฐานรองเป็นซิลิคอน (silicon) ที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส (phosphorus) เพื่อทำเป็นฐานของชนิด n โดยฐานรองจะถูกกำหนดให้มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{15}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ค่าจะเปลี่ยนแปลงตามการทดลอง) ด้วยระนาบผลึก (100) (เนื่องจากเรากำหนดฐานรองในรูปแบบความเข้มข้น เพราะฉะนั้นส่วนของสภาพต้านทานไฟฟ้าจึงไม่จำเป็นต้องกำหนดเพราะตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอยู่แล้ว) (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 ส่วน Substrate ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง

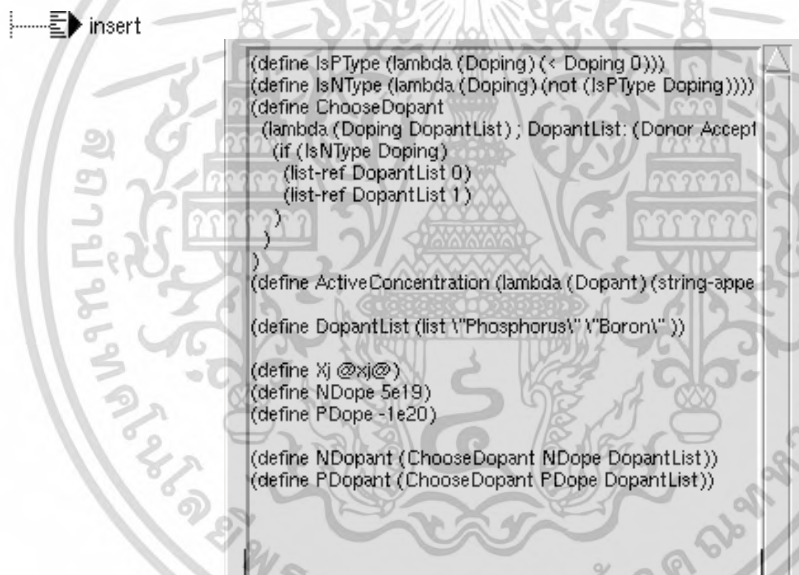
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนในหลักสูตรนี้ ผู้ใช้เอกสารนี้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Comment* เป็นส่วนที่ใช้ระบุข้อความต่าง ๆ ซึ่งจะพิมพ์ลงไปหรือไม่พิมพ์ลงไปก็ได้ (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 ส่วน Comment ที่ใช้ระบุข้อความ

- *Insert* ส่วนแรกเป็นส่วนที่ใช้เขียนคำสั่งสำหรับระบุความเข้มข้นของสารเจือและความลึกของรอยต่อ ซึ่งเรากำหนดให้ความเข้มข้นสารเจือฟอสฟอรัสที่จะถูกเจือมีค่าเท่ากับ  $5 \times 10^{19}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อที่จะสร้างเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูง ( $N^+$ ) ส่วนความลึกของรอยต่อ เราจะประกาศเป็นตัวแปร  $x_j$  ใน Sentaurus Workbench ซึ่งกำหนดให้มีค่าความลึก 1 ไมโครเมตร (รูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุชนิด, วัสดุ, ความเข้มข้นของสารเจือ, และความลึกรอยต่อ

- *Insert* ส่วนต่อมาเป็นส่วนที่ใช้เขียนคำสั่งระบุรูปแบบการเจือ (doping profile) โดยเราเลือกรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian profile) ซึ่งเป็นการกระจายตัวในลักษณะการแพร่ที่สมมาตร และมีการระบุประเภทของการเจือเป็นการเจือสารชนิด  $n$  โดยใช้ชื่อการเจือเป็น "DP.IMP2" (ActiveConcentration NDopant) มีค่าความเข้มข้นสูงสุดเป็น  $5 \times 10^{19}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (PeakVal) (เอามาจากส่วนที่ประกาศใน Insert ส่วนแรก) ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงสุด (PeakPos) ถูกกำหนดเป็น 0 นั่นคือความเข้มข้นสูงสุดที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองในบริเวณที่ถูกเจือ ค่าความเข้มข้นที่ค่าความลึกรอยต่อ (ValueAtDepth) จะถูกกำหนดให้เท่ากับค่าความเข้มข้นของฐานรอง ซึ่งความลึกของรอยต่อจะกำหนดตามตัวแปรที่ประกาศไปในส่วนของ Insert ก่อนหน้า ( $x_j$ ) และส่วนสุดท้ายเรากำหนดให้แฟกเตอร์การกระจายแบบเกาส์เซียนเป็น 0.8 (รูปที่ 3.14)

 insert

```
(sdcdr:define-gaussian-profile
  \DP.IMP2\ (ActiveConcentration NDopant)
  \PeakPos\ 0
  \PeakVal\ (abs NDope)
  \ValueAtDepth\ 1e15
  \Depth\ Xj
  \Erf\ \Factor\ 0.8)

(sdcdr:define-gaussian-profile
  \DP.IMP1\ (ActiveConcentration PDopant)
  \PeakPos\ 0
  \PeakVal\ (abs PDope)
  \ValueAtDepth\ 1e15
  \Depth\ Xj
  \Erf\ \Factor\ 0.8)
```

รูปที่ 3.14 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุรูปแบบการเจือสาร

- *Pattern* เป็นส่วนการกำหนดสลายของหน้ากากในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยอ้างอิงสลายจาก layout ที่ได้ออกแบบไว้ใน Ligament Layout Editor ตอนต้น โดยจะเริ่มจาก layout ที่เป็น layer ของ IMP2 ซึ่งเป็นบริเวณที่จะทำการเจือสารลงไป ในส่วนนี้สามารถกำหนดประเภทของหน้ากากหรือ layout (ตรงส่วน polarity)ว่าจะให้เป็นแบบ light field หรือ dark field ในการสร้างสลายตาม layout ที่เรากำหนดมาจะมีการสร้างชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวก จากนั้นฉายแสงและกัดชั้น ไขว่แสงออกจนเกิดเป็นสลาย (หลังจบบันทึกตอนนี้ จะเกิดสลายขึ้นบนชั้นน้ำยาไวแสง) นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความหนา (thickness) ของชั้นน้ำยาไวแสงและด้าน (side) ที่จะทำการสร้างสลายได้ด้วย (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 ส่วน Pattern สำหรับกำหนดบริเวณที่จะถูกเจือสาร

- Insert เป็นการเขียนคำสั่งให้ยิงฝังประจุพาหะด้วยสารเจือชนิด n ความเข้มข้น  $5 \times 10^{19}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปยังแผ่นฐานรองที่ถูกสร้างสลายตามขั้นตอนก่อนหน้า (อ้างอิงตามการประกาศชื่อการเจือ DP.IMP2) ดังนั้นบริเวณที่มีชั้นไขว่แสงปกคลุมอยู่จะท ัว เป็นชั้นป้องกันการเจือสารให้กับฐานรอง ส่วนบริเวณที่ชั้นไขว่แสงถูกกัดออกก็จะถูกเจือตามที่เรากำหนด (รูปที่ 3.16)

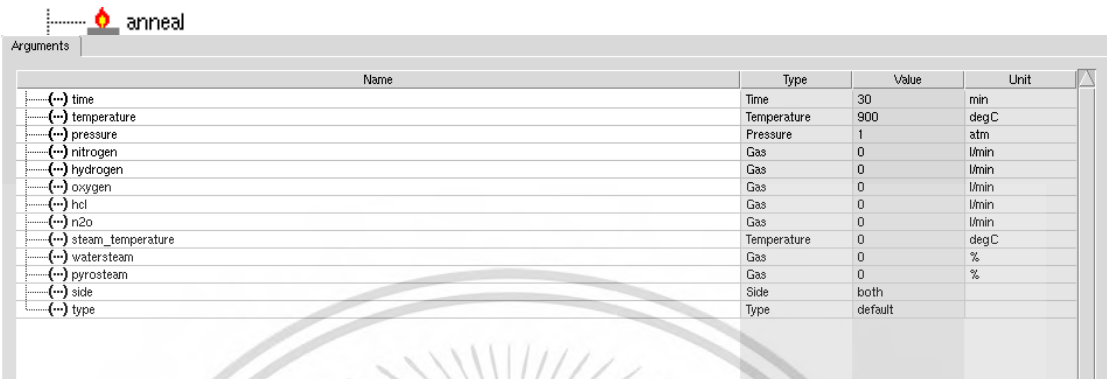
 insert

```
(sdcdr:implant \DP.IMP2\ )
```

รูปที่ 3.16 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุการยิงฝังประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Anneal* เป็นการอบแผ่นด้วยความร้อน โดยเราตั้งให้มีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 900°C นาน 30 นาที ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm เพื่อให้โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายหลังการยิงฝังประจุเกิดการจับตัวขึ้นมาใหม่ (รูปที่ 3.17)



Name	Type	Value	Unit
(-->) time	Time	30	min
(-->) temperature	Temperature	900	degC
(-->) pressure	Pressure	1	atm
(-->) nitrogen	Gas	0	l/min
(-->) hydrogen	Gas	0	l/min
(-->) oxygen	Gas	0	l/min
(-->) hcl	Gas	0	l/min
(-->) n2o	Gas	0	l/min
(-->) steam_temperature	Temperature	0	degC
(-->) watersteam	Gas	0	%
(-->) pyrosteam	Gas	0	%
(-->) side	Side	both	
(-->) type	Type	default	

รูปที่ 3.17 ส่วน Anneal สำหรับกระบวนการแอนนิลหลังยิงฝังประจุ

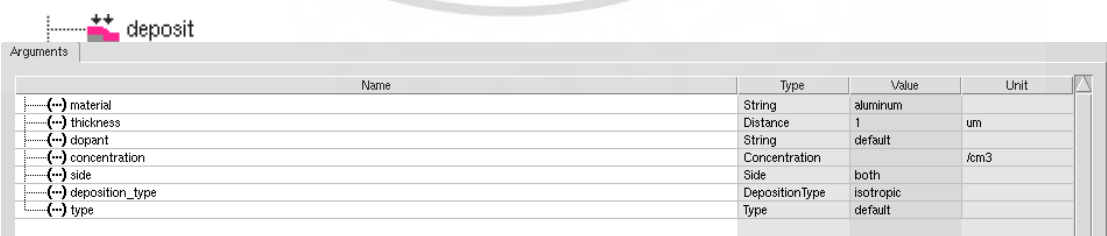
- *Etch* เป็นการกัดชั้นนำยาไวแสง (Resist) ที่อยู่บนผิวฐานรองทั้งหมดออก (strip) เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวรอกระบวนการขั้นตอนต่อไป (รูปที่ 3.18)



Name	Type	Value	Unit
(-->) material	String	resist	
(-->) thickness	Distance	default	
(-->) etch_type	EtchType	strip	
(-->) overetch	Number	0	
(-->) etchstop	String	default	
(-->) side	Side	both	
(-->) type	Type	default	

รูปที่ 3.18 ส่วน Etch สำหรับกำหนดการกัดชั้นนำยาไวแสงก่อนสร้างชั้นโลหะ

- *Deposit* เป็นการสร้างชั้นโลหะโดยกระบวนการ deposition ซึ่งเราจะสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมหนา 1 ไมโครเมตร เพื่อสร้างการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ (รูปที่ 3.19)

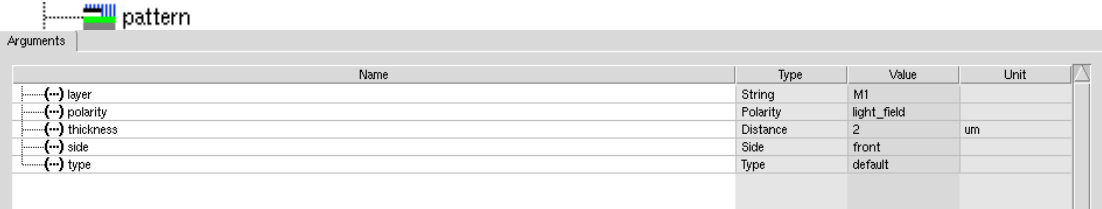


Name	Type	Value	Unit
(-->) material	String	aluminum	
(-->) thickness	Distance	1	um
(-->) dopant	String	default	
(-->) concentration	Concentration		/cm3
(-->) side	Side	both	
(-->) deposition_type	DepositionType	isotropic	
(-->) type	Type	default	

รูปที่ 3.19 ส่วน Deposit ที่ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Pattern* เป็นการสร้างลวดลายตาม layer ที่จะใช้สร้างชั้นโลหะ (M1) โดยใช้ polarity ประเภท light field (รูปที่ 3.20)



Name	Type	Value	Unit
(...) layer	String	M1	
(...) polarity	Polarity	light_field	
(...) thickness	Distance	2	um
(...) side	Side	front	
(...) type	Type	default	

รูปที่ 3.20 ส่วน Pattern สำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้า

- *Etch* เป็นการกัดชั้นโลหะตามลวดลาย (Pattern) ที่ประกาศไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า (รูปที่ 3.21)



Name	Type	Value	Unit
(...) material	String	aluminum	
(...) thickness	Distance	1	um
(...) etch_type	EtchType	anisotropic	
(...) overetch	Number	0	
(...) etchstop	String	default	
(...) side	Side	both	
(...) type	Type	default	

รูปที่ 3.21 ส่วน Etch ที่ใช้กัดชั้นโลหะ

- *Etch* ส่วนสุดท้ายเป็นการกัดชั้นนี้ ขาวแสงที่ผิวออกทั้งหมด (รูปที่ 3.22)

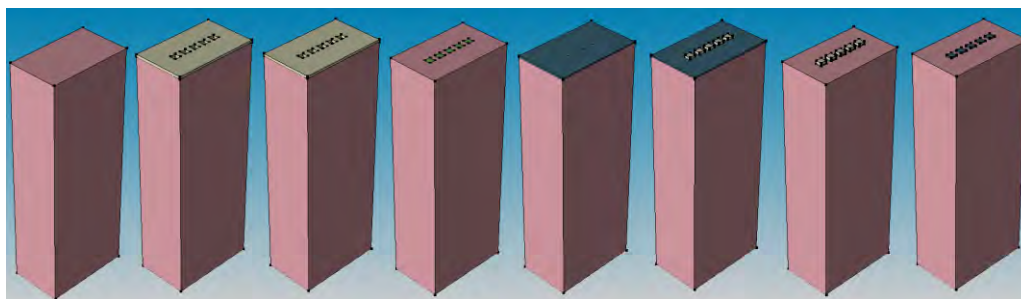


Name	Type	Value	Unit
(...) material	String	resist	
(...) thickness	Distance	default	
(...) etch_type	EtchType	strip	
(...) overetch	Number	0	
(...) etchstop	String	default	
(...) side	Side	both	
(...) type	Type	default	

รูปที่ 3.22 ส่วน Etch ชั้นสุดท้ายสำหรับกัดชั้นนี้ ขาวแสงที่ผิวออกทั้งหมด

หลังจากกำหนดขั้นตอนใน Ligament Flow Editor และดำเนินการ (Run) จนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผลที่ได้จะปรากฏโครงสร้างพร้อมกับขั้วไฟฟ้าตามที่เราได้ออกแบบไว้ (รูปที่ 3.23) โดยโครงสร้างที่ได้จะยังไม่ปรากฏ contour ของการเจือสารในบริเวณที่เราได้ทำการเจือลงไป เนื่องจากเรายังไม่ได้กำหนดส่วนของ mesh นั่นเอง ขั้นตอนถัดไปเราจะทำการสร้างโครงตาข่าย (mesh) และกำหนดหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าหรือขั้วไฟฟ้า (contact) ให้กับตัวอุปกรณ์

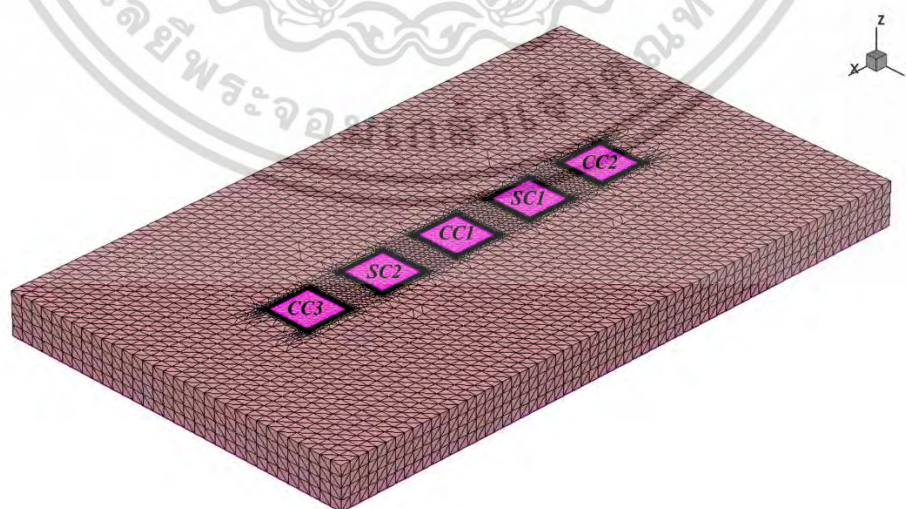
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการขึ้นรูปโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงด้วย Ligament Flow Editor

### 3.2.3 การสร้าง mesh และกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว

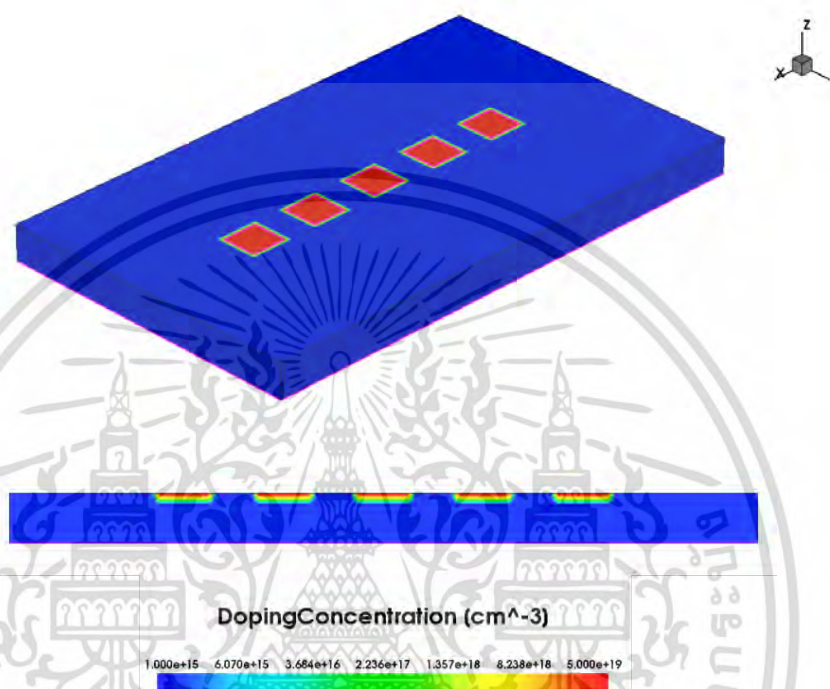
การสร้างโครงตาข่าย (mesh) สำหรับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเราจะกำหนดความละเอียดของ mesh โดยใช้ Utilities Function ที่เป็นคำสั่งที่สร้างขึ้นมาเพื่อให้การสร้าง mesh มีการเปลี่ยนแปลงความละเอียดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น และคำสั่ง Refinement Boxes ซึ่งสามารถกำหนดบริเวณความละเอียดที่ต้องการได้ เราจะกำหนดให้ความละเอียดของ mesh ต่ำสุดอยู่ที่ 0.1 ไมโครเมตร และสูงสุดอยู่ที่ 2 ไมโครเมตร (สำหรับทุกแนวแกน x, y, z) ครอบคลุมบริเวณขั้วไฟฟ้าและตัวฐานรองทั้งหมด โดยบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น (บริเวณขั้วทั้ง 5) จะถูกสร้างใหม่มีความละเอียด mesh มากที่สุดในทุกแนวแกน (กำหนดในส่วน Utilities Function) เพื่อให้ได้ความละเอียดและถูกต้องในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ หลังจากกำหนด mesh เสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปเราจะเขียนคำสั่งเพื่อระบุหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ โดยระบุชื่อและตำแหน่งเป็นพิกัดในแต่ละแนวแกนให้อยู่ในส่วน of ขั้วโลหะทั้ง 5 ที่เราสร้างขึ้นมา (ในส่วนนี้เราจะทำการลบเอาขั้วโลหะออกเพื่อลดระยะเวลาในการจำลองแบบลงเนื่องจากขั้วโลหะสำหรับรอยสัมผัสโหนดมีคสามารถกำหนดเป็นความต้านทานได้โดยตรงในส่วน of Sentaurus Device) โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจากกำหนดโครงตาข่ายและหน้าสัมผัสไฟฟ้าเสร็จแล้วจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.24



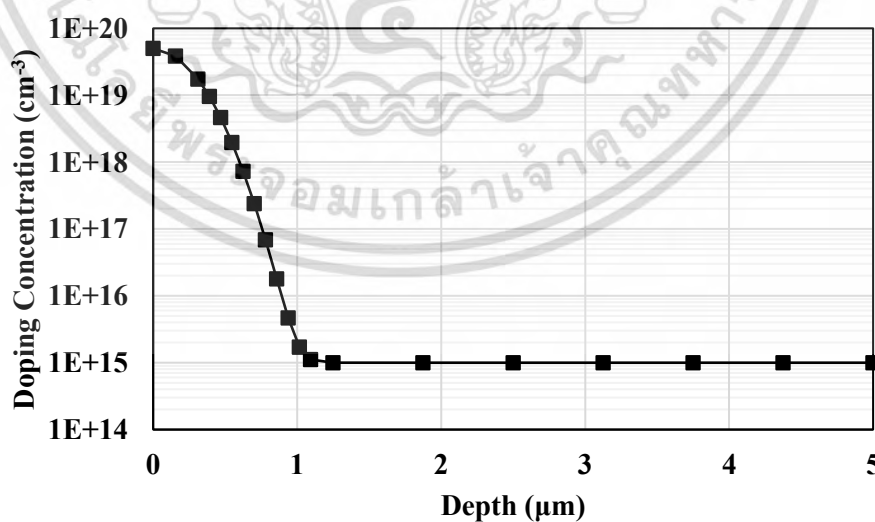
รูปที่ 3.24 โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจาก กำหนดโครงตาข่ายและหน้าสัมผัสไฟฟ้าแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ ใน Ligament Flow Editor และผ่านการกำหนด mesh และหน้าสัมผัสไฟฟ้าแล้ว จะแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่ถูกเจือสารซึ่งแสดงในรูปที่ 3.25 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเราสามารถดูรูปแบบการเจือสาร (Doping profile) ของตัวอุปกรณ์ได้ผ่านเครื่องมือใน Sentaurus Visual ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของความเข้มข้นที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้า (รูปที่ 3.26)



รูปที่ 3.25 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นและภาคตัดขวางที่แสดงบริเวณที่ถูกเจือสาร



รูปที่ 3.26 รูปแบบการเจือสาร (Doping Profile) ที่ขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 การจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์

หลังจากได้โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วย Sentaurus Device ซึ่งการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จะต้องระบุโมเดลทางฟิสิกส์ที่จะถูกนำมาใช้จำลองพฤติกรรมต่างๆ โดยโมเดลทางฟิสิกส์สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ถูกใช้คือ โมเดลโครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงาน (energy band structure and band gap) โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (mobility), โมเดลการผสมกลับของพาหะ (recombination) และโมเดลทางแม่เหล็ก (galvanomagnetic) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- *Physics { EffectiveIntrinsicDensity (Slotboom) }*

โครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงานจะถูกกำหนดอยู่ใน EffectiveIntrinsicDensity โดยเราจะเลือกใช้โมเดลของ Slotboom โมเดลทั้งหมดจะมีลักษณะเหมือนกัน แตกต่างกันที่พารามิเตอร์ ช่องว่างพลังงาน (band gap) และความหนาแน่นสถานะที่ขอบของแถบพลังงาน (band edge density-of-states) จะถูกรวมอยู่ในความหนาแน่นอินทรินซิก (intrinsic density  $n_i(T)$ ) (สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ไม่ถูกเจือ)

$$n_i(T) = \sqrt{N_C(T)N_V(T)} \exp\left(-\frac{E_g(T)}{2kT}\right) \quad (3.1)$$

ซึ่ง  $n_i(T)$  คือความหนาแน่นอินทรินซิก (Intrinsic density) (ไม่คิด bandgap narrowing)

$N_C(T)$  คือความหนาแน่นสถานะของแถบนำ (Conduction band density-of-states)

$N_V(T)$  คือความหนาแน่นสถานะของแถบวาเลนซ์ (Valence band density-of-states)

$E_g(T)$  คือช่องว่างพลังงานอินทรินซิก (Intrinsic band gap)

$k$  คือค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant)

$T$  คืออุณหภูมิ

และความหนาแน่นอินทรินซิกยังผล (effective intrinsic density) (รวม bandgap narrowing ที่ขึ้นกับการเจือ (doping-dependent bandgap narrowing)) จะระบุด้วย

$$n_{i,eff} = n_i \exp\left(\frac{E_{bgn}}{2kT}\right) \quad (3.2)$$

ซึ่ง  $n_{i,eff}$  คือความหนาแน่นอินทรินซิกยังผล (Effective intrinsic density) (คิด bandgap narrowing)

$E_{bgn}$  คือ Bandgap narrowing

เช่นเดียวกับความหนาแน่นอินทรินซิกในกรณีที่มีการเจือระดับสูงจะเกิดผลจาก bandgap narrowing ดังนั้นเราสามารถหาช่องว่างพลังงานยังผล (effective band gap) ที่เป็นการลดลงของช่องว่างพลังงานโดย bandgap narrowing ได้ตามสมการ

$$E_{g,eff}(T) = E_g(T) - E_{bgn} \quad (3.3)$$

ซึ่ง  $E_g(T)$  คือช่องว่างพลังงานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของแลตทิซ กำหนดโดย

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (3.4)$$

โดย  $E_g(0)$  คือช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ส่วน  $\alpha$  และ  $\beta$  คือค่าคงที่ (ระบุในตารางที่ 3.1) ค่าช่องว่างพลังงานสามารถหาได้จาก

$$E_g(0) = E_{g,0} + \Delta E_{g,0} \quad (3.5)$$

ซึ่ง  $E_{g,0}$  และ  $\Delta E_{g,0}$  ของโมเดล Slotboom สำหรับวัสดุซิลิคอนจะถูกระบุในตารางที่ 3.1

สำหรับ bandgap narrowing ที่ขึ้นกับการเจือใน Sentaurus Device มีรูปแบบดังนี้

$$E_{bgn} = \Delta E_g^0 + \Delta E_g^{Fermi} \quad (3.6)$$

ซึ่ง  $\Delta E_g^0$  จะถูกระบุโดยโมเดลที่เราเลือกใช้นั้นคือ Slotboom (Bandgap narrowing (Slotboom))  $\Delta E_g^{Fermi}$  เป็นการใช้สถิติของ Fermi แทนสถิติของ Maxwell-Boltzmann เพื่อลดข้อผิดพลาดในการคำนวณ bandgap narrowing

โดย bandgap narrowing สำหรับโมเดลของ Slotboom [42-43] คือ

$$\Delta E_g^0 = E_{ref} \left[ \ln \left( \frac{N_{tot}}{N_{ref}} \right) + \sqrt{\left( \ln \left( \frac{N_{tot}}{N_{ref}} \right) \right)^2 + 0.5} \right] \quad (3.7)$$

ซึ่ง  $N_{tot}$  คือความเข้มข้นการเจือทั้งหมด (Total doping concentration,  $N_{tot} = N_{A,0} + N_{D,0}$ )

$E_{ref}$  และ  $N_{ref}$  คือตัวแปรทางวัสดุ (material parameters) สำหรับซิลิคอนมีค่าแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ bandgap narrowing สำหรับวัสดุซิลิคอน

Symbol	Value for Slotboom model	Unit
$E_{ref}$	$6.92 \times 10^{-3}$	eV
$N_{ref}$	$1.3 \times 10^{17}$	$\text{cm}^{-3}$
$\alpha$	$4.73 \times 10^{-4}$	eV/K
$\beta$	636	K
$E_{g,0}$	1.1696	eV
$\delta E_{g,0}$	$-4.795 \times 10^{-3}$	eV

และค่า bandgap narrowing จากสถิติของ Fermi (ประมาณค่าที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน)

$$\Delta E_g^{Fermi} = k300K \left[ \ln \left( \frac{N_V N_C}{N_{A,0} N_{D,0}} \right) + F_{1/2}^{-1} \left( \frac{N_{A,0}}{N_V} \right) + F_{1/2}^{-1} \left( \frac{N_{D,0}}{N_C} \right) \right] \quad (3.8)$$

ซึ่ง  $N_V$  คือความหนาแน่นสถานะในแถบวาเลนซ์ (Valence band density-of-states)

$N_C$  คือความหนาแน่นสถานะในแถบนำ (Conduction band density-of-states)

$N_{A,0}$  คือความเข้มข้นของสารเจือผู้รับ (Chemically active acceptor concentration)

$N_{D,0}$  คือความเข้มข้นของสารเจือผู้ให้ (Chemically active donor concentration)

$F_{1/2}$  คือปริพันธ์ของฟังก์ชันการกระจายสำหรับสถิติเฟอร์มี (Integral of distribution function; for Fermi statistics) หรือปริพันธ์เฟอร์มีอันดับ  $1/2$  (Fermi integral of order  $1/2$ )

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

สภาพคล่องของพาหะจะระบุด้วยค่า Mobility ซึ่งเป็นการระบุสภาพคล่องของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยในค่านี้เราสามารถระบุโมเดลสภาพคล่องของพาหะได้มากกว่าหนึ่งโมเดล ถ้ามีการระบุสภาพคล่องของพาหะมากกว่าหนึ่งโมเดล สภาพคล่องของพาหะที่แตกต่างกัน ( $\mu_1, \mu_2, \dots$ ) สำหรับเนื้อสาร (bulk), สภาพคล่องของพาหะที่ผิว (Surface mobility), และชั้นบางๆ (Thin layers) จะถูกนำมารวมกันโดยใช้กฎของ Matthiessen (Matthiessen's rule)

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \dots \quad (3.9)$$

และถ้ามีการใช้โมเดลการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High-field saturation) สภาพคล่องของพาหะขั้นสุดท้ายจะถูกคำนวณเป็นสองขั้นตอน อันดับแรกสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มนต่ำ ( $\mu_{low}$ ) จะถูกกำหนดตามสมการที่ (3.9) อันดับต่อมาสภาพคล่องของพาหะชั้นสุดท้ายจะถูก คำนวณจากสูตรที่เป็นฟังก์ชันของแรงขับ (driving force) ( $F_{hfs}$ )

$$\mu = f(\mu_{low}, F_{hfs}) \quad (3.10)$$

โดยโมเดลสภาพคล่องของพาหะตัวแรกที่เราเลือกใช้คือ Doping Dependence ซึ่งเป็น โมเดลการลดลงของสภาพคล่องของพาหะ (mobility degradation) เนื่องจากการกระเจิงกับสารเจือ หรือสิ่งเจือปน (impurity scattering) เราจะเลือกใช้โมเดลสภาพคล่องของ Masetti ซึ่งเป็นโมเดล มาตรฐานสำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอน

โมเดลมาตรฐานที่ถูกใช้โดย Sentaurus Device เพื่อจำลองสภาพคล่องของพาหะที่ขึ้นกับ การเจือ (doping-dependent mobility) ในซิลิคอนถูกนำเสนอโดย Masetti และคณะ [44]

$$\mu_{dop} = \mu_{min1} \exp\left(\frac{P_c}{N_{A,0} + N_{D,0}}\right) + \frac{\mu_{const} - \mu_{min2}}{1 + ((N_{A,0} + N_{D,0})/C_r)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 + (C_s/(N_{A,0} + N_{D,0}))^\beta} \quad (3.11)$$

สภาพคล่อง  $\mu_{min1}$ ,  $\mu_{min2}$  และ  $\mu_1$ , ความเข้มข้นการเจือ (doping concentration)  $P_c$ ,  $C_r$  และ  $C_s$ , และตัวยกกำลัง  $\alpha$  และ  $\beta$  จะถูกกำหนดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับโมเดลของ Masetti

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$\mu_{min1}$	52.2	44.9	cm <sup>2</sup> /Vs
$\mu_{min2}$	52.2	0	cm <sup>2</sup> /Vs
$\mu_1$	43.4	29.0	cm <sup>2</sup> /Vs
$P_c$	0	$9.23 \times 10^{16}$	cm <sup>-3</sup>
$C_r$	$9.68 \times 10^{16}$	$2.23 \times 10^{17}$	cm <sup>-3</sup>
$C_s$	$3.43 \times 10^{20}$	$6.10 \times 10^{20}$	cm <sup>-3</sup>
$\alpha$	0.680	0.719	-
$\beta$	2.0	2.0	-

ส่วนสภาพคล่องของพาหะที่การเจือระดับต่ำ (low-doping mobility)  $\mu_{const}$  จะถูกระบุด้วยโมเดล สภาพคล่องคงที่ (constant mobility model) ซึ่งเป็นโมเดลสภาพคล่องที่ขึ้นกับการกระเจิงจาก โฟนอนเท่านั้น (phonon scattering) ดังนั้นตัวโมเดลจึงขึ้นกับอุณหภูมิของแลตทิซเพียงอย่างเดียว

$$\mu_{const} = \mu_L \left( \frac{T}{300K} \right)^{-\zeta} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $\mu_L$  คือสภาพคล่องของพาหะเนื่องจากการกระเจิงกับโฟนอนในเนื้อสาร (bulk phonon scattering) ค่ามาตรฐานของ  $\mu_L$  และตัวคูณกำลัง  $\zeta$  จะถูกแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$\mu_L$	1417	470.5	cm <sup>2</sup> /Vs
$\zeta$	2.5	2.2	-

โมเดลสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ นอกจากโมเดลสภาพคล่องที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือแล้ว เรายังเลือกใช้โมเดลสภาพคล่องอีกโมเดลหนึ่งก็คือโมเดลสภาพคล่องของพาหะที่ขึ้นกับการกระเจิงระหว่างพาหะกับพาหะ (carrier-carrier scattering) โดยใช้โมเดลของ Conwell-Weisskopf

$$\mu_{eh} = \frac{D(T/300K)^{3/2}}{\sqrt{np}} \left[ \ln \left( 1 + F \left( \frac{T}{300K} \right)^2 (pn)^{-1/3} \right) \right]^{-1} \quad (3.13)$$

ตัวแปร  $D$  และ  $F$  จะถูกระบุในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของโมเดล Conwell-Weisskopf สำหรับซิลิคอน

Symbol	Value	Unit
$D$	$1.04 \times 10^{21}$	cm <sup>-1</sup> v <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$F$	$7.452 \times 10^{13}$	cm <sup>-2</sup>

ดังนั้นโมเดลสภาพคล่องของพาหะที่ความเข้มสนามไฟฟ้าระดับต่ำจะประกอบไปด้วย โมเดลสภาพคล่องที่ขึ้นกับ impurity scattering, carrier-carrier scattering และ phonon scattering (การกระเจิงรูปแบบนี้จะถูกกำหนดอยู่ในโมเดลของ impurity scattering) จากกฎของ Matthiessen จะทำให้ระบุสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำได้ตามความสัมพันธ์

$$\frac{1}{\mu_{low}} = \frac{1}{\mu_{dop}} + \frac{1}{\mu_{eh}} \quad (3.14)$$

สำหรับโมเดลการอิมิตัวสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High-Field Saturation) ในสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ความเร็วลอยเลื่อนของพาหะจะไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าอีกต่อไป แต่ความเร็วจะอิมิตัวสู่ความเร็วจำกัด  $v_{sat}$  โมเดลการอิมิตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะประกอบไปด้วยโมเดลย่อย 3 โมเดลคือ โมเดลสภาพคล่องจริง (actual mobility model), โมเดลการอิมิตัวของความเร็ว (velocity saturation model) และโมเดลของแรงขับ (driving force model) โดยโมเดลมาตรฐานของการอิมิตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะเป็นโมเดลของ Canali

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลของ Canali [45] สร้างขึ้นจากสูตรของ Caughey-Thomas (Caughey-Thomas formula) [46] แต่เพิ่มตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิ (temperature-dependent parameters) เข้าไป

$$\mu(F_{hfs}) = \frac{(\alpha + 1) \mu_{low}}{\alpha + \left[ 1 + \left( \frac{(\alpha + 1) \mu_{low} F_{hfs}}{v_{sat}} \right)^\beta \right]^{1/\beta}} \quad (3.15)$$

ซึ่ง  $\mu_{low}$  หมายถึงสภาพคล่องที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ (low-field mobility) เป็นโมเดลสภาพคล่องของพาหะที่ใช้ไปก่อนหน้านี้ ( $\mu_{dop}$  และ  $\mu_{eh}$ ) ด้วยกากลัง  $\beta$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจาก

$$\beta = \beta_0 \left( \frac{T}{300K} \right)^{\beta_{exp}} \quad (3.16)$$

โดยค่าของตัวแปรในสมการที่ (3.16) และตัวแปร  $\alpha$  ในสมการที่ (3.15) จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรของโมเดล Canali (ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอน)

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$\beta_0$	1.109	1.213	-
$\beta_{exp}$	0.66	0.17	-
$\alpha$	0	0	-

สำหรับโมเดลความเร็วอิ่มตัว  $v_{sat}$  ของโมเดล Canali (โมเดลสำหรับซิลิคอน) จะถูกกำหนดโดย

$$v_{sat} = v_{sat,0} \left( \frac{300K}{T} \right)^{v_{sat,exp}} \quad (3.17)$$

ซึ่งค่าตัวแปรในสมการที่ (3.17) จะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรการอิ่มตัวของความเร็ว

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$v_{sat,0}$	$1.07 \times 10^7$	$8.37 \times 10^6$	cm/s
$v_{sat,exp}$	0.87	0.52	-

และค่ามาตรฐานสำหรับสนามที่ขับหรือแรงขับ (driving field or driving force) อิเล็กตรอนก็คือ (พิจารณาเฉพาะกรณีสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่ถูกใช้ในงานวิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{hfs,n} = |\nabla\Phi_n| \quad (3.18)$$

ซึ่งค่ามาตรฐานจะแทนสนามไฟฟ้าในส่วนเกรเดียนต์ของศักย์เฟอร์มิเสมือน (quasi-Fermi potential,  $\nabla\Phi_n$ ) ที่อยู่ภายในชิ้นส่วน mesh ที่สัมผัสกับขั้ว

$$F_{hfs,n} = |\vec{E}| \quad (3.19)$$

■ *Physics { Recombination ( SRH (DopingDependence) TrapAssistedAuger ) }*

ในอุปกรณ์ฮอลล์แวนด์เราจะพิจารณาผลของการผสมกลับที่เกิดจากข้อบกพร่องในผลึก เนื่องจากว่าวัสดุที่เราเลือกใช้เป็นซิลิคอนซึ่งเป็น indirect band gap semiconductor ดังนั้นการผสมกลับระหว่างระดับ valence band และ conduction band โดยตรงจึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้ยาก ด้วยเหตุนี้การผสมกลับที่เกิดขึ้นทั้งหมดในซิลิคอนจึงเป็นการผสมกลับผ่าน trap level ทั้งสิ้น โดยเราจะใช้โมเดลการผสมกลับของ Shockley-Read-Hall (SRH) โมเดลนี้ใช้อธิบายการผสมกลับผ่านระดับพลังงานลึกที่เกิดจากข้อบกพร่องในผลึก (deep defect levels in the gap) โดยใน Sentaurus Device จะใช้รูปแบบต่อไปนี้

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (3.20)$$

โดยที่

$$n_1 = n_{i,eff} \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right) \quad (3.21)$$

และ

$$p_1 = n_{i,eff} \exp\left(\frac{-E_{trap}}{kT}\right) \quad (3.22)$$

ซึ่ง  $E_{trap}$  คือผลต่างระหว่างระดับพลังงานของข้อบกพร่อง (defect level) และระดับพลังงานอินทรินซิก (intrinsic level) ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอนคือ  $E_{trap} = 0$

สำหรับการจำลองแบบด้วยการใช้สถิติของเฟอร์มิสมการที่ (3.20) จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็น

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - \gamma_n \gamma_p n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + \gamma_n n_1) + \tau_p(p + \gamma_p p_1)} \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\gamma_n$  และ  $\gamma_p$  จะถูกระบุเป็น

$$\gamma_n = \frac{n}{N_C} \exp(-\eta_n), \quad \eta_n = \frac{E_{F,n} - E_C}{kT} \quad (3.24)$$

$$\gamma_p = \frac{p}{N_V} \exp(-\eta_p), \quad \eta_p = \frac{E_V - E_{F,p}}{kT} \quad (3.25)$$

ซึ่ง  $E_{F,n}$  คือระดับพลังงานกึ่งเฟอร์มิของอิเล็กตรอน (electron quasi-Fermi energy)

$E_{F,p}$  คือระดับพลังงานกึ่งเฟอร์มิของโฮล (hole quasi-Fermi energy)

ส่วนช่วงชีวิตพาหะ (lifetime) ของอิเล็กตรอน  $\tau_n$  และโฮล  $\tau_p$  จะเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับปัจจัยของการเจือสาร (doping-dependent), สนามไฟฟ้า (field-dependent) และอุณหภูมิ (temperature-dependent)

$$\tau_c = \tau_{dop} \frac{f(T)}{1 + g_c(F)} \quad (3.26)$$

ซึ่ง  $c = n$  หรือ  $c = p$

โดยช่วงชีวิตพาหะของ Shockley-Read-Hall (SRH lifetimes) ที่ขึ้นกับการเจือสารใน Sentaurus Device จะถูกจำลองตามความสัมพันธ์ของ Scharfetter (Scharfetter relation) แสดงดังสมการ (3.27) สำหรับการเรียกใช้งานจะใช้คำสั่งในสคริปต์เป็น SRH (DopingDependence)

$$\tau_{dop}(N_{A,0} + N_{D,0}) = \tau_{min} + \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{1 + \left(\frac{N_{A,0} + N_{D,0}}{N_{ref}}\right)^\gamma} \quad (3.27)$$

ซึ่งค่ามาตรฐานของตัวแปรต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 3.7

**ตารางที่ 3.7** ค่าตัวแปรมาตรฐานของช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับการเจือสาร (doping-dependent SRH lifetimes)

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$\tau_{min}$	0	0	s
$\tau_{max}$	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$	s
$N_{ref}$	$1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{16}$	$\text{cm}^{-3}$
$\gamma$	1	1	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่วนที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ  $f(T)$  (สมการที่ (3.26)) ซึ่งแสดงดังสมการ (3.28) (ส่วนนี้ในปัจจุบันมีการอธิบายในสองรูปแบบตามการทดลอง [47-48]) สำหรับการเรียกใช้งานจะใช้คำสั่งในส่วนฟิสิกส์เป็น SRH (TempDependence)

$$f(T) = \left( \frac{T}{300K} \right)^{T_\alpha} \quad (3.28)$$

หรือแสดงในรูปของเอกซ์โพเนนเชียล จะใช้คำสั่งเป็น SRH (ExpTempDependence)

$$f(T) = e^{C \left( \frac{T}{300K} - 1 \right)} \quad (3.29)$$

ซึ่งค่าของตัวแปร  $T_\alpha$  และ  $C$  จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานของตัวแปรสำหรับช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$T_\alpha$	-1.5	-1.5	-
$C$	2.55	2.55	-

ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้าหรือการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้า (field enhancement) ซึ่งจะลดช่วงชีวิตการผสมกลับของ Shockley-Read-Hall ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า ความเข้มสูง เราไม่ควรละเลยถ้าหากสนามไฟฟ้าเกินค่าประมาณ  $3 \times 10^5$  โวลต์ต่อเซนติเมตร ในบางบริเวณของอุปกรณ์

โมเดลในส่วนนี้สามารถระบุได้สองรูปแบบคือ โมเดลการทะลุทะลวงโดยมีกับดักพาหะช่วย (trap-assisted tunneling) ของ Schenk [49] และ Hurkx [50] ซึ่งโมเดลของ Hurkx ยังสามารถใช้หาอัตราการจับและปลดปล่อยพาหะ (capture and emission rates) ได้ด้วย สำหรับการเรียกใช้งานจะใช้คำสั่งในส่วนฟิสิกส์เป็น SRH (ElectricField (Schenk | Hurkx))

โมเดลของ Schenk จะถูกระบุในฟังก์ชันที่ขึ้นกับความเข้มของสนาม  $g_c(F)$  ในสมการช่วงชีวิตของพาหะ Shockley-Read-Hall (สมการที่ (3.26)) ในกรณีของอิเล็กตรอน  $g_c(F)$  จะอยู่ในรูป

$$g_n(F) = \left( 1 + \frac{(\hbar\Theta)^{3/2} \sqrt{E_t - E_0}}{E_0 \hbar\omega_0} \right)^{-1/2} \frac{(\hbar\Theta)^{3/4} (E_t - E_0)^{1/4}}{2\sqrt{E_t E_0}} \left( \frac{\hbar\Theta}{kT} \right)^{3/2} \quad (3.30)$$

$$\times \exp \left( -\frac{E_t - E_0}{\hbar\omega_0} + \frac{\hbar\omega_0 - kT}{2\hbar\omega_0} + \frac{2E_t - kT}{2\hbar\omega_0} \ln \frac{E_t}{\epsilon_R} - \frac{E_0}{\hbar\omega_0} \ln \frac{E_0}{\epsilon_R} + \frac{E_t - E_0}{kT} - \frac{4}{3} \left( \frac{E_t - E_0}{\hbar\Theta} \right)^{3/2} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $E_0$  หมายถึงพลังงานของการเปลี่ยนระดับในแนวระนาบในเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด (Energy of an optimum horizontal transition path) ซึ่งขึ้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิในลักษณะดังต่อไปนี้

$$E_0 = 2\sqrt{\varepsilon_F} \left[ \sqrt{\varepsilon_F + E_t + \varepsilon_R} - \sqrt{\varepsilon_F} \right] - \varepsilon_R \quad (3.31)$$

ซึ่งนิพจน์  $\varepsilon_R = S\hbar\omega_0$  คือพลังงานผ่อนคลายของแลตทิซ (lattice relaxation energy),  $S$  คือตัวประกอบของ Huang-Rhys (Huang-Rhys factor),  $\hbar\omega_0$  พลังงานโฟนอนยังผล (effective phonon energy),  $E_t$  คือระดับพลังงานของศูนย์กลางการผสมกลับ (energy level of the recombination center), และ  $\Theta = (q^2 F^2 / 2\hbar m_{\ominus,n})$  คือความถี่เชิงแสง-ไฟฟ้า (electro-optical frequency) มวล  $m_{\ominus,n}$  เป็นมวลของอิเล็กตรอนขณะเกิดการทะลุทะลวงในทิศทางของสนาม (electron tunneling mass in the field direction) และ  $F$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้านิพจน์ตามสมการที่ (3.19) สำหรับโฮลสามารถหาได้โดยแทน  $m_{\ominus,n}$  ด้วย  $m_{\ominus,p}$  และ  $E_t$  ด้วย  $E_{g,eff} - E_t$

สำหรับอิเล็กตรอน  $E_t$  จะสัมพันธ์กับระดับพลังงานของขบกร่อง (defect level)  $E_{trap}$  ของสมการ (3.21) และ (3.22) โดย

$$E_t = \frac{1}{2} E_{g,eff} + \frac{3}{4} kT \ln \left( \frac{m_n}{m_p} \right) - E_{trap} - (32R_C \hbar^3 \Theta^3)^{1/4} \quad (3.32)$$

ซึ่ง  $R_C$  คือค่าคงที่รีดเบิร์กยังผล (effective Rydberg constant) และ  $E_{g,eff}$  คือค่าช่องว่างพลังงานยังผล (effective band gap,  $E_{g,eff} = E_g - E_{bgn}$ )

ในโมเดล Rydberg ของเติมความหนาแน่นอิเล็กตรอน  $n$  ในสมการ (3.20) จะถูกแทนที่ด้วย

$$\tilde{n} = n \exp \left( - \frac{\gamma_n |\nabla E_{F,n}| (E_t - E_0)}{kTF} \right) \quad (3.33)$$

โดย  $E_0$  และ  $E_t$  แสดงตามสมการ (3.31) และ (3.32) ส่วน  $p$  ก็จะถูกแทนที่ในลักษณะที่คล้ายกัน ส่วนตัวแปร  $\gamma_n$  และ  $\gamma_p$  จะมีค่าเท่ากับ  $\gamma_n = n/(n + n_{ref})$  และ  $\gamma_p = p/(p + p_{ref})$  สำหรับค่ามาตรฐานในโมเดลของ Schenk  $n_{ref}$  และ  $p_{ref}$  จะมีค่าเท่ากับ  $10^{-3}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร,  $E_{trap} = 0 \text{ eV}$ ,  $S = 3.5$ , และ  $\hbar\omega = 0.068 \text{ eV}$

โมเดลของ Hurkx ที่ถูกระบุในรูปฟังก์ชันของตัวประกอบการทะลุทะลวงผ่านกับดักพาหะ (functions of the trap-assisted tunneling factor)  $g(F) = \Gamma_{tat}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma_{iat} = \int_0^{\tilde{E}_n} \exp\left[u - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{u^3}}{\tilde{E}}\right] du \quad (3.34)$$

ได้ผลเฉลยโดยประมาณ

$$\Gamma_{iat} \approx \begin{cases} \sqrt{\pi} \tilde{E} \cdot \exp\left[\frac{1}{3} \tilde{E}^2\right] \left(2 - \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{E}_n}{\tilde{E}} - \tilde{E}\right)\right]\right), & \tilde{E} \leq \sqrt{\tilde{E}_n} \\ \sqrt{\pi} \tilde{E} \cdot \tilde{E}_n^{1/4} \exp\left[-\tilde{E}_n + \tilde{E} \sqrt{\tilde{E}_n} + \frac{1}{3} \frac{\sqrt{\tilde{E}_n^3}}{\tilde{E}}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{\tilde{E}_n^{1/4} \sqrt{\tilde{E}} - \tilde{E}_n^{3/4} / \sqrt{\tilde{E}}}{\sqrt{\tilde{E}}}\right], & \tilde{E} > \sqrt{\tilde{E}_n} \end{cases} \quad (3.35)$$

ตัวแปร  $\tilde{E}$  และ  $\tilde{E}_n$  จะถูกระบุตาม

$$\tilde{E} = \frac{E}{E_0} \quad \text{โดย } E_0 = \frac{\sqrt{8m_0 m_t k^3 T^3}}{q\hbar} \quad (3.36)$$

$$\tilde{E}_n = \frac{E_n}{kT} = \begin{cases} 0, & kT \ln \frac{n}{n_i} > 0.5E_g \\ \frac{0.5E_g}{kT} - \ln \frac{n}{n_i}, & E_{trap} \leq kT \ln \frac{n}{n_i} \leq 0.5E_g \\ \frac{0.5E_g}{kT} - \frac{E_{trap}}{kT}, & E_{trap} > kT \ln \frac{n}{n_i} \end{cases} \quad (3.37)$$

ซึ่ง  $m_t$  คือมวลการทะลุทะลวงของพาหะ (carrier tunneling mass) และ  $E_{trap}$  คือพลังงานของระดับกับดักพาหะ (energy of trap level)

ในโมเดลการผสมกลับ SRH ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น สำหรับอุปกรณ์ฮออล์แนวตั้งเราจะพิจารณาเพียงการผสมกลับที่ขึ้นกับความเข้มข้นของการเจือเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากในการจ ทองแบบเราจะละเลยเรื่องของอุณหภูมิ โดยจะจำลองแบบอุปกรณ์ในอุณหภูมิคงที่ที่ 300 เคลวิน จึงทำให้เทอมที่ขึ้นกับอุณหภูมิ  $f(T)$  ในสมการ (3.26) มีค่าเท่ากับ 1 (อ้างอิงตามสมการที่ (3.28) และ (3.29)) ส่วนเทอมที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า เนื่องจากการไปอัสอุปกรณ์ในระดับต่ำไม่ได้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าความเข้มสูงถึงค่าอ้างอิง ( $3 \times 10^5$  V/cm) เราจึงสามารถประมาณค่าเทอมที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้า  $g(F)$  ได้เป็น 0 นั่นก็คือช่วงชีวิตของพาหะสำหรับการผสมกลับแบบ SRH จะขึ้นกับการเจือสารเพียงอย่างเดียว  $\tau_{SRH} = \tau_{dop}$

นอกจากโมเดลการผสมกลับของ Shockley-Read-Hall ที่กล่าวไปข้างต้นแล้วเรายังเลือกใช้โมเดลการผสมกลับอีกหนึ่งโมเดลนั่นก็คือ โมเดลการผสมกลับของโอเจอร์ผ่านระดับกับดัก (Trap-assisted Auger recombination (TAA)) ซึ่งเป็นโมเดลการผสมกลับผ่าน trap level เหมือนกับโมเดลของ SRH แต่จะเกี่ยวข้องกับพาหะสามตัว โดยโมเดลนี้พัฒนามาจากโมเดลการผสมกลับ SRH และ Couple defect level (CDL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการผสมกลับแบบโอเจอร์จะเหมือนกับอัตราการผสมกลับ SRH แต่ lifetime ของพาหะในสมการที่ 3.20 จะถูกแทนที่ด้วย

$$\frac{\tau_p}{1 + \tau_p / \tau_p^{TAA}} \quad (3.38)$$

$$\frac{\tau_n}{1 + \tau_n / \tau_n^{TAA}} \quad (3.39)$$

โดย TAA lifetime ในสมการ 3.38 และ 3.39 จะขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะตามการประมาณจาก [51-53]

$$\frac{1}{\tau_n^{TAA}} \approx C_p^{TAA} (n + p) \quad (3.40)$$

$$\frac{1}{\tau_p^{TAA}} \approx C_n^{TAA} (n + p) \quad (3.41)$$

ซึ่งขนาดของสัมประสิทธิ์ TAA (TAA coefficient)  $C_n^{TAA}$  และ  $C_p^{TAA}$  จะมีค่ามาตรฐานเท่ากับ  $1 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

ดังนั้นอัตราการผสมกลับแบบ TAA จะเป็น

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\left( \frac{\tau_p}{1 + \tau_p / \tau_p^{TAA}} \right) (n + n_1) + \left( \frac{\tau_n}{1 + \tau_n / \tau_n^{TAA}} \right) (p + p_1)} \quad (3.42)$$

เนื่องจากในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ของจริงจะมีการสร้างชั้นออกไซด์บริเวณผิวเพื่อหาเป็นชั้นป้องกัน ดังนั้นในส่วนการผสมกลับเราจึงเพิ่มโมเดลการผสมกลับแบบ SRH ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและออกไซด์ และกำหนดหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอนและออกไซด์ของซิลิคอนเข้าไปด้วย โดยใช้ค่า

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

โมเดลการผสมกลับที่ผิวเป็นโมเดลที่พัฒนามาจากโมเดล SRH เนื่องจากที่ผิวหรือรอยต่อของวัสดุสองชนิดมักเกิดพันธะที่ขาดหรือข้อบกพร่องผลึกขึ้น (dangling bond or defect) ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าบริเวณเหล่านี้เป็นศูนย์กลางการผสมกลับหรือระดับกับดัก (recombination center or trap level) โดยโมเดลนี้สามารถนำไปใช้ได้กับหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ-สารกึ่งตัวนำและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำ วจนวน โดยที่หน้าสัมผัสจะมีการใช้สูตรเพิ่มเติมซึ่งมีโครงสร้างสมมูลกับการผสมกลับแบบ SRH ในเนื้อสาร (bulk SRH recombination) ตามสมการ

$$R_{surf,net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{(n + n_1)/s_p + (p + p_1)/s_n} \quad (3.43)$$

ด้วย

$$n_1 = n_{i,eff} \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right) \text{ และ } p_1 = n_{i,eff} \exp\left(\frac{-E_{trap}}{kT}\right) \quad (3.44)$$

สำหรับสถิติเฟอร์มีตัวสมการจะถูกเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับสมการอัตราการผสมกลับแบบ SRH ในเนื้อสาร (สมการ (3.23)) โดยทั่วไปแล้วความเร็วในการผสมกลับที่ผิวจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือที่ผิว (อ้างอิงตามผลของ Cuevas สำหรับซิลิคอนที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส [55]) โดยเฉพาะในกรณีที่มีความเข้มข้นการเจือมีการเปลี่ยนแปลงไปตามหน้าสัมผัส โมเดลนี้ยังมีความจำเป็นต่อการจำลองแบบอย่างมาก ใน Sentaurus Device โมเดลความเร็วการผสมกลับที่ผิวที่ขึ้นกับการเจือสารจะแสดงดังสมการ

$$s = s_0 \left[ 1 + s_{ref} \left( \frac{N_i}{N_{ref}} \right)^\gamma \right] \quad (3.45)$$

โดย  $N_i$  คือความเข้มข้นของสารเจือที่ถูกไอออไนซ์ (ionized dopant concentration) ส่วนตัวแปรอื่นๆ สำหรับโมเดลการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH จะแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรของโมเดลการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH

Symbol	Electrons	Holes	Unit
$s_0$	$1 \times 10^3$		cm/s
$s_{ref}$	$1 \times 10^{-3}$		-
$N_{ref}$	$1 \times 10^{16}$		$\text{cm}^{-3}$
$\gamma$	1		-
$E_{trap}$	0		eV

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

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เราจะใช้โมเดลการขนส่งพาหะแบบกัลวานิก (Galvanic transport model) ซึ่งเป็นโมเดลที่อาศัยสมการความหนาแน่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสการแพร่-ลอยเลื่อนที่เพิ่มทอมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไป โดยสิ่งที่กระทำต่อสมการขนส่ง (transport equations) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์นั้น เป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ที่มีต่อพาหะ [55-57] ด้วยเหตุนี้สมการความหนาแน่นกระแสจึงสามารถเขียนเป็น

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1 + (\mu_\alpha^* B)^2} [\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha)] \quad (3.39)$$

เมื่อ  $\alpha = n$  หรือ  $p$

$\mu_\alpha$  คือสภาพคล่องของพาหะ

$\vec{g}_\alpha$  คือเวกเตอร์กระแสที่ไม่คิดสภาพคล่องของพาหะ (current vector without mobility)

$\mu_\alpha^*$  คือสภาพคล่องพาหะของฮอลล์ (Hall mobility)

$\vec{B}$  คือเวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (magnetic induction vector)

$B$  คือขนาดของเวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

โดยสภาพคล่องของฮอลล์จะสัมพันธ์กับสภาพคล่องขณะลอยเลื่อน (drift mobility) ตามสมการ

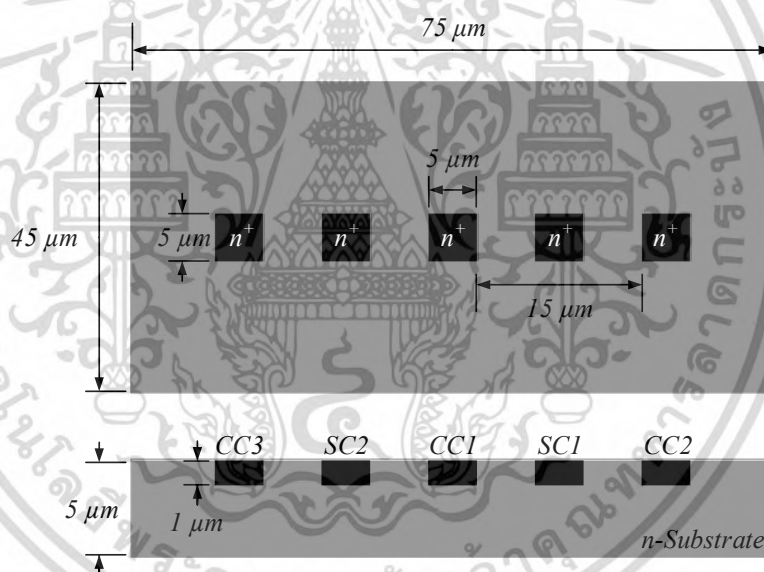
$\mu_n^* = r_n \mu_n$  และ  $\mu_p^* = r_p \mu_p$  ซึ่ง  $r_n$  และ  $r_p$  คือตัวประกอบการกระเจิงของฮอลล์ (Hall scattering factors) ในกรณีของเนื้อซิลิคอน (bulk silicon) ค่าโดยทั่วไปจะเท่า  $r_n = 1.1$  และ  $r_p = -0.7$

### 3.3 สมมุติฐานในการจำลองแบบ

การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในงานวิจัยนี้ จะถูกจำลองภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 จนถึง 0.5 เทสลา ซึ่งเป็นช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรทั่วไป เพราะโดยความเป็นจริงแล้วอุปกรณ์ฮอลล์มักจะถูกนำไปใช้กับแม่เหล็กถาวรขนาดใหญ่ ตัวอุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ โดยเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฐานรองเนื่องจากตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (สมการที่ 2.31) และ กระแสเบี่ยงเบน (สมการที่ 2.37) ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แนวราบ มีความเกี่ยวข้องต่อปริมาณความเข้มข้นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะ ดังนั้นด้วยการทำงานในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง ตัวแปรเหล่านี้จึงอาจส่งผลกระทบต่อสนองต่อสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องสนใจตัวแปรที่ขึ้นกับความเข้มข้นและสภาพคล่องของพาหะนั้นก็คือ ความเข้มข้นของฐานรอง โดยในงานวิจัยจะทำการจำลองแบบอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นของฐานรองในช่วง  $1 \times 10^{15}$  ถึง  $1 \times 10^{16}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อันดับต่อมาจะเป็นการหาตัวแปรทางโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการทำงานในโหมดกระแสเนื่องจากว่าตัวแปรทางโครงสร้างเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสนองต่อสนามแม่เหล็กผ่านทาง geometrical factor ดังนั้นไม่ว่าการทำงานในโหมดแรงดันหรือโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง ตัวแปรทางโครงสร้างย่อมมีผลต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์ โดยในงานวิจัยจะเริ่มจากการดูผลของความลึกที่มีต่อการทำงานในโหมดกระแสและแรงดัน ซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกในช่วง 5 ถึง 160 ไมโครเมตร เพื่อแทนการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่สร้างเป็นบ่อและกรณีที่สร้างลงบนฐานรองโดยตรง ต่อมาจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวอุปกรณ์ตั้งแต่ 10 ถึง 45 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเมตร และสุดท้ายจะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวหรือระยะห่างระหว่างขั้วกระแส จากตรงกลางถึงขั้วกระแสด้านข้างทั้งสอง โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวตั้งแต่ 15 ถึง 45 ไมโครเมตร หลังจากหาตัวแปรทางโครงสร้างที่เหมาะสมเสร็จ ต่อไปจะเป็นการทดลองใช้อุปกรณ์ฮอลล์ที่ค่าต่าง ๆ เนื่องจากปริมาณกระแสไบอัสเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่ออุปกรณ์ที่อาศัยทั้งปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแสและปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ดังนั้นผลของปริมาณกระแสไบอัสจึงอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งด้วย โดยในการจำลองแบบเราจะเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัสในช่วง 0.1 ถึง 1.5 มิลลิแอมป์ สำหรับส่วนสุดท้ายจะเป็นการทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระตามุมต่าง ๆ ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ทำงานในโหมดกระแสและโหมดแรงดัน เนื่องจากตัวอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ดีจะต้องสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางที่สอดคล้องและถูกต้องต่อมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำให้เกิดการตอบสนองสูงสุด หรือก็คือจะต้องเป็นไปตามกฎของแรงทางแม่เหล็กที่จะต้องตอบสนองได้ดีที่สุดในกรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงมุมของสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ในระนาบสองระนาบด้วยกัน นั่นคือระนาบ x-y และระนาบ y-z ด้วยขนาดสนามแม่เหล็กสองค่าคือ 0.25 และ 0.50 เทสลา



รูปที่ 3.27 โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ใช้ในการอ้างอิง

ในการจำลองแบบทั้งหมดจะอาศัยการอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทั้งหมดกับอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีขนาดโครงสร้างตามรูปที่ 3.27 นั่นคือ มีความลึก 5 ไมโครเมตร ความกว้าง 45 ไมโครเมตร ความยาว 15 ไมโครเมตร โดยขนาดของขั้วทั้งหมดมีความกว้างและยาว 5 ไมโครเมตร และลึก 1 ไมโครเมตร

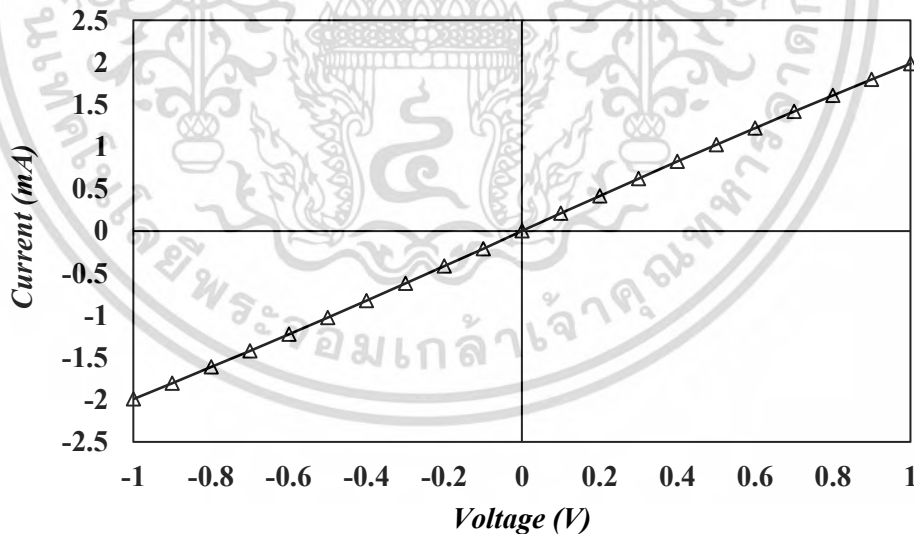
## บทที่ 4

### ผลการจำลองแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ได้จากการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD ซึ่งผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะถูกวัดทั้งในรูปของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และความแตกต่างของกระแส หรือก็คือการทางานของอุปกรณ์ในโหมดแรงดันและโหมดกระแสตามลำดับ โดยผลการจำลองแบบที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์และเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดทั้งสอง นอกจากนี้จะมีการอภิปรายผลที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีต่อการท งานในโหมดทั้งสอง

#### 4.1 ผลการจำลองแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น

ก่อนการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเราจะทำการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของตัวอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง โดยเราจะทำการป้อนแรงดันตั้งแต่ 0 จนถึง 1 โวลต์ เข้าไปที่ขั้ว CC1 ในลักษณะไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) และไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) และวัดกระแสไฟฟ้าที่ขั้ว CC2 และ CC3 ผลของคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มีขนาดตามโครงสร้างอ้างอิง (รูปที่ 3.7) และมีฐานรองความเข้มข้น  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1



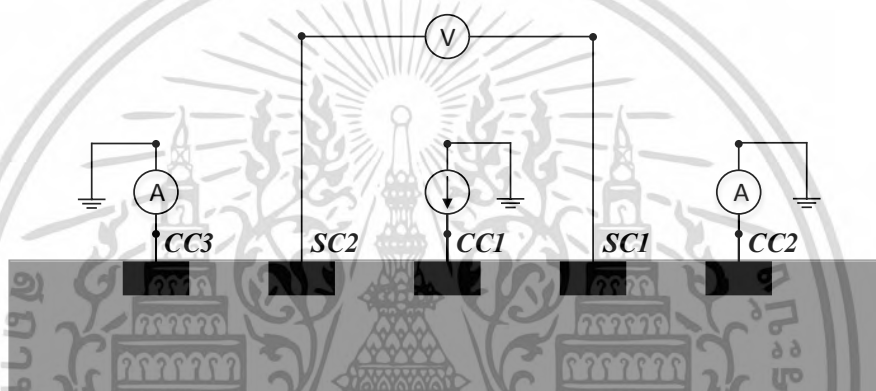
รูปที่ 4.1 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น

คุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ได้จากการจำลองแบบในรูปที่ 4.1 มีลักษณะเหมือนกับคุณลักษณะของตัวต้านทานธรรมดา เนื่องจากว่าในการจำลองแบบ บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกกำหนดรอยสัมผัสระหว่างโลหะ (อะลูมิเนียม) และสารกึ่งตัวนำ (ซิลิคอน) เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก และด้วยตัวอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ไม่ได้มีการสร้างรอยสัมผัสใด ๆ ในตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ นอกจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำบริเวณขั้ว ดังนั้นตัวอุปกรณ์เองจึงมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน โดยตัวอุปกรณ์มีค่าความต้านทานเท่ากับ 496.25 โอห์ม สำหรับการทดลองทั้งหมดถึงแม้ว่าอุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ แต่คุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งหมดจะยังคงเดิม

## 4.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว

สำหรับการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง ตัวอุปกรณ์จะถูกไบอัสกระแสตรงที่เข้าที่ขั้ว CC1 จากนั้นจะทำการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขั้ว SC1 และ SC2 ส่วนความแตกต่างของกระแสจะถูกวัดที่ขั้ว CC2 และ CC3 ดังแผนภาพตามรูปที่ 4.2



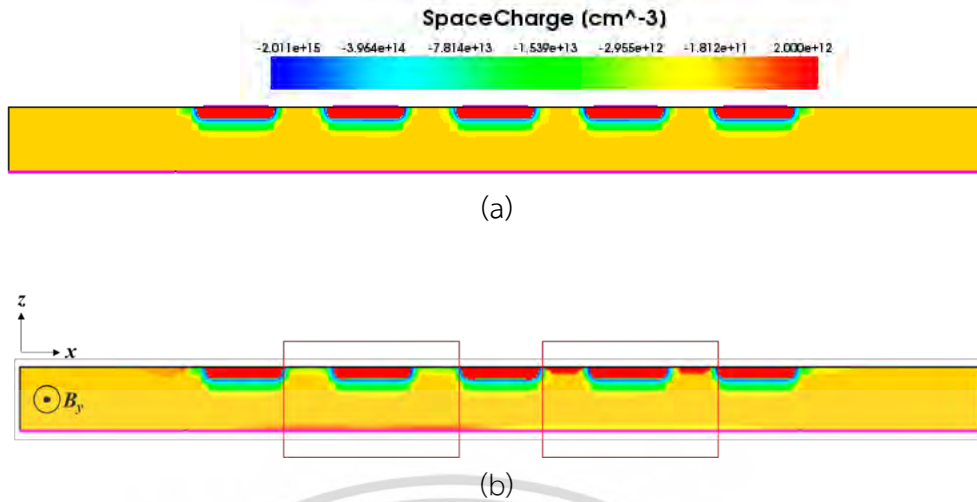
รูปที่ 4.2 การวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง

หลักการทางานพื้นฐานของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง จะทำงานด้วยโหมดของแรงดัน โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดการสะสมประจุพาหะบริเวณขั้ว SC1 และ SC2 ทำให้เราสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ได้ที่สองขั้วดังกล่าว (สมการที่ 4.1) ซึ่งผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วด้วย Sentaurus TCAD ก็แสดงพฤติกรรมของการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ตามหลักการดังกล่าว (รูปที่ 4.3)

$$V_H = V_{SC1} - V_{SC2} \quad (4.1)$$

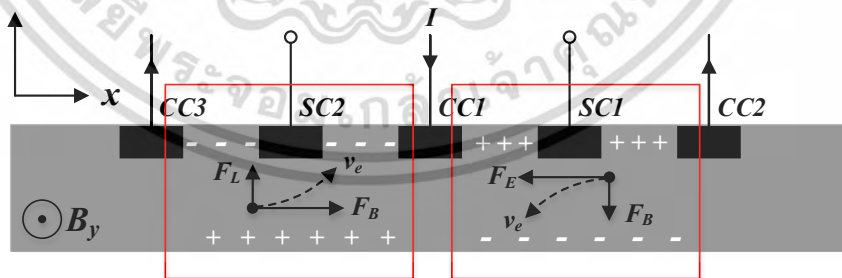
ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการสะสมประจุพาหะ โดยในรูป 4.3 เป็นการแสดงบริเวณที่มีการสะสมประจุ (space charge) ในขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตามรูปที่ 4.3(a) เราจะไม่พบการสะสมประจุพาหะบริเวณขั้ว SC1 และ SC2 แต่หากมีสนามตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศ y ตามรูป 4.3(b) ภายในตัวอุปกรณ์จะแสดงให้เห็นถึงการสะสมประจุพาหะบริเวณขั้ว SC1 และ SC2 (บริเวณกรอบสีแดง) โดยแถบสีแดงที่เกิดระหว่างขั้วแสดงถึงการสะสมของประจุบวก ในขณะที่แถบสีเหลืองจะแสดงการสะสมของประจุลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การสะสมประจุพาหะของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว (a) ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน (b) ขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

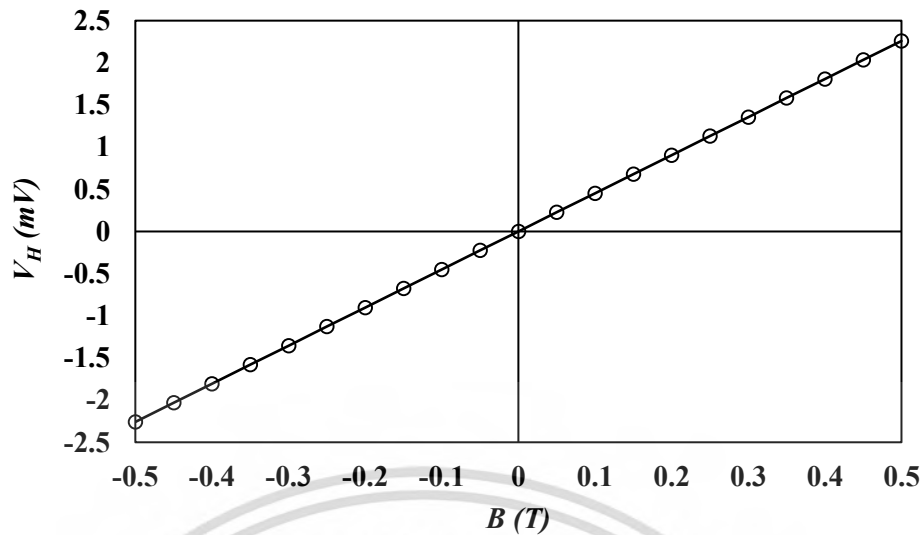
จากผลการจำลองแบบ สามารถอธิบายการสะสมประจุพาหะได้ตามกลไกการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ดังรูปที่ 4.4 เมื่อไออิเล็กตรอนเคลื่อนในทิศ  $-x$  และ  $x$  ซึ่งสวนทางกับทิศกระแส ด้วยการกระทำจากแรงทางไฟฟ้า  $F_E$  หากมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศ  $y$  สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงแม่เหล็ก  $F_B$  ขึ้นในทิศ  $z$  และ  $-z$  ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พาหะอิเล็กตรอนถูกผลักไปตามแนวแรงลอเรนซ์ซึ่งเป็นแรงลัพธ์ระหว่างแรงทางไฟฟ้าและแรงทางแม่เหล็ก จนทำให้เกิดการสะสมของพาหะดังแสดงในรูปที่ 4.4 การสะสมของพาหะอิเล็กตรอนจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงกันข้ามขึ้น ดังนั้นเราจึงสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดบริเวณขั้ว SC1 และ SC2 ได้ เนื่องจากระหว่างขั้วดังกล่าวเปรียบเสมือนมีเซลล์ไฟฟ้าสองตัวต่ออนุกรมกันด้วยฐานรองอยู่ (กรอบสีแดง) การทำงานในรูปแบบนี้เราจะเรียกว่าเป็น “การทำงานในโหมดแรงดัน”



รูปที่ 4.4 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดแรงดันหรือเอาต์พุตในรูปของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.5 จากรูปการตอบสนองของตัวอุปกรณ์ในโหมดแรงดัน แสดงการตอบสนองแบบเชิงเส้นที่ขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็กที่ป้อน ซึ่งเป็นไปตามสมการแรงดันไฟฟ้าฮอลล์โดยปกติ (สมการที่ (2.31))

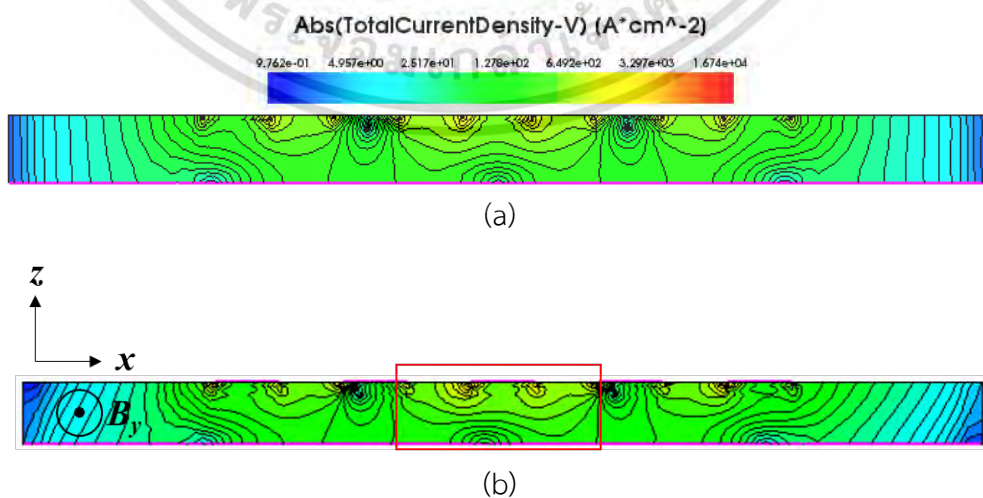
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ในโหมดแรงดัน

ในผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ได้ข้างต้น นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นแล้ว ยังพบว่ามีปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเกิดขึ้นด้วย หากพิจารณาการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแส (current density) ตามรูปที่ 4.6 จะพบว่า ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตามรูปที่ 4.6(a) การกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสบริเวณใต้ขั้ว CC1 จะมีการกระจายตัวไปยังสองฝั่งในลักษณะที่สมดุลกัน แต่เมื่อตัวอุปกรณ์ถูกสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศ  $y$  ตามรูป 4.6(b) การกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสจะมีลักษณะที่เกิดการเบี่ยงไปยังฝั่งหนึ่งมากกว่า จึงส่งผลให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขั้ว CC2 และ CC3 เกิดความแตกต่างกันขึ้น ดังนั้นจึงสามารถระบุกระแสที่เกิดการเบี่ยงเบนได้จาก

$$\Delta I = I_{CC2} - I_{CC3} \quad (4.2)$$

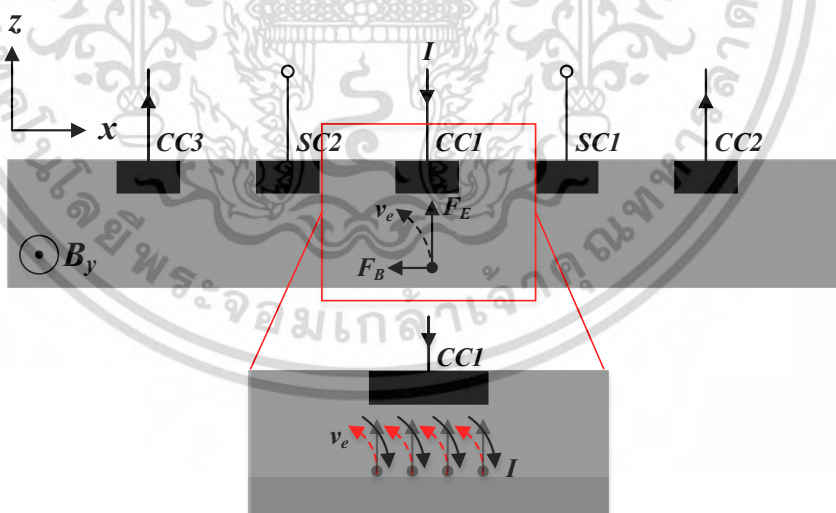


รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น (a) ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัด

ผ่าน (b) ขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมมุติฐานที่กล่าวไปในบทต้น เราได้พูดถึงการแบ่งขั้วกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิง ซึ่งถูกแบ่งขั้วกระแสออกเป็นสามขั้ว เนื่องมาจากเหตุผลที่ต้องการพัฒนาอุปกรณ์ที่อิงโครงสร้างมาจากแผ่นฮอลล์ ให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวของอุปกรณ์ได้ จึงทำให้ตัวอุปกรณ์ ต้องมีการแบ่งขั้วกระแสและยกขึ้นมาบนระนาบผิว เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างบนเทคโนโลยีพลาสมา ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงจึงมีจำนวนขั้วกระแสที่เท่ากับอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้ต้องมีขั้วกระแสอย่างน้อยสามขั้ว โดยมีหนึ่งขั้วสำหรับไปอัสกระแส และอีกสองขั้วสำหรับใช้วัดความแตกต่างของกระแส ดังนั้นแล้วความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นจึงสามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส

จากผลการจ ลองแบบที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.6 สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ได้ตามรูปที่ 4.7 เมื่อตัวอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงถูกไปอัสด้วยกระแสคงที่เข้าสู่ขั้ว CC1 ในขณะที่ขั้ว CC2 และ CC3 ทาหน้าที่เป็นกราวด์ และมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ในทิศ  $y$  พาหะอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าในทิศ  $z$  ใต้ขั้ว CC1 จะถูกแรงทางแม่เหล็กกระทำในทิศ  $-x$  ส่งผลให้พาหะที่กำลังเคลื่อนที่ที่ถูกเบี่ยงเบนไปตามแนวแรงลอเรนซ์ที่เป็นแรงลัพธ์ระหว่างแรงทางไฟฟ้าและแรงทางแม่เหล็ก ดังนั้นแล้วหากคิดถึงทิศทางกระแสสมมุติที่เกิดจากพาหะอิเล็กตรอน จะพิจารณาได้ว่ามีการเบี่ยงเบนไปในทิศที่ตรงข้ามกับพาหะอิเล็กตรอน ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นจึงทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสหรือกระแสส่วนที่เบี่ยงเบนขึ้นที่ขั้ว CC2 และ CC3 โดยการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยความแตกต่างของกระแสเราจะเรียกมันว่าเป็น “การทำงานในโหมดกระแส” การตอบสนองลักษณะนี้ให้ผลเป็นเชิงเส้นที่ขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับการทำงานในโหมดแรงดัน (รูปที่ 4.8)

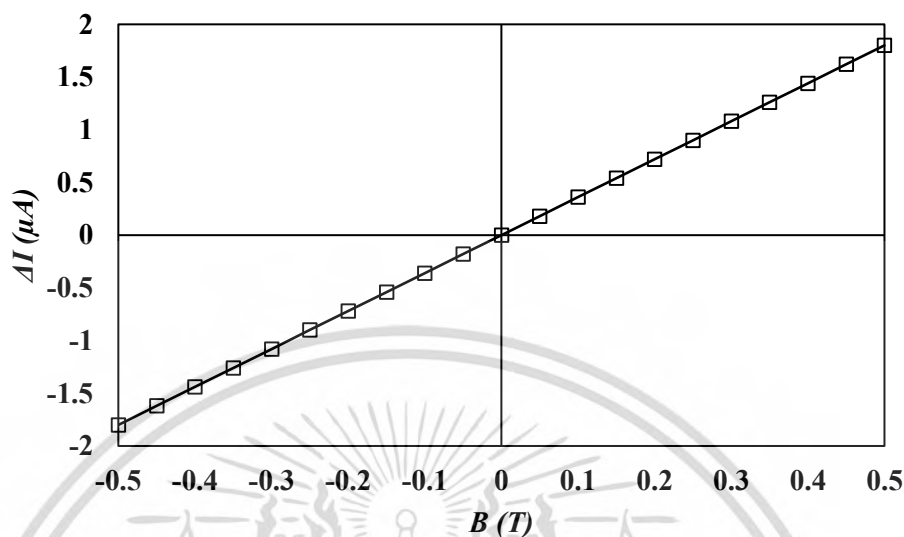


รูปที่ 4.7 แผนภาพการเกิดปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว

จากรูปที่ 4.8 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงแบบ 5 ขั้ว ที่ทำงานในโหมดกระแส หรืออาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสที่เกิดขึ้นบนแนวตั้งในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กนั้น มีลักษณะการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้น เหมือนกับอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสในแนวราบทั่ว ๆ ไป [75] ดังนั้นแล้วปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแนวตั้งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น จึงสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์เฉพาะที่อาศัยปรากฏการณ์นี้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีทิศในแนวขนานกับผิวได้อีกด้วย



รูปที่ 4.8 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ในโหมดกระแส

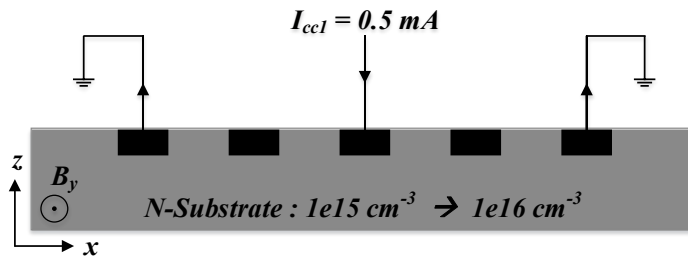
ผลการจำลองแบบข้างต้นทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแส เป็นผลการจำลองแบบของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีขนาดโครงสร้างตามรูปที่ 3.27 มีฐานรองความเข้มข้น  $1 \times 10^{16}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่ 0.5 มิลลิแอมป์ เข้าที่ขั้ว CC1 และมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วง 0 ถึง 0.5 เทสลา ในทิศ  $y$  และ  $-y$  ซึ่งเป็นทิศที่สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศของกระแสที่ไหลในอุปกรณ์ หรือก็คือทิศที่ท ให้ได้การตอบสนองสูงสุด

จากผลการจำลองแบบที่ได้เมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ผลการจำลองแบบชี้ให้เห็นชัดเจนว่านอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แล้วยังมีอีกปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นควบคู่กันด้วย นั่นก็คือปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส ดังนั้นการทำงานในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้งานเหมือนกับโหมดแรงดัน เพราะฉะนั้นแล้วการทดลองในหัวข้อต่อ ๆ ไปจะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจจะส่งผลต่อการท งานในโหมดกระแส

#### 4.2.1 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน

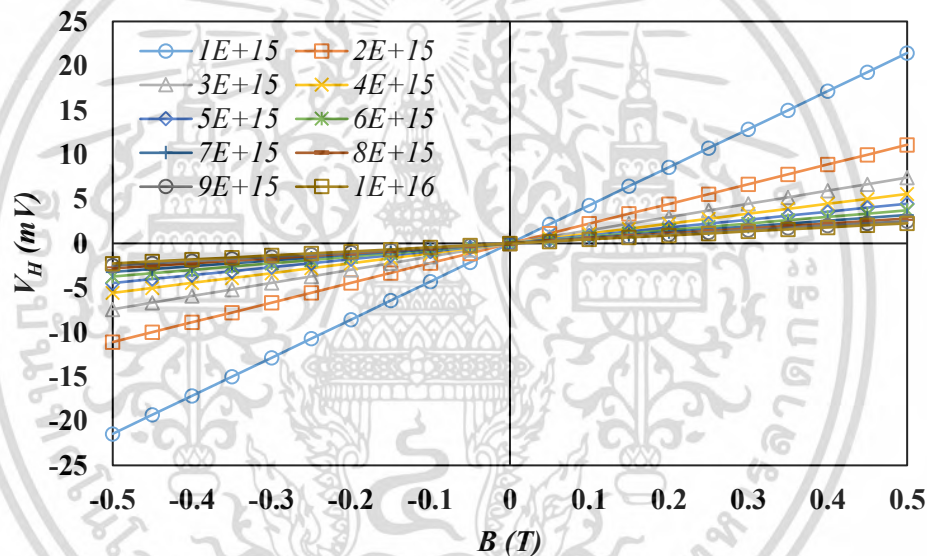
การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน จะทำการทดลองโดยใช้โครงสร้างอ้างอิงตามรูปที่ 3.27 และไบอัสกระแสคงที่ขนาด 0.5 มิลลิแอมป์ เข้าที่ขั้ว CC1 โดยตัวอุปกรณ์จะถูกจ สองภายใต้ความเข้มข้นแม่เหล็กตั้งแต่ 0 จนถึง 0.5 เทสลา ในทิศ  $y$  และ  $-y$  และตัวอุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฐานรองตั้งแต่  $1 \times 10^{15}$  จนถึง  $1 \times 10^{16}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แผนภาพขั้นตอนการจำลองแบบจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



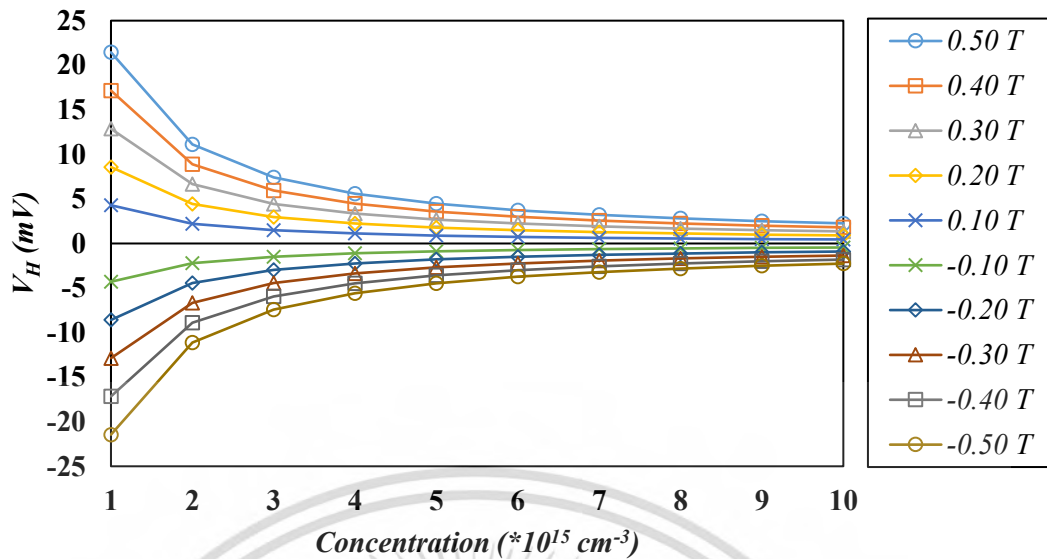
รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงการจ ทงแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีฐานรองความเข้มข้นตั้งแต่  $1 \times 10^{15}$  จนถึง  $1 \times 10^{16}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.10 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้มีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้นทั้งหมด ซึ่งเป็นไปตามสมการแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขนาดของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะแปรผันตรงกับขนาดของสนามแม่เหล็ก (สมการที่ (2.31)) หากเรานำค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ความเข้มข้นสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่าความเข้มข้นของฐานรองจะได้กราฟตามรูปที่ 4.11



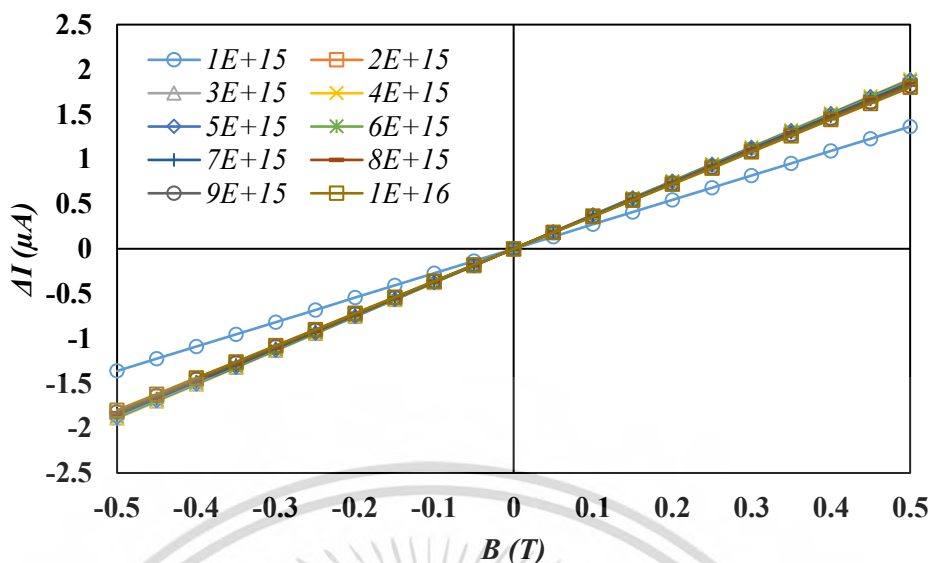
รูปที่ 4.11 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีฐานรองความเข้มข้นต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อฐานรองของตัวอุปกรณ์มีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นด้วย เมื่อความเข้มของฐานรองเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จำนวนพาหะในฐานรองเพิ่มขึ้น ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพาหะและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตามสมการ (2.31) ที่เป็นความสัมพันธ์แบบผกผัน จึงทำให้อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีความเข้มข้นของฐานรองสูงมีแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ลดลง ด้วยเหตุนี้ความไวในการตอบสนองสำหรับโหมดแรงดันจึงลดลงเมื่อความเข้มข้นของฐานรองสูงขึ้น (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน

Concentration (cm <sup>-3</sup> )	1e15	5e15	1e16
Current-Related Sensitivity of Voltage mode (V/AT)	85.78	17.87	9.04

สำหรับการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีฐานรองความเข้มข้นต่าง ๆ จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.12 และ 4.13

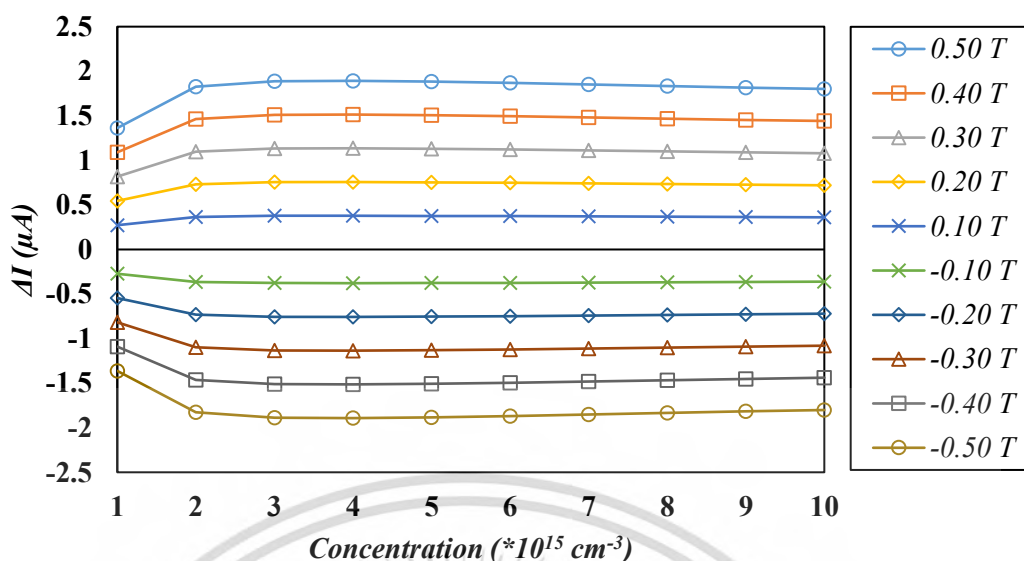


รูปที่ 4.12 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมตกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีฐานรองความเข้มข้นตั้งแต่  $1 \times 10^{15}$  จนถึง  $1 \times 10^{16}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมตกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกันในรูปที่ 4.12 ก็แสดงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นในลักษณะเดียวกับการตอบสนองในโหมตแรงดัน นั่นหมายความว่าความแตกต่างของกระแส ( $\Delta I$ ) เป็นตัวแปรที่แปรผันตรงตามขนาดของสนามแม่เหล็กเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ เมื่อนำค่าความแตกต่างของกระแสที่ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับความเข้มข้นของฐานรองจะได้กราฟตามรูปที่ 4.13

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมตกระแสที่ถูกพล็อตเทียบกับความเข้มข้นของฐานรองในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความแตกต่างของกระแสเมื่อฐานรองของอุปกรณ์มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ตรงข้ามกับการตอบสนองในโหมตแรงดัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างของกระแสเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงต่อจำนวนของพาหะในฐานรอง แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟเราจะพบว่าการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างกระแสจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของฐานรองจนถึงระดับหนึ่ง หลังจากนั้นความแตกต่างของกระแสจะเริ่มลดลง สำหรับผลที่เกิดขึ้นนั้นเราอาจพิจารณาได้ว่า อุปกรณ์ที่ทำงานด้วยโหมตกระแสจะมีค่าความเข้มข้นของฐานรองที่ส่งผลให้มีสภาพคล่องของพาหะที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อค่าความเข้มข้นของฐานรองเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งจะทำให้สภาพคล่องของพาหะลดลงจนถึงจุดที่ไม่ได้ส่งผลดีต่อการเกิดความแตกต่างกระแส หรืออาจพิจารณาได้อีกอย่างหนึ่งว่าในช่วงที่สภาพคล่องของพาหะมีการลดลงที่ไม่มาก สภาพคล่องของพาหะไม่ได้เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดความแตกต่างกระแส แต่เมื่อถึงช่วงที่สภาพคล่องของพาหะเกิดการลดลงอย่างมาก ตัวแปรสภาพคล่องของพาหะจะเริ่มส่งผลกระทบต่อเกิดความแตกต่างกระแส ดังนั้นตัวอุปกรณ์จึงมีช่วงที่ความแตกต่างกระแสเพิ่มขึ้นและลดลงดังรูป ถึงแม้ตัวอุปกรณ์จะมีช่วงที่ความแตกต่างของกระแสเพิ่มขึ้นและลดลง แต่หากมองภาพรวมของช่วงที่ทำการจำลองแบบ อุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้นสูงก็ยังมี การตอบสนองในโหมตกระแสที่ดีกว่าอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้นต่ำ ขยู่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ฐานรองความเข้มข้นต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

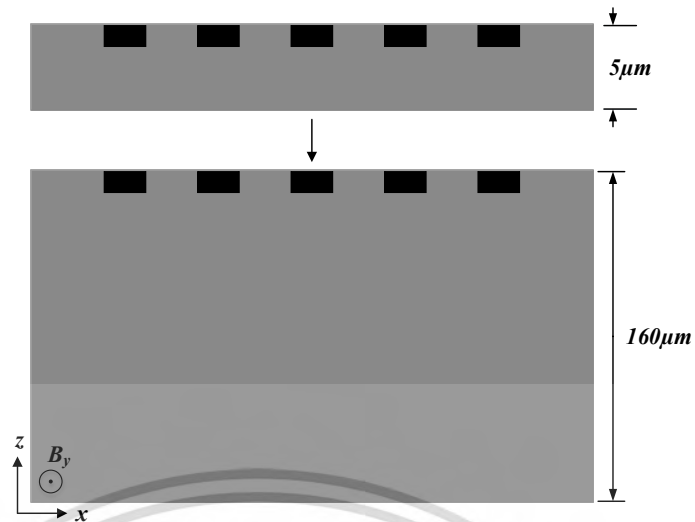
จากผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์ที่กล่าวมาทั้งหมดอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่เหมาะสมแก่การใช้งานในโหมดกระแสที่สุดจึงควรเป็นอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้นสูง โดยตัวอย่างค่าความไวในการตอบสนองของโหมดกระแสที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน

Concentration (cm <sup>-3</sup> )	1e15	5e15	1e16
Current-Related Sensitivity of Current mode (A/AT)	0.0055	0.0075	0.0072

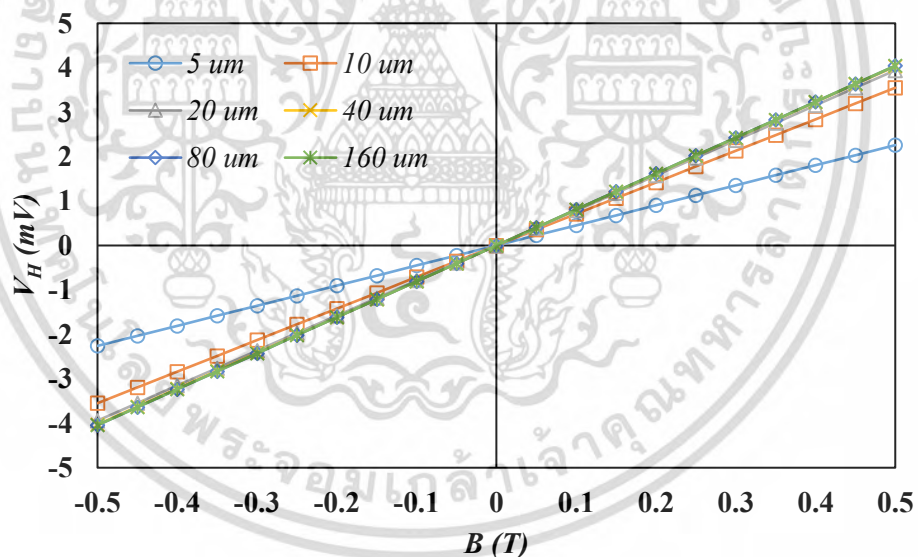
#### 4.2.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีความลึกแตกต่างกัน

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีความลึกแตกต่างกัน เราจะใช้โครงสร้างตามรูปที่ 3.27 และไบอัสกระแสคงที่ขนาด 0.5 มิลลิแอมป์ เข้าที่ขั้ว CC1 โดยตัวอุปกรณ์จะถูกจำลองภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 จนถึง 0.5 เทสลา ในทิศ y และ -y ตัวอุปกรณ์จะถูกกำหนดความเข้มข้นของฐานรองที่  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และจะทำการจำลองที่ความลึกตั้งแต่ 5 ไมโครเมตร จนถึง 160 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.14)



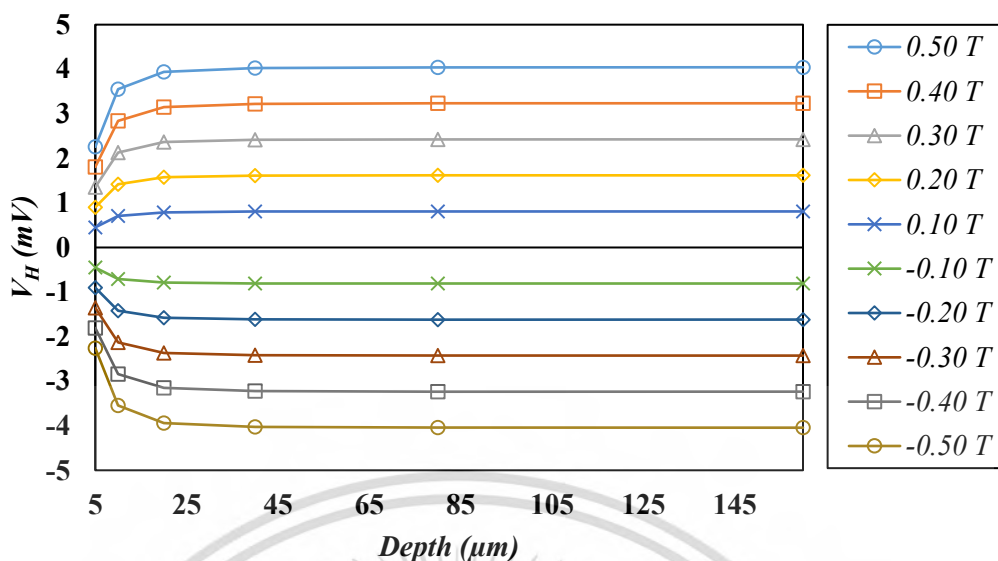
รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความลึกแตกต่างกัน

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีความลึกแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความลึกแตกต่างกัน

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความลึกแตกต่างกันแสดงการตอบสนองแบบเชิงเส้นที่เป็นไปตามสมการแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ทั้งหมด หากนำค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่าความลึกจะได้กราฟตามรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ความลึกต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

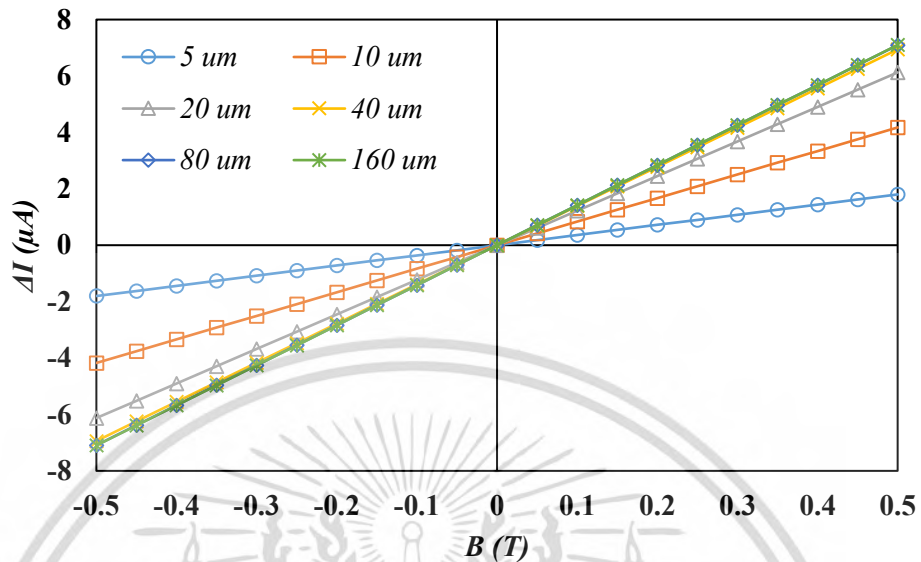
จากผลการจำลองแบบในโหมดแรงดันตามรูปที่ 4.15 และ 4.16 อุปกรณ์ที่มีความลึกของฐานรองมากจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่มากตามไปด้วย โดยการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ขึ้นกับความลึกนั้นอาจพิจารณาได้ว่า เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (active area) มากขึ้นไปด้วย หรืออาจมองได้ว่าความลึกเปรียบเสมือนระยะห่างระหว่างบริเวณที่มีการสะสมประจุในกรณีของตัวเก็บประจุ ดังนั้นตามความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นตัวเก็บประจุ ( $\Delta V = Qd/\epsilon A$ ) เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีการสะสมประจุระหว่างบริเวณผิวบนและผิวล่างของอุปกรณ์จึงมีความลึกที่เป็นตัวแทนระยะห่างระหว่างแผ่นของตัวเก็บประจุ ด้วยเหตุผลนี้เมื่อความลึกของอุปกรณ์มากขึ้นจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเพิ่มมากขึ้นไป ด้วย การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตามความลึกนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วง 5 ถึง 45 ไมโครเมตร หลังจากนั้นจะเริ่มอิ่มตัว โดยความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันที่ขึ้นกับความลึกจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกัน

Depth ( $\mu\text{m}$ )	5	10	20	40	80	160
Current-Related Sensitivity of Voltage mode (V/AT)	9.04	14.19	15.76	16.12	16.17	16.18

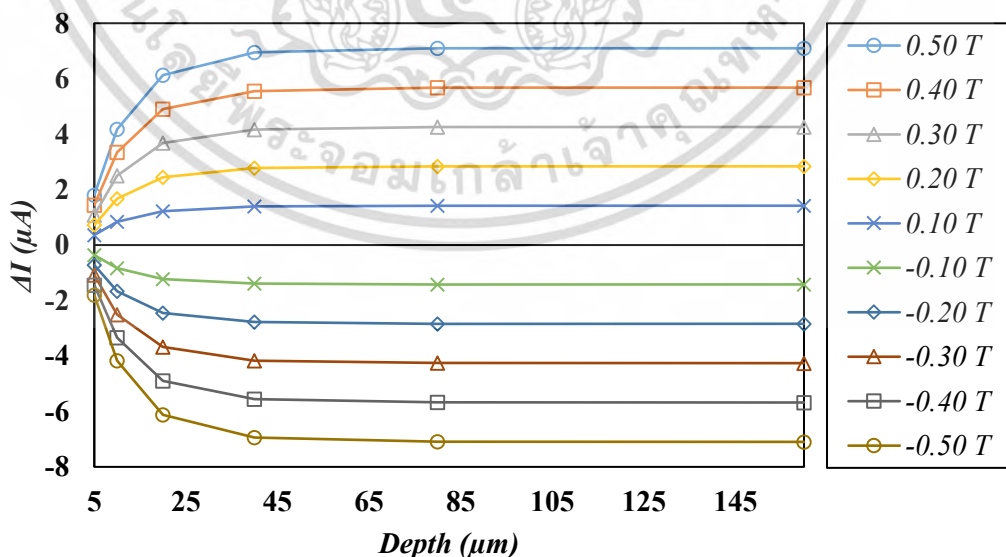
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหนดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหนดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกัน

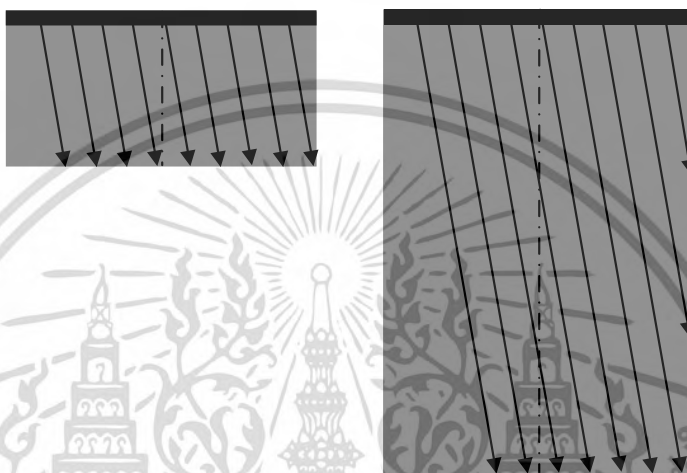
การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหนดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกันตามรูปที่ 4.17 ก็แสดงการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ หากนำค่าความแตกต่างของกระแสที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับค่าความลึก จะได้กราฟตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหนดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่ความลึกค่าต่าง ๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับการตอบสนองในโหมดแรงดัน โดยค่าความแตกต่างของกระแสจะมีการเปลี่ยนแปลงสูงในช่วง 5 ถึง 45 ไมโครเมตร หลังจากนั้นค่าความแตกต่างของกระแสจะเริ่มเข้าสู่ค่าอิมิตัวค่าหนึ่ง หากพิจารณาจากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าตัวแปรความลึกเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานในโหมดกระแส เมื่อความลึกของฐานรองอุปกรณ์เพิ่มขึ้นค่าความแตกต่างของกระแสก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเราสามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของกระแสที่ขึ้นกับความลึกได้ตามแผนภาพในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แผนภาพแสดงการเกิดกระแสเบี่ยงเบนในอุปกรณ์ที่มีฐานรองพื้นและลึก

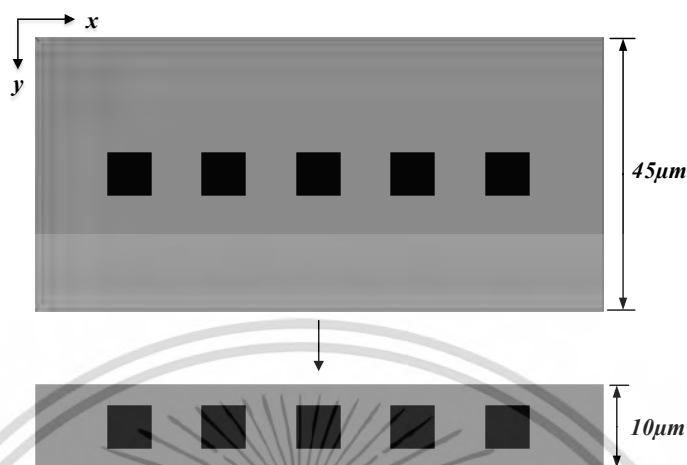
จากแผนภาพในรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาถึงกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนจากแรงลอเรนซ์บริเวณใต้ขั้วไบอัส CC1 จะพบว่า อุปกรณ์ที่มีฐานรองลึกจะมีระยะด้านข้างมากกว่าอุปกรณ์ที่มีลักษณะตื้น จึงส่งผลให้กระแสเบี่ยงเบนมีโอกาที่จะเบี่ยงไปอีกฝั่งมากกว่า ในขณะที่อุปกรณ์ที่มีฐานรองตื้นจะจำกัดระยะด้านข้างส่งผลให้กระแสเบี่ยงเบนส่วนหนึ่งไม่สามารถเบี่ยงไปอีกฝั่งได้จึงทำให้มีความแตกต่างกระแสน้อย เพราะฉะนั้นแล้วอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่จะทำงานในโหมดกระแสได้มีประสิทธิภาพที่สุดควรมีฐานรองที่ลึก ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสที่ขึ้นกับความลึกจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความลึกแตกต่างกัน

Depth (μm)	5	10	20	40	80	160
Current-Related Sensitivity of Current mode (A/AT)	0.0072	0.0167	0.0245	0.0278	0.0284	0.0284

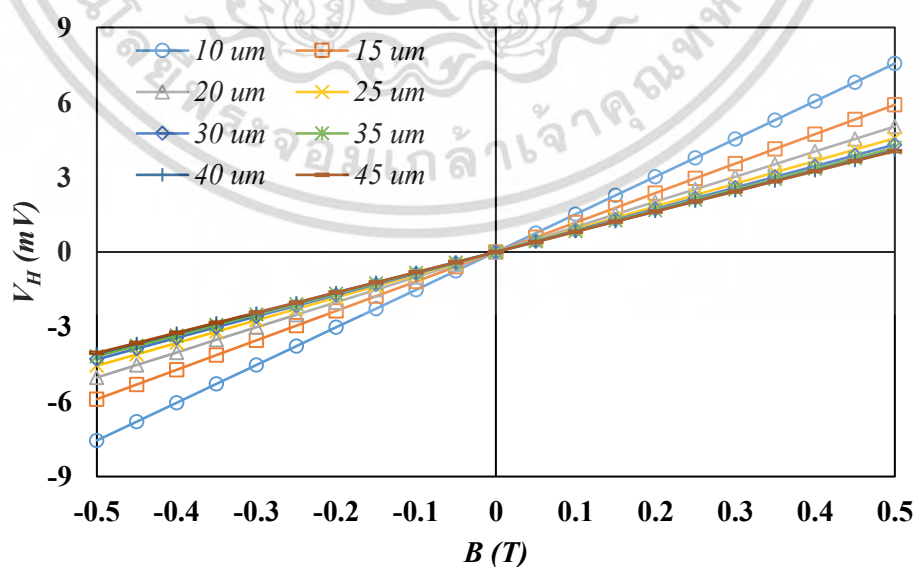
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีความกว้างแตกต่างกัน



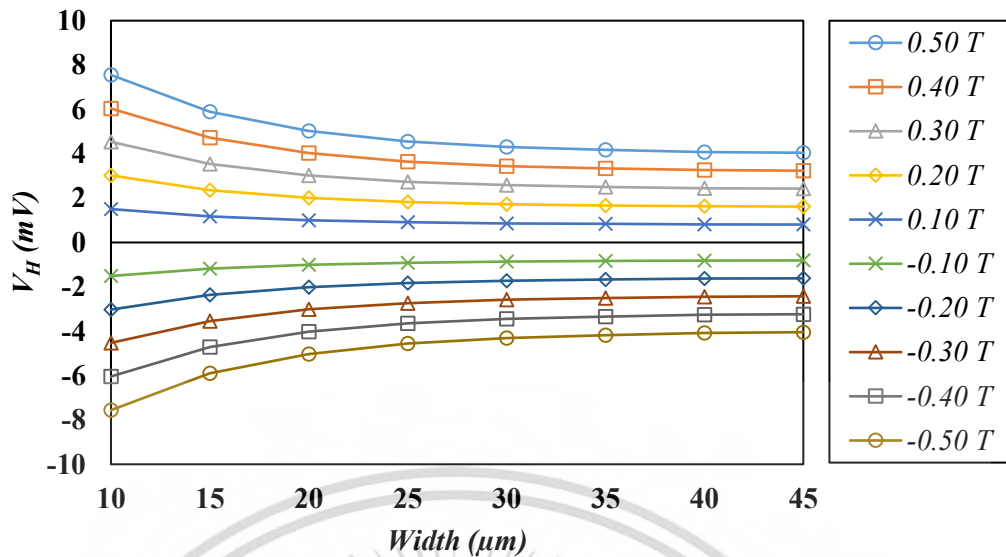
รูปที่ 4.20 แผนภาพแสดงการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีความกว้างแตกต่างกัน

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีความกว้างแตกต่างกัน เราจะทำการจำลองแบบภายใต้เงื่อนไขการไบอัสกระแสแรงแรงที่ขนาด 0.5 มิลลิแอมป์ เข้าที่ขั้ว CC1 โดยตัวอุปกรณ์จะถูกจำลองภายใต้ความเข้มข้นของฐานร่องที่  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และจะทำการจำลองโดยใช้โครงสร้างอ้างอิงตามรูปที่ 3.27 แต่กำหนดความลึกให้เท่ากับ 160 ไมโครเมตร จากนั้นจะลดความกว้างจาก 45 ไมโครเมตร ลงจนถึง 10 ไมโครเมตร (รูปที่ 4.20) โดยผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.21 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีความกว้างแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ขนาดความกว้างค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

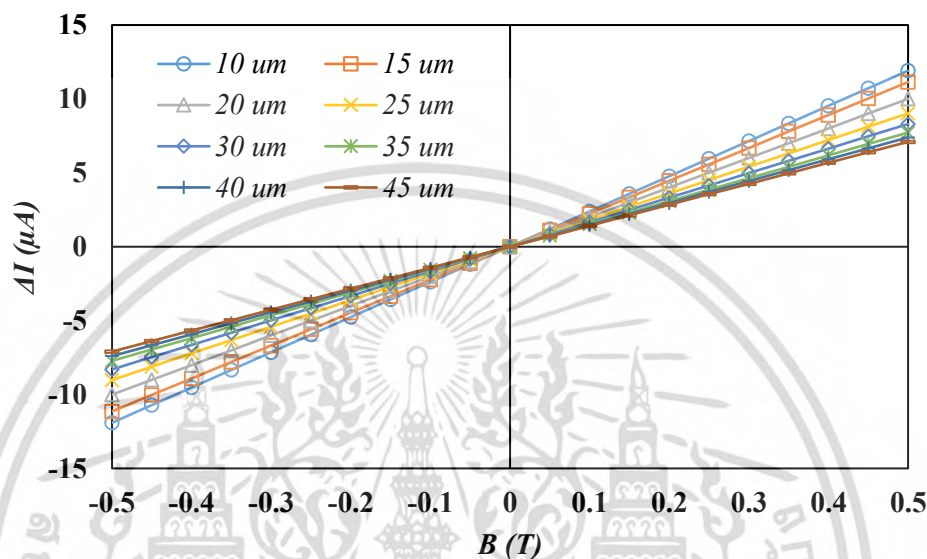
การตอบสนองของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งในโหมดแรงดันที่มีความกว้างตั้งแต่ 10 จนถึง 45 ไมโครเมตร จะแสดงการตอบสนองอย่างเป็นเชิงเส้น และเมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ มาพล็อตเทียบกับขนาดความกว้างของฐานรองจะได้กราฟตามรูปที่ 4.22 ซึ่งจากกราฟแสดงการลดลงของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อความกว้างเพิ่มมากขึ้น ความกว้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นความหนาของแผ่นฮอลล์ เนื่องจากตัวอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่พัฒนามาจากโครงสร้างของแผ่นฮอลล์ ดังนั้นตามสมการแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ในสมการที่ (2.31) เมื่อความหนาของแผ่นฮอลล์เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ลดลง เพราะเหตุนี้อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งซึ่งมีความหนาหรือความกว้างของตัวอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ลดลง นอกจากผลตามสมการแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ข้างต้นแล้ว เรายังสามารถอธิบายได้อีกรูปแบบหนึ่งว่าเมื่อความกว้างของอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการสะสมประจุพาหะ ดังนั้นจากความสัมพันธ์  $\Delta V = Qd/\epsilon A$  การเพิ่มพื้นที่ในการสะสมประจุพาหะ  $A$  จะทำให้ความต่างศักย์มีค่าลดลง โดยตัวอย่างค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันที่ขึ้นกับความกว้างของอุปกรณ์จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความกว้างแตกต่างกัน

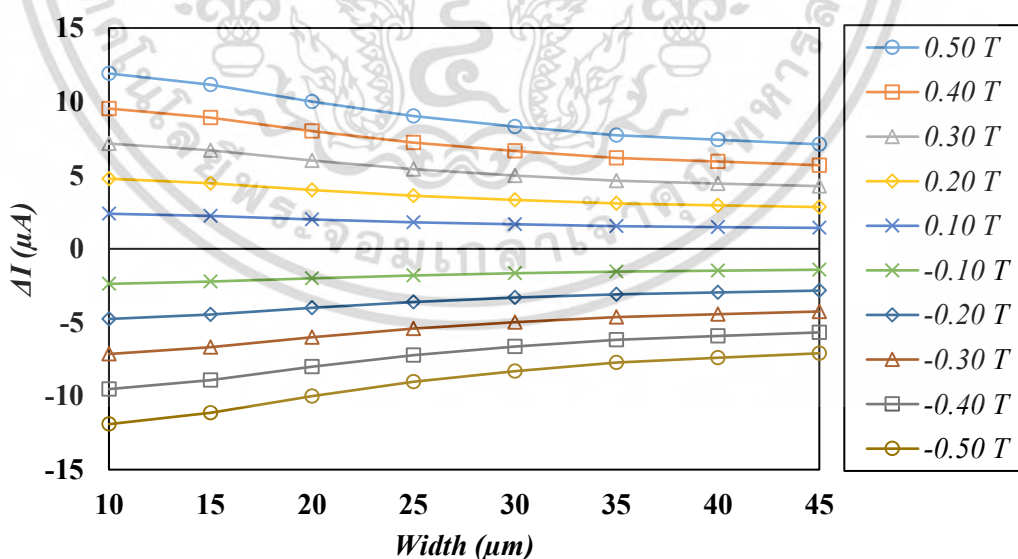
Width (μm)	10	15	25	35	45
Current-Related Sensitivity of Voltage mode (V/AT)	30.21	23.59	18.23	16.71	16.18

สำหรับผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความกว้างแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.23 และ 4.24

ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างกระแสที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นการตอบสนองแบบเชิงเส้นทั้งหมด (รูปที่ 4.23) หากนำค่าความแตกต่างกระแสมาพล็อตเทียบกับค่าความกว้างของตัวอุปกรณ์จะได้กราฟดังรูปที่ 4.24

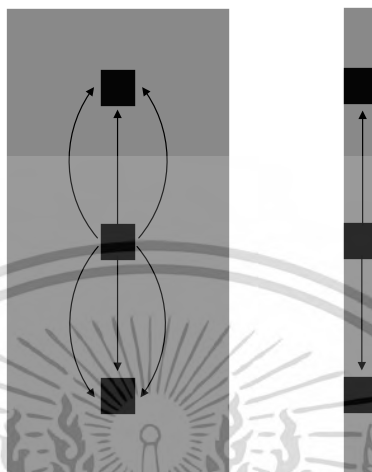


รูปที่ 4.23 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่มีความกว้างแตกต่างกัน



รูปที่ 4.24 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่ขนาดความกว้างค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

จากรูปที่ 4.24 เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าค่าความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับขนาดความกว้างของอุปกรณ์ กล่าวคืออุปกรณ์ที่มีความกว้างมากจะมีค่าความแตกต่างของกระแสมากขึ้น (รูปที่ 4.24) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างกระแสที่ขึ้นกับค่าความกว้างของอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แผนภาพแสดงการแพร่กระจายของกระแสระหว่างอุปกรณ์ที่มีความกว้างแตกต่างกัน

จากผลการจำลองแบบข้างต้นและแผนภาพในรูปที่ 4.25 สามารถอธิบายได้ว่าอุปกรณ์ที่มีลักษณะแคบหรือมีความกว้างน้อยจะทำให้การแพร่กระจายกระแสไปยังด้านข้างทำได้ไม่ดีนัก เทียบกับอุปกรณ์ที่ค่อนข้างกว้างซึ่งสามารถให้กระแสแพร่กระจายไปยังด้านข้างได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นอุปกรณ์ที่มีลักษณะแคบจึงมีการบังคับแนวการกระจายตัวของกระแสให้กระจายตัวลงไปตามแนวความลึกมากกว่า จึงส่งผลให้มีการตอบสนองที่ดีกว่า นั่นหมายความว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่จะใช้การทางานในโหมดกระแสควรจะมีการออกแบบให้มีความกว้างน้อยที่สุด เพื่อให้ได้การตอบสนองที่ดีที่สุด โดยค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโหมดกระแสของอุปกรณ์ที่มีความกว้างแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.6

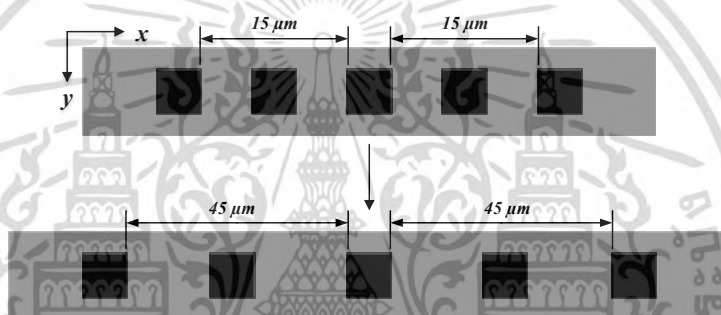
ตารางที่ 4.6 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีความกว้างแตกต่างกัน

Width ( $\mu\text{m}$ )	10	15	25	35	45
Current-Related Sensitivity of Current mode (A/AT)	0.0476	0.0446	0.0361	0.0309	0.0284

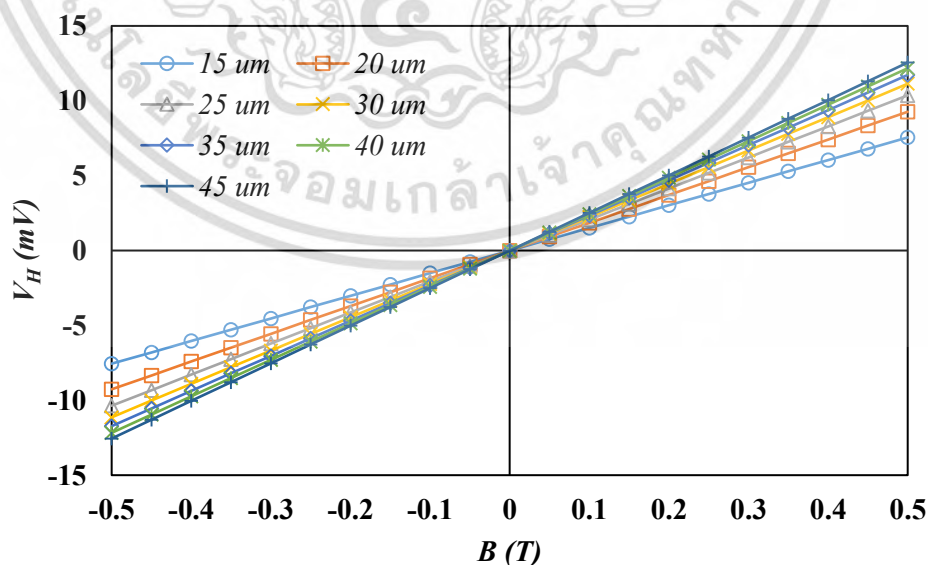
#### 4.2.4 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ (CC1, CC2, CC3) แตกต่างกัน

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกันนั้น เราจะทำการจำลองแบบโดยใช้ตัวอุปกรณ์ที่มีฐานรองความเข้มข้น  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และใช้โครงสร้างตามรูปที่ 3.27 แต่กำหนดความกว้างของอุปกรณ์เท่ากับ 10 ไมโครเมตร และความลึกเท่ากับ 160 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการท ขานในโหมดกระแส (ผลจากการจำลองก่อนหน้านี้)

ตามโครงสร้างอ้างอิงในรูปที่ 3.27 ระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ (ขั้ว CC1-CC2 และ CC1-CC3) จะมีค่าเท่ากับ 15 ไมโครเมตร เราจะทำการเพิ่มระยะดังกล่าวไปจนถึง 45 ไมโครเมตร โดยยังคงตำแหน่งขั้วรับรู้ที่อยู่ระหว่างขั้วไบอัสกระแสและกราวด์ให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขั้วทั้งสองไว้เหมือนเดิม (ดังแสดงในรูปที่ 4.26) ซึ่งจะจำลองแบบภายใต้เงื่อนไขการไบอัสกระแสคงที่ ขนาด 0.5 มิลลิแอมป์ และให้สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 จนถึง 0.5 เทสลา ในทิศ  $y$  และ  $-y$



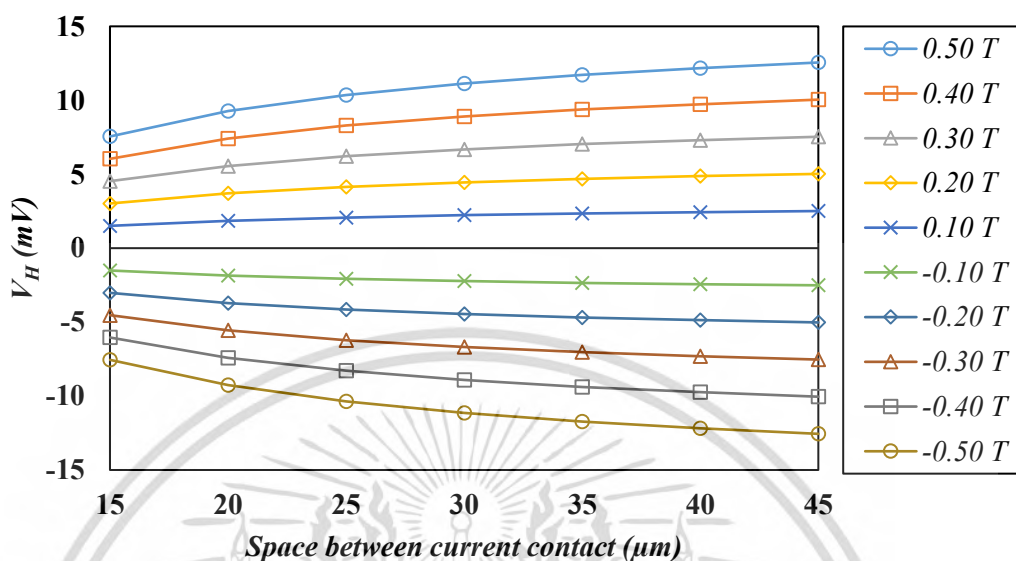
รูปที่ 4.26 แผนภาพแสดงการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.27 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.27 และ 4.28



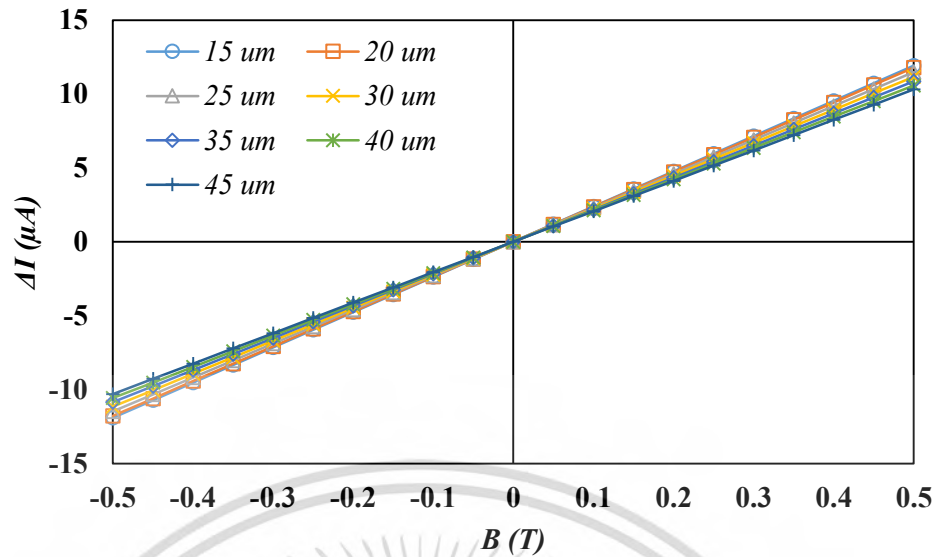
รูปที่ 4.28 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

จากผลการจำลองแบบของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะการตอบสนองแบบเชิงเส้นและแปรผันตรงต่อระยะห่างระหว่างขั้ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและขั้วกราวด์เปรียบเสมือนการเพิ่มความยาวของแผ่นฮอลล์ส่งผลให้ประจุพาหะมีระยะในการสะสมประจุมากขึ้น จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้มีค่ามากขึ้นตาม โดยตัวอย่างค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ค่าแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.7

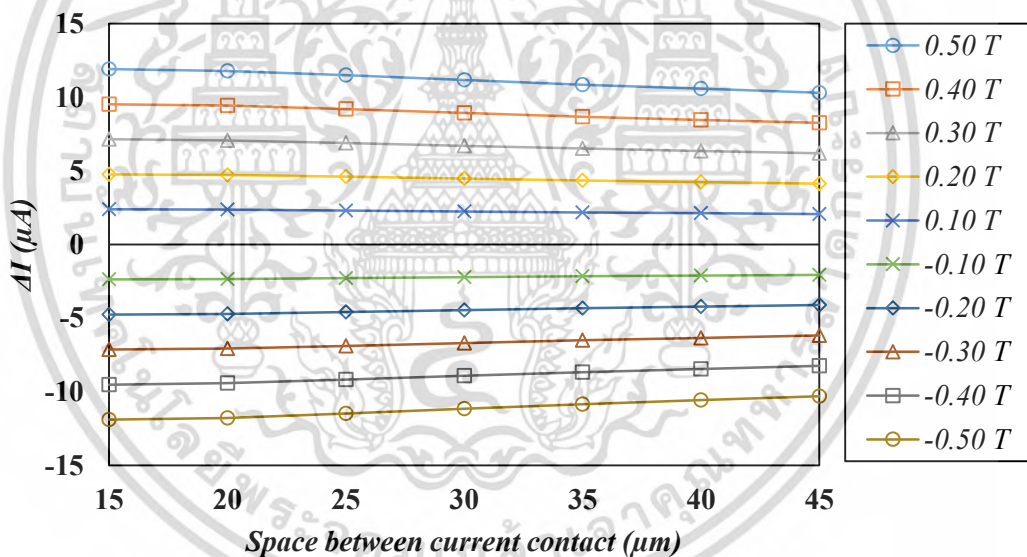
ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ต่างกัน

Current Electrode Spacing ( $\mu\text{m}$ )	15	25	35	45
Current-Related Sensitivity of Voltage mode (V/AT)	30.21	41.44	46.90	50.22

สำหรับผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.29 และ 4.30

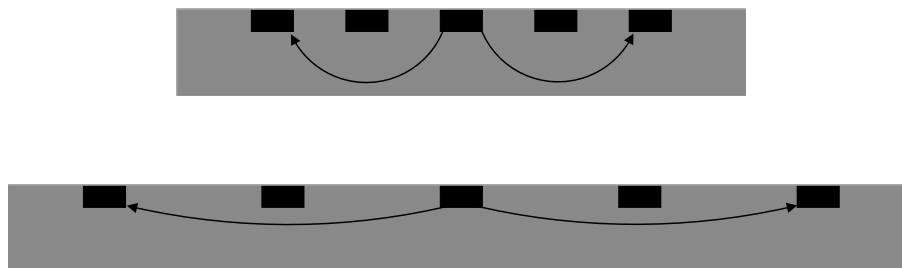


รูปที่ 4.29 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

การตอบสนองในโหมดกระแสสำหรับอุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ค่าแตกต่างกันมีการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นทั้งหมดและค่าความแตกต่างกระแสที่ได้จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างมีค่ามากขึ้น ซึ่งลักษณะการตอบสนองมีลักษณะตรงกันข้ามกับการทำงานในโหมดแรงดัน (รูปที่ 4.28) การลดลงของความแตกต่างของกระแสเมื่อมีการเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แผนภาพแสดงลักษณะการกระจายตัวของกระแสในอุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์แตกต่างกัน

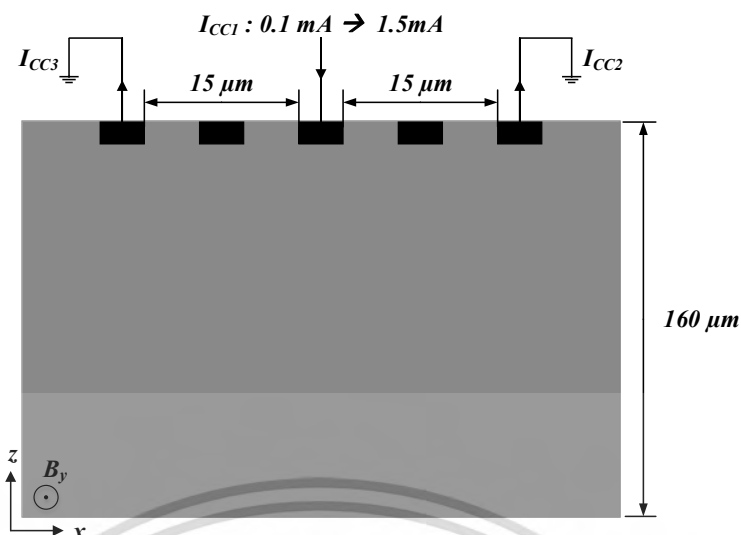
จากรูปที่ 4.31 อุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วกระแสมากจะส่งผลให้กระแสไหลในระดับต่ำกว่าอุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วกระแสย่อย จึงส่งผลให้กระแสที่ไหลในแนวตั้งมีระยะในการเบี่ยงเบนที่น้อยไปด้วย ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์ที่มีระยะระหว่างขั้วมากจะมีการตอบสนองได้แก่กว่าอุปกรณ์ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วน้อย หรือเราอาจพิจารณาได้อีกอย่างว่าโครงสร้างของอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแสจะออกแบบให้มีระยะการเบี่ยงเบนหรือความยาวของอุปกรณ์ให้มีค่าน้อย ๆ เพื่อลดการเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงต้านการเบี่ยงเบนจากสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการออกแบบให้ตัวอุปกรณ์มีความยาวหรือระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ให้มีค่าน้อย ๆ จึงเหมาะสมต่อการทำงานในโหมดกระแสที่สุด ตัวอย่างค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสำหรับโหมดกระแสจะแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ต่างกัน

Current Electrode Spacing ( $\mu\text{m}$ )	15	25	35	45
Current-Related Sensitivity of Current mode (A/AT)	0.0476	0.0460	0.0434	0.0412

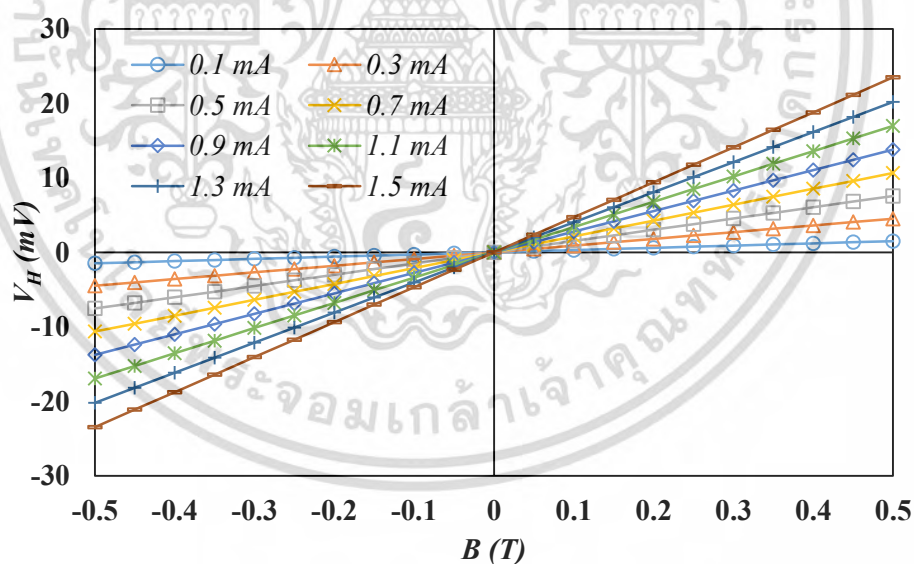
#### 4.2.5 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน

การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่ค่าแตกต่างกันจะใช้โครงสร้างที่ถูกกำหนดความเข้มข้นของฐานรองเท่ากับ  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และมีความกว้างเท่ากับ 10 ไมโครเมตร ระยะระหว่างขั้วไบอัสและกราวด์ 15 ไมโครเมตร ความลึกเท่ากับ 160 ไมโครเมตร โครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่มีการตอบสนองดีที่สุดโหมดกระแส ซึ่งได้มาจากการจำลองก่อนหน้า ตัวอุปกรณ์จะถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่ตั้งแต่ 0.1 จนถึง 1.5 มิลลิแอมแปร์ เข้าที่ขั้ว CC1 ภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา ในทิศ  $y$  และ  $-y$

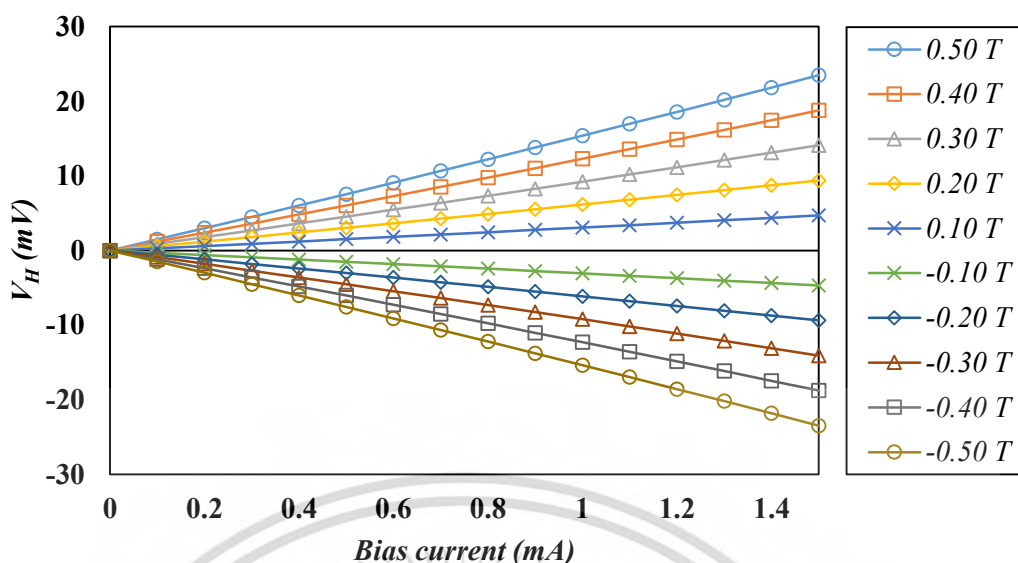


รูปที่ 4.32 แผนภาพแสดงการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกันจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.33 และค่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่สนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ถูกพล็อตเทียบกับค่ากระแสไบอัสจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน



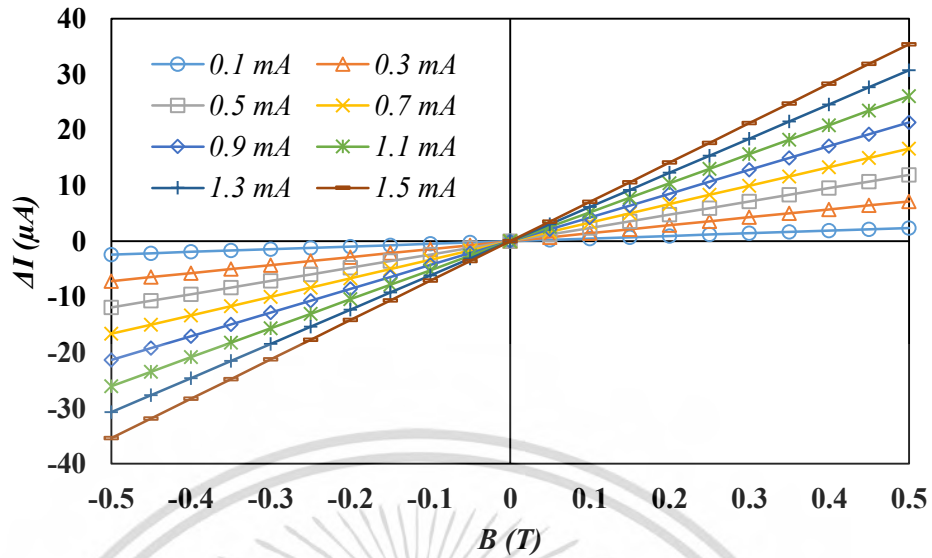
รูปที่ 4.34 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

ผลการจำลองแบบในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ มีการตอบสนองแบบเชิงเส้นทั้งหมด และมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เมื่อตัวอุปกรณ์ถูกไบอัสด้วยกระแสที่มากขึ้น การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ขึ้นกับกระแสนั้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของกระแสไบอัสและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ตามสมการที่ (2.31) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงต่อกัน โดยการเพิ่มขนาดกระแสไบอัสที่มากขึ้นจะส่งผลให้พาหะในอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้การสะสมพาหะมีปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นมีค่าที่สูง ตัวอย่างค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.9

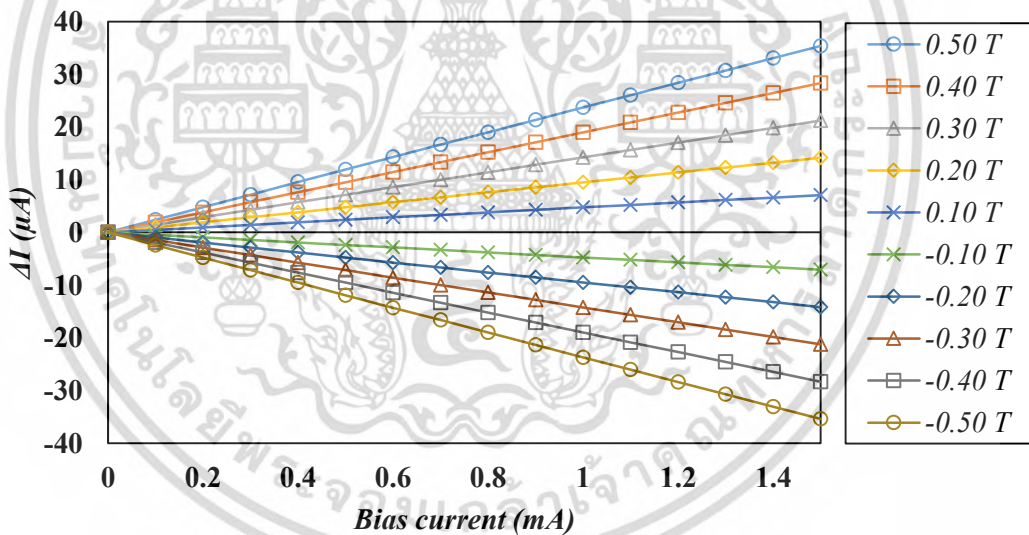
ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน

Bias Current (mA)	0.1	0.5	1.0	1.5
Current-Related Sensitivity of Voltage mode (V/AT)	29.84	30.21	30.74	31.30

สำหรับผลการจำลองการทำงานในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.35 และ 4.36



รูปที่ 4.35 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.36 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าต่าง ๆ ณ ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา

จากการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกันมีการตอบสนองเหมือนกับในโหมดแรงดันคือ การตอบสนองเป็นเชิงเส้นและมีการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างกระแสเมื่อเพิ่มกระแสไบอัส การเพิ่มขึ้นของความแตกต่างกระแสที่ขึ้นกับปริมาณกระแสไบอัสอาจอธิบายได้ว่า สัดส่วนในการเกิดความแตกต่างของกระแสจะขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดมุมเบี่ยงเบนค่าหนึ่ง ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวจะมีค่าคงเดิมแม้เราจะเพิ่มปริมาณกระแสให้มากขึ้น ดังนั้นด้วยสัดส่วนความแตกต่างของกระแสที่คงที่จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

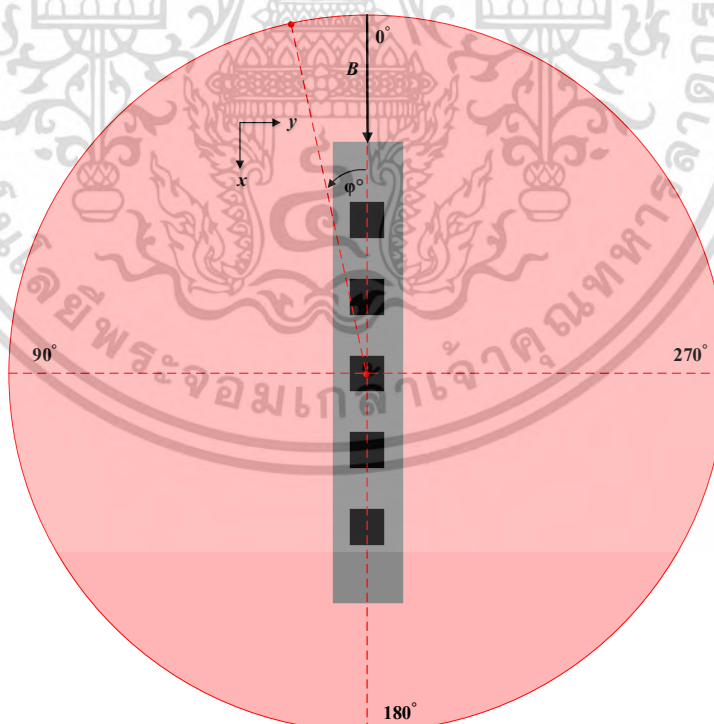
ท ให้ความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มตามปริมาณกระแสไบอัสโดยตรง ตัวอย่างค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสจะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ตัวอย่างความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ถูกไบอัสด้วยกระแสค่าแตกต่างกัน

Bias Current (mA)	0.1	0.5	1.0	1.5
Current-Related Sensitivity of Current mode (A/AT)	0.0478	0.0476	0.0474	0.0472

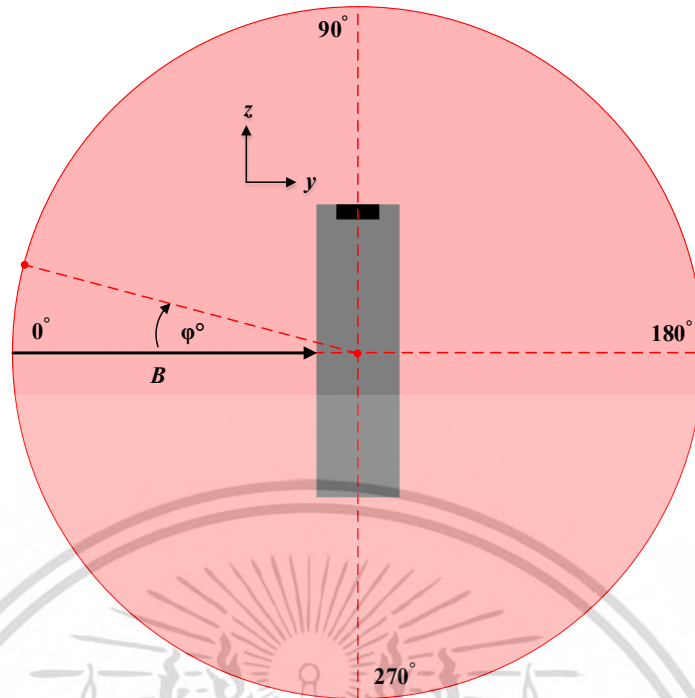
**4.2.6 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ทำมุมค่าต่าง ๆ ต่ออุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว**

การจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ทำมุมค่าต่าง ๆ เราจะใช้โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่มีการตอบสนองในโหมดกระแสดีที่สุดใน การจำลองแบบตัวอุปกรณ์จะถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่ขนาด 0.5 มิลลิแอมป์ และให้สนามแม่เหล็กขนาด 0.25 และ 0.5 เทสลา โดยทำมุมตั้งแต่ 0 องศา จนถึง 360 องศา ในระนาบ x-y และ y-z



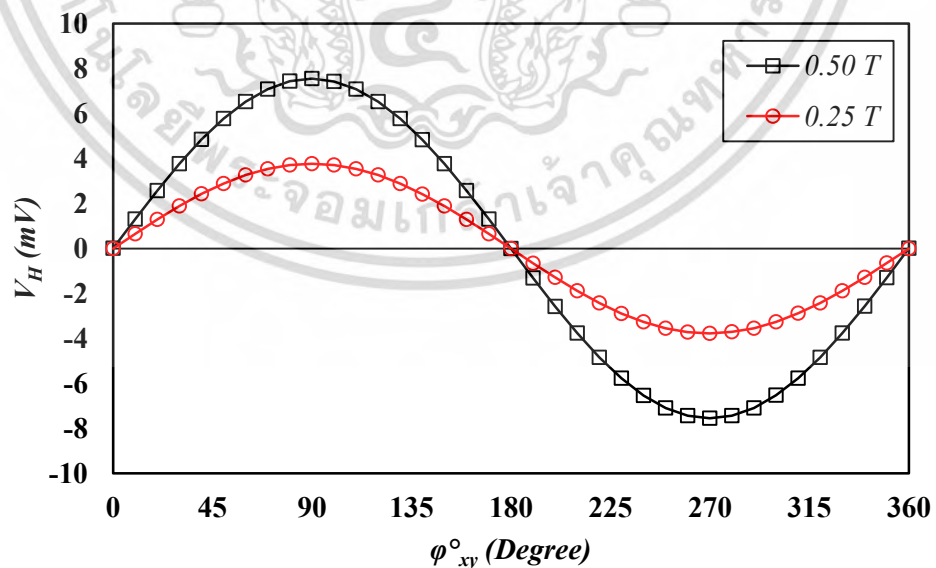
**รูปที่ 4.37** แผนภาพแสดงการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ทำมุมแตกต่างกันในระนาบ x-y ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



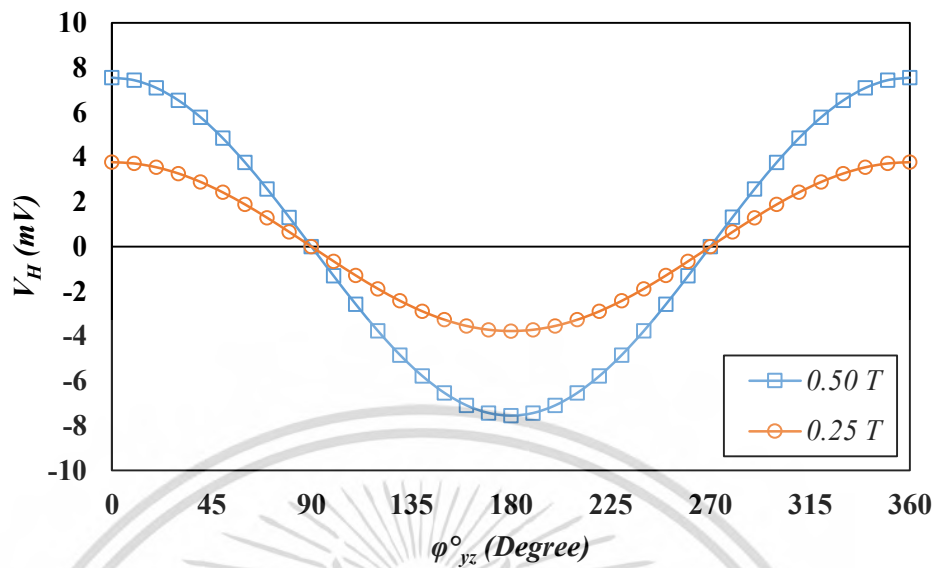
รูปที่ 4.38 แผนภาพแสดงการจาลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ทามุมแตกต่างกันในระนาบ  $y$ - $z$  ของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว

ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ทามุมต่าง ๆ บนระนาบ  $x$ - $y$  และ  $y$ - $z$  จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.39 และ 4.40



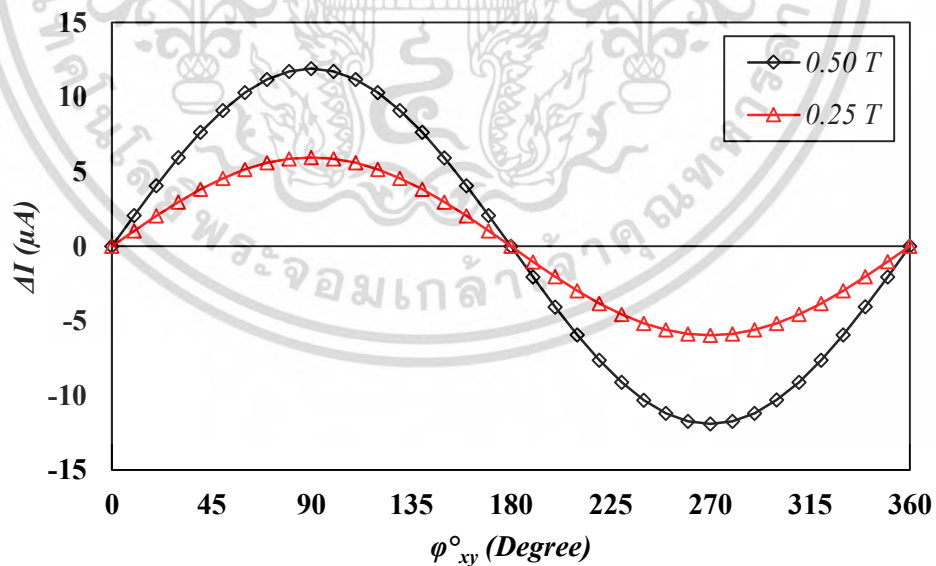
รูปที่ 4.39 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ทามุมต่าง ๆ บนระนาบ  $x$ - $y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

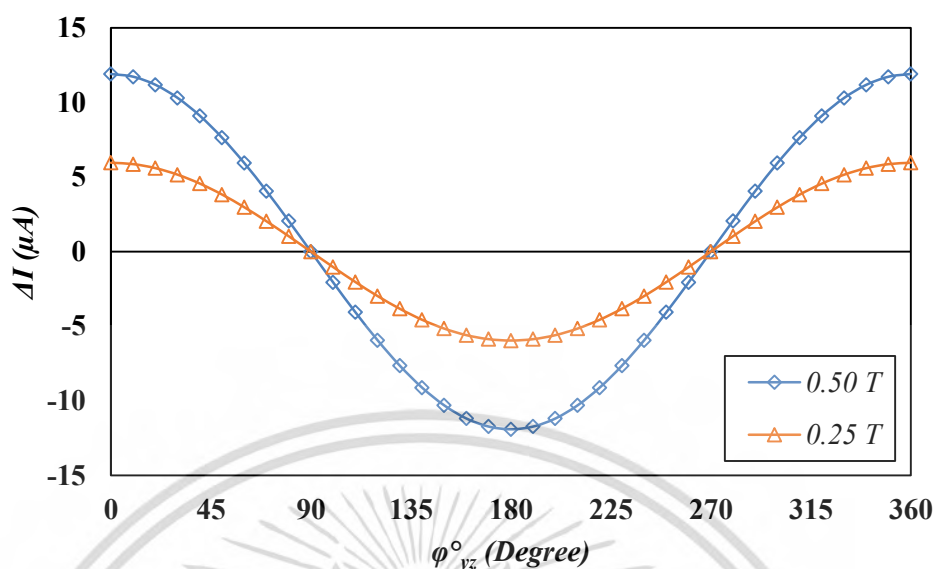


รูปที่ 4.40 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ท มุมต่าง ๆ บนระนาบ y-z

ส่วนผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ท มุมต่าง ๆ บนระนาบ x-y และ y-z จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.41 และ 4.42



รูปที่ 4.41 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ท มุมต่าง ๆ บนระนาบ x-y



รูปที่ 4.42 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่ท มุมต่าง ๆ บนระนาบ y-z

จากผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ทำมุมแตกต่างกันในระนาบ x-y และ y-z ทั้งในโหมดแรงดันและกระแส พบว่าอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดทั้งสองมีการตอบสนองในลักษณะเดียวกัน โดยมีการตอบสนองดีที่สุดเมื่อสนามแม่เหล็กทำมุม 90 และ 270 องศา ในระนาบ x-y และ 0, 180 และ 360 องศา ในระนาบ y-z ซึ่งมุมดังกล่าวในระนาบทั้งสองเป็นมุมที่สนามแม่เหล็กกระทำต่อตัวอุปกรณ์ตามแนวแกน y หรือก็คือมุมที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางของกระแส หากพิจารณาในรูปความเร็วของพาหะมุกที่กล่าวไปทั้งหมดนั้น จะเป็นมุมที่ทำให้ cross product ของเวกเตอร์ความเร็วและเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก มีค่าสูงสุดนั่นก็คือ

$$[\vec{v} \times \vec{B}] = |v||B|\sin\theta_{\perp} = |v||B| \quad (4.3)$$

เมื่อ  $\theta_{\perp}$  เป็นมุมที่เวกเตอร์ของความเร็วตั้งฉากกับเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 90 องศา

ดังนั้นจะท ให้แรงลอเรนซ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ

$$F_L = qE + q[|v||B|\sin\theta] = qE + qvB \quad (4.4)$$

ด้วยแรงทางแม่เหล็กที่มีค่าสูงสุด จะทำให้แรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่อุปกรณ์ฮอลล์ต้องสร้างเพื่อไปหักล้างกับแรงทางแม่เหล็กต้องมีค่าสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ได้สนามไฟฟ้าฮอลล์มีความเข้มสูงสุด ผลของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่ได้ในโหมดแรงดันจึงมีค่าสูงสุด ตามมุมที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากพอดีกับทิศของกระแสหรือความเร็ว ในกรณีของโหมดกระแสก็เช่นเดียวกัน มุมของสนามแม่เหล็กที่ทำให้ได้แรงลอเรนซ์สูงสุดจะส่งผลให้เกิดกระแสเบี่ยงเบนได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการจำลองแบบการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ทำงานในโหมดแรงดันและโหมดกระแส โดยเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ในโหมดกระแสเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กและเพื่อนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแนวตั้ง โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นหลัก แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจจับอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งอาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสเป็นเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก การวิจัยทั้งหมดนั้นจะกระทำภายใต้การจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD เพื่อเป็นการไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและลดระยะเวลาในการศึกษา จากผลการจำลองที่กล่าวมาทั้งหมดในบทก่อนหน้านี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว โดยทั่วไปแล้วจะใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งปรากฏการณ์ฮอลล์จะทำให้เกิดการสะสมประจุพาหะบริเวณขั้วรับรู้อยู่สองที่วางอยู่ระหว่างขั้วกระแส ดังนั้นตัวอุปกรณ์จึงสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการสะสมของประจุพาหะได้ที่ขั้วดังกล่าว แต่จากการจำลองแบบพบว่าเมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แล้ว ยังมีปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเกิดขึ้นมาด้วย โดยผลของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสระหว่างขั้วกระแสที่หน้าขั้วป้อนกราวด์ ซึ่งการตอบสนองทั้งสองรูปแบบมีลักษณะการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นต่อสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจากสมมติฐานทางโครงสร้างที่ตั้งไว้ว่า ผลของการเบี่ยงขั้วกระแสในอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้ว ที่ทำให้มีขั้วกระแสสามขั้วเหมือนอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแส ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสขึ้นและสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้จริงตามสมมติฐานดังกล่าว

จากบทสรุปข้างต้น จะเรียกการทำงานโดยใช้อุปกรณ์ฮอลล์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กว่าการทำงานในโหมดแรงดัน ส่วนการใช้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก จะถูกเรียกว่าการทำงานในโหมดกระแส

2. อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีฐานรองความเข้มข้นแตกต่างกัน แสดงการตอบสนองในโหมดกระแสและโหมดแรงดันเป็นเชิงเส้นทั้งหมด แต่มีการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นที่ต่างกัน กล่าวคือ การทำงานในโหมดแรงดันจะมีการตอบสนองที่แย่งเมื่อความเข้มข้นของฐานรองเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันการทำงานในโหมดกระแสมีแนวโน้มในการตอบสนองที่ดีขึ้น ดังนั้นแล้วอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดกระแสควรจะมีฐานรองความเข้มข้นค่าสูง ๆ ซึ่งจากการจำลองแบบอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นฐานรองที่เหมาะสมต่อการทำงานในโหมดแรงดันควรมีค่าความเข้มข้นของฐานรองเท่ากับ  $1 \times 10^{15}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนโหมดกระแสควรมีค่าความเข้มข้นของฐานรองในช่วง  $2 \times 10^{15}$  ถึง  $1 \times 10^{16}$  อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3. อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ขั้วที่มีฐานรองความลึกแตกต่างกัน แสดงการตอบสนองในโหมดกระแสและโหมดแรงดันเป็นเชิงเส้นทั้งหมด ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความลึกจะส่งผลให้การตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งในโหมดแรงดันและโหมดกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุปกรณ์ที่เหมาะสมแก่การทำงานในโหมดกระแสควรจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความลึกค่อนข้างมากถึงจะได้ความไวในการตอบสนองสูงสุด โดยผลจากการจำลองแบบ ความลึกของฐานรองที่เหมาะสมต่อการทำงานในโหมดแรงดันควรมีค่าตั้งแต่ 20 ไมโครเมตร ขึ้นไป ส่วนในโหมดกระแสควรมีค่าตั้งแต่ 40 ไมโครเมตร ขึ้นไป

4. อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีความกว้างแตกต่างกัน แสดงการตอบสนองในโหมดกระแสและโหมดแรงดันเป็นเชิงเส้นทั้งหมด ซึ่งการเพิ่มความกว้างของตัวอุปกรณ์จะส่งผลให้การตอบสนองทั้งในโหมดแรงดันและกระแสแย่ง ดังนั้นแล้วการทำงานในโหมดกระแสของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่มีขนาดแคบ โดยผลจากการจำลองแบบแสดงค่าความกว้างที่เหมาะสมต่อการทำงานในโหมดแรงดันและโหมดกระแสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร

5. อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้นที่มีระยะห่างระหว่างขั้วกระแสแตกต่างกัน แสดงการตอบสนองในโหมดกระแสและโหมดแรงดันเป็นเชิงเส้นทั้งหมด โดยการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างขั้วกระแส CC1-CC2 และ CC1-CC3 จะทำให้การตอบสนองในโหมดแรงดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่การตอบสนองในโหมดกระแสมีค่าลดลง เพราะฉะนั้นอุปกรณ์จะทำงานในโหมดกระแสได้ดีที่สุดเมื่ออุปกรณ์มีระยะห่างระหว่างขั้วกระแสที่น้อย จากผลการจำลองแบบ ค่าความยาวที่เหมาะสมต่อการทำงานในโหมดแรงดันควรมีค่าเท่ากับ 45 ไมโครเมตร ส่วนโหมดกระแสควรมีค่าเท่ากับ 15 ไมโครเมตร

6. การไบอัสกระแสให้ตัวอุปกรณ์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การทำงานในโหมดกระแสและโหมดแรงดันตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีขึ้นด้วย โดยการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กทั้งสองโหมดจะมีลักษณะการตอบสนองเป็นเชิงเส้นทั้งหมด

7. อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่ทำงานในโหมดกระแสมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ทามุมต่าง ๆ ในระนาบ x-y และ y-z เหมือนกับการทำงานในโหมดแรงดัน ซึ่งอุปกรณ์จะตอบสนองได้ดีที่สุดเมื่อสนามแม่เหล็กอยู่ในแนวแกนที่ทามุมตั้งฉากกับทิศทางของกระแส

จากผลการจำลองแบบทั้งหมดของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ที่ทำงานในโหมดกระแส ตัวอุปกรณ์สามารถออกแบบให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการทำงานในโหมดกระแส โดยได้ความไวในการตอบสนองสูงสุดเท่ากับ 0.0476 แอมป์ต่อแอมป์เทสลา ที่กระแสไบอัส 0.5 มิลลิแอมป์

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Lenz, "A review of magnetic sensors." Proc. IEEE, vol. 78, no. 6, p. 973.
- [2] J. Clarke, and R.H. Koch. "The impact of high temperature superconductivity on SQUID magnetometers." Science, vol. 242, p. 217, 1988.
- [3] K. P. Koo, A. Dandridge. and G.H. Sigel. "Effects of non-linear magnetostrictive properties in a fiber-optic magnetometer." Proc. Optical Fiber Sensor Conf., Stuttgart, Germany, 1984.
- [4] J. E. Lenz, G. Mitchell, and CD. Anderson. "Fiber-optic magnetometer design." Proceedings SPIE Technical Symposium, Arlington, 1984.
- [5] F. D. Colegrove, L.D. Schearer. and G.K. Walters. "Polarization of He<sup>3</sup> gas by optical pumping." The Physical Review, vol. 132, no. 6. p. 2561, 1963.
- [6] R. Boll, and K.J. Overshott. "Sensors: Magnetic Sensors." W. Goepel, J.Hesse, J.N. Zemel (eds.). VCH Verlag, Weinheim, 1989.
- [7] R. S. Herbert, and L.J. Schwee. "Thin film magnetoresistance magnetometer." Rev. Sci. Instrum., vol. 37, p. 1321, 1966.
- [8] T. R. McGuire, and R.I. Potter. "Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys." IEEE Trans. Mag., vol. 11, p. 1018, 1975.
- [9] K. E. Kujik, W.J. van Gestel and F.W. Gorter. "The barber pole, a linear magnetoresistive head." IEEE Trans. Magn., vol. J 1, p. 1215, 1975.
- [10] U. Dibbern. "Sensors based on the magnetoresistive effect." Sensor and Actuators A, vol. 4, p. 221. 1983.
- [11] U. Dibbern. "Magnetic Field Sensors Using the Magnetoresistive Effect." Sensor and Actuators A, vol. 10, p. 127, 1986.
- [12] F. Primdahl. "The fluxgate magnetometer." Journal of Physics E: Scientific Instrumentation, vol. 12, p. 241, 1979.
- [13] P. Ripka. "Review of fluxgate sensors." Sensor and Actuators A, vol. 33, p. 129, 1992.
- [14] T. Seitz. "Fluxgate sensor in planar microtechnology." Sensor and Actuators A, vol. 21-23, p. 799, 1990.
- [15] S. Kawahito, Y. Sasaki, M. Ishida, and Y. Tadokoro. "A fluxgate magnetic sensor with micromachined solenoids and electroplated permalloy cores." Digest of Technical Papers of Transducers '93, p. 888, 1993.
- [16] M. Schneider, S. Kawahito, Y. Tadokoro, and H. Baltes. "High sensitive CMOS micro fluxgate sensor." Technical Digest of International Electron Device Meeting (IEDM '97), p. 907, 1997.
- [17] CL. Chien, and CR. Westgate. "The Hall Effect and its Applications." Plenum Press, New York, 1980.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] P. Ripka. "Magnetic sensors for industrial and field applications." Sensor and Actuators A, vol. 41-42, p. 394, 1994.
- [19] L. Ristic, H. Baltes, T. Smy, and I. Filanovsky. "Suppressed sidewall injection magnetotransistor with focused emitter injection and carrier double deflection." IEEE Electron Device Letters, vol. 8, no. 9, p. 395, 1987.
- [20] L. Ristic, T. Smy, and H. Baltes. "A lateral magnetotransistor structure with a linear response to the magnetic field." IEEE Trans. Electron Dev., vol. 36, p. 1076, 1989.
- [21] M. Metz, M. Schneider, and H. Baltes. "Offset reduction in multicollector magnetotransistors." Technical Digest of International Electron Device Meeting (IEDM '96), p. 537, 1996.
- [22] M. Metz, M. Schneider, A. Haeberli, and H. Baltes. "Analysis and reduction of CMOS magnetotransistor offset." IEEE European Solid-State Devices Conference (ESSDERC '98), p. 184, 1998.
- [23] V. I. Stafeev. "Modulation of diffusion length as a new principle of operation of semiconductor devices." Sov Phys. Solid State, vol. 1, p. 763, 1959.
- [24] E. I. Karakushan, and V.I. Stafeev. "Magnetodiodes." Sov. Phys. Solid State, vol. 3, p. 493, 1961.
- [25] R. S. Popovic, H. Baltes, and F. Rudolf. "An integrated silicon magnetic field sensor using the magnetodiode principle." IEEE Transaction on Electron Devices, vol. ED-31, no. 3, p. 286, 1984.
- [26] G. W. Day, and A.H. Rose. "Faraday effect sensors: the state of the art." SPIE Proc., vol. 985, p. 138, 1988.
- [27] M. N. Baibach, et al. "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices." Phys. Rev. Lett., vol. 61, p. 2472, 1988.
- [28] C.H. Smith, and R.W. Schneider. "Expanding the horizon of magnetic sensing: GMR." Proc. Sensors Expo Boston, p. 139, 1997.
- [29] R. Popovic. "Hall-effect devices." Sensor and Actuators A, vol. 17, p. 39, 1989.
- [30] E. H. Hall. "On a New Action of the Magnet on Electric Currents" American Journal of Mathematics, Vol. 2, No. 3 (Sep., 1879), pp. 287-292.
- [31] O. M. "Corbino Elektromagnetische Effekte." die von der Verzerrung herrihren, welche ein Feld an der Bahn der Ionen in Metallen hervorbringt Phys. Z. 12 561, 1911.
- [32] Macdonald James Ross. "Hall Effect Device." U.S. patent no. US2980860A, 18 April 1961.
- [33] Dunlap Jr William C. "Hall Effect Device." U.S. patent no. US2725504A, 29 November 1955.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] Pascal J., Hébrard L., Kammerer J.B., Frick V., Blondé J.P. “**First vertical Hall device in standard 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS technology.**” *Sens. Actuators A Phys.* 147 41–46, 2008.
- [35] A. M. Paun, J. M. Sallese and M. Kayal. “**Comparative Study on the Performance of Five Different Hall Effect Devices.**” *Sensors* 13, 2093-2112, 2013.
- [36] Lippmann H. J. and Kuhrt F. “**Der Geometrieinfluss auf den Hall-Effekt bei rechteckigen Halbleiterplatten**” *Z. Naturforsch.* 13a 474-83, 1958.
- [37] Haeusler J. “**Die Geometriefunktion vierelektrodiger Hallgeneratoren.**” *Arch. Elektrotech.* 52 11-19, 1968.
- [38] I. G. Kirnas, P. M. Kurilo, P. G. Litovchenko, V. S. Lutsyak and V. M. Nitsovich. “**Concentration Dependence of the Hall Factor in n-Type Silicon.**” *Phys. Status Solidi (A)* 23, 2 (1974) K123-K127.
- [39] R.S. Popovic. “**The Vertical Hall-Effect Device.**” *IEEE Electron Devices Lett*, vol. EDL-5, pp.357-358, 1984.
- [40] Ralph Steiner Vanha. “**Rotary Switch and Current Monitor by Hall-Based Microsystems.**” Doctor of Natural Sciences Thesis of Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 1999.
- [41] R.S. Popovic. **Hall Effect Devices.** 2<sup>nd</sup> ED. Bodmin, Cornwall, UK : IOP Publishing Ltd. 2004.
- [42] J. W. Slotboom and H. C. de Graaff. “**Bandgap Narrowing in Silicon Bipolar Transistors.**” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-24, no. 8, pp. 1123–1125, 1977.
- [43] D. B. M. Klaassen, J. W. Slotboom, and H. C. de Graaff. “**Unified Apparent Bandgap Narrowing in n- and p-Type Silicon.**” *Solid-State Electronics*, vol. 35, no. 2, pp. 125–129, 1992.
- [44] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi. “**Modeling of Carrier Mobility Against Carrier Concentration in Arsenic-, Phosphorus-, and Boron-Doped Silicon.**” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-30, no. 7, pp. 764–769, 1983.
- [45] C. Canali et al. “**Electron and Hole Drift Velocity Measurements in Silicon and Their Empirical Relation to Electric Field and Temperature.**” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-22, no. 11, pp. 1045–1047, 1975.
- [46] D. M. Caughey and R. E. Thomas. “**Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field.**” *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 12, pp. 2192–2193, 1967.
- [47] H. Goebel and K. Hoffmann. “**Full Dynamic Power Diode Model Including**

- Temperature Behavior for Use in Circuit Simulators.**” in Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD), Tokyo, Japan, pp. 130–135, May 1992.
- [48] A. Schenk. “**A Model for the Field and Temperature Dependence of Shockley–Read–Hall Lifetimes in Silicon.**” *Solid-State Electronics*, vol. 35, no. 11, pp. 1585–1596, 1992.
- [49] A. Schenk and U. Krumbein. “**Coupled defect-level recombination: Theory and application to anomalous diode characteristics.**” *Journal of Applied Physics*, vol. 78, no. 5, pp. 3185–3192, 1995.
- [50] G. A. M. Hurkx, D. B. M. Klaassen, M. P. G. Knuvers, F. G. O'Hara. “**A new recombination model describing heavy-doping effects and low-temperature behavior.**” *Proc. Int. Electron Device Meeting*, pp. 307–310, 1989.
- [51] L. Huldt, N. G. Nilsson, and K. G. Svantesson. “**The temperature dependence of band-to-band Auger recombination in silicon.**” *Applied Physics Letters*, vol. 35, no. 10, pp. 776–777, 1979.
- [52] W. Lochmann and A. Haug. “**Phonon-Assisted Auger Recombination in Si with Direct Calculation of the Overlap Integrals.**” *Solid State Communications*, vol. 35, no. 7, pp. 553–556, 1980.
- [53] R. Häcker and A. Hangleiter. “**Intrinsic upper limits of the carrier lifetime in silicon.**” *Journal of Applied Physics*, vol. 75, no. 11, pp. 7570–7572, 1994.
- [54] A. Cuevas et al. “**Surface Recombination Velocity and Energy Bandgap Narrowing of Highly Doped n-Type Silicon.**” in 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, France, pp. 337–342, October 1995.
- [55] W. Allegretto, A. Nathan, and H. Baltes. “**Numerical Analysis of Magnetic-Field-Sensitive Bipolar Devices.**” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, vol. 10, no. 4, pp. 501–511, 1991.
- [56] C. Riccobene et al. “**Operating Principle of Dual Collector Magnetotransistors Studied by Two-Dimensional Simulation.**” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 41, no. 7, pp. 1136–1148, 1994.
- [57] C. Riccobene et al. “**First Three-Dimensional Numerical Analysis of Magnetic Vector Probe.**” in *IEDM Technical Digest*, San Francisco, USA, pp. 727–730, December 1994.
- [58] TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version H-2013.3.
- [59] Ch. Schott, P.A. Besse, R.S. Popovic. “**Planar Hall effect in the vertical Hall sensor**” *Sensors and Actuators A*, vol. 85, pp. 111–115, 2000.
- [60] Ch. Schott, Z. Randjelovic, J.-M. Waser, and R.S. Popovic. “**2D Nonlinearity Simulation of the Vertical Hall Sensor using SESES.**”

- [61] A.M. Huiser and H.P. Baltes. “**Numerical Modeling of Vertical Hall-Effect Devices.**” IEEE Electron Device Letters, vol. EDL-5, no. 11, 1984.
- [62] Siya V. Lozanova and Chavdar S. Roumenin. “**Parallel-Field Silicon Hall Effect Microsensors with Minimal Design Complexity.**” IEEE Sensors Journal, vol. 9, no. 7, 2009.
- [63] P.A. Besse, Ch. Schott, and R.S. Popovic. “**Analytical study of Vertical Hall (VH)-devices using an adapted conform mapping technique.**”
- [64] H. Heidari, U. Gatti, and F. Maloberti. “**Sensitivity Characteristics of Horizontal and Vertical Hall Sensors in the Voltage- and Current-Mode.**”
- [65] J. Pascal, L. Hebrard, J.-B. Kammerer, and V. Frick, J.-P. Blonde. “**First Vertical Hall Device in standard 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS technology.**” Sensors and Actuators A, vol. 147, pp. 41-46, 2008.
- [66] J. Pascal, L. Hebrard, J.-B. Kammerer, and V. Frick, J.-P. Blonde. “**Intrinsic limits of the sensitivity of CMOS integrated vertical Hall devices.**” Sensors and Actuators A, vol. 152, pp. 21-28, 2009.
- [67] Elva Jovanovic, Danijela Pantic, and Dragan Pantic. “**Simulation of Vertical Hall sensor in High-voltage CMOS Technology.**” in TELSIS 2003, Serbia and Montenegro, October 1-3, 2003.
- [68] Ch. S. Roumenin. “**Triple Parallel-Field Hall Sensor based Carrier Mobility Evaluation in Semiconductor Wafers.**” Comptes rendus de l’Academie bulgare des Sciences, vol. 55, no. 4, 2002.
- [69] N. Jankovic, S. Aleksic, and D. Pantic. “**Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices.**” in Proceedings of Small Systems Simulation Symposium, Serbia, 12-14 February 2012.
- [70] M. Madec, J.-B. Schell, and J.-B. Kammerer. “**Compact Modeling of Vertical Hall-effect Devices: Electrical Behavior.**”
- [71] P. Wipatawit, S. Wangtong, O. Trithaveesak, C. Hruanun, and A. Poyai. “**An in-line contact configuration for the Hall sensors device.**”
- [72] C. Sander, R. Raz, P. Ruther, O. Paul, T. Kaufmann, M. Cornils, and M.C. Vecchi. “**Fully Symmetric Vertical Hall Devices in CMOS Technology.**”
- [73] Z. Randjelovic and R.S. Popovic. “**Characterization, Simulation and Macro-Modeling of Vertical Hall Devices.**” in Proceeding of 21<sup>st</sup> International Conference on Microelectronics, vol. 2, Yugoslavia, 14-17 September 1997.
- [74] J. Pascal, L. Hebrard, J.-B. Kammerer, V. Frick, and J.-P. Blonde. “**A Vertical Hall Device in Standard Submicron CMOS Technology.**”
- [75] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk. “**Compact Model of Dual – Drain MAGFETs Simulation.**” in International Journal of Electrical,

- Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, vol. 3, no. 4, 2009.
- [76] Dale F Berndt, Andrzej Peczalski, Eric E. Vogt, William F. Witcraft. “**Magnetic Sensor Integrated with CMOS.**” U.S. patent no. US2004/0207031 A1, 21 October 2004.
- [77] T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai. “**The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device.**” Proceeding of International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computers, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016), June 28–July 1, Chiang Mai, Thailand, 2016.
- [78] S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai. “**Effect of Substrate Depth to 5-Contact Vertical Hall**” Proceeding of International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computers, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2017), 27-30 June, Phuket, Thailand, 2017.
- [79] สวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์โย “**การจำลองแบบเพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสเพียงเบนบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส**” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, 25-27 พฤษภาคม, ภูเก็ต, ประเทศไทย, 2559
- [80] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์ : แผนกดาราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542**
- [81] ทรงพล กาญจนชูชัย. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ก.**  
**คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน**

**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 <sup>3</sup>
Nearest Neighbor Distance at 300K	0.235	nm
Number of atoms in 1 cm <sup>3</sup>	$4.995 \cdot 10^{22}$	
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)	$2.8 \times 10^{19}$	cm <sup>-3</sup>
Effective density of states (valence, $N_v$ T=300 K)	$1.04 \times 10^{19}$	cm <sup>-3</sup>
Electron affinity	133.6	kJ/mol
Energy Gap $E_g$ at 300 K (Minimum Indirect Energy Gap at 300 K)	1.12	eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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	$\mu\text{m}$
Intrinsic carrier concentration	$1 \cdot 10^{10}$	$\text{cm}^{-3}$
Intrinsic resistivity	$3.2 \cdot 10^5$	$\Omega \cdot \text{cm}$
Auger recombination coefficient $C_n$	$1.1 \cdot 10^{-30}$	$\text{cm}^6 / \text{s}$
Auger recombination coefficient $C_p$	$3 \cdot 10^{-31}$	$\text{cm}^6 / \text{s}$

### 3. Thermal properties

PROPERTY	VALUE	UNITS
Melting point	1414 1687	$^{\circ}\text{C}$ 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	$\text{cm}^2 / \text{s}$
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	$\text{kJ} / \text{mol}$

### 4. Electrical properties

PROPERTY	VALUE	UNITS
Breakdown field	$\approx 3 \cdot 10^5$	$\text{V} / \text{cm}$
Index of refraction	3.42	
Mobility electrons	$\approx 1400$	$\text{cm}^2 / (\text{V} \times \text{s})$
Mobility holes	$\approx 450$	$\text{cm}^2 / (\text{V} \times \text{s})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTY	VALUE	UNITS
Diffusion coefficient electrons	$\approx 36$	$\text{cm}^2/\text{s}$
Diffusion coefficient holes	$\approx 12$	$\text{cm}^2/\text{s}$
Electron thermal velocity	$2.3 \cdot 10^5$	$\text{m/s}$
Electronegativity	1.8	Pauling's
Hole thermal velocity	$1.65 \cdot 10^5$	$\text{m/s}$
Optical phonon energy	0.063	eV
Density of surface atoms	(100) 6.78 (110) 9.59 (111) 7.83	$10^{14}/\text{cm}^2$ $10^{14}/\text{cm}^2$ $10^{14}/\text{cm}^2$
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

### 5. Mechanical properties

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTY		VALUE	UNITS
Bulk modulus of elasticity		$9.8 \cdot 10^{11}$	$\text{dyn/cm}^2$
Young's Modulus (E)	[100]	129.5	GPa
	[110]	168.0	GPa
	[111]	186.5	GPa



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

### คำสั่งที่ใช้ในการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD

ในการจำลองแบบโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น เราจะใช้คำสั่งที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1.คำสั่งที่ใช้ในการสร้างโครงสร้าง 2.คำสั่งที่ใช้ในการกำหนด mesh และขั้วไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง และ 3.คำสั่งสำหรับจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง โดยตัวอย่างคำสั่งที่นี้จะแสดงดังต่อไปนี้

#### 1. คำสั่งที่ใช้ในการสร้างโครงสร้าง

##### 1.1 คำสั่งที่ใช้ในการกำหนด layout ให้กับโครงสร้าง

```

===== Layout Dimension =====
( Written by Prolyt-ISE on Tue Oct 29 14:08:01 2013 );
( Prolyt dim: 0 65000 75000 100000 );
LM1;
( Prolyt M1 #00ff00,stipple1 );
P 1000,9000 1500,9000 1500,8500 1000,8500;
P 2000,9000 2500,9000 2500,8500 2000,8500;
P 3000,9000 3500,9000 3500,8500 3000,8500;
P 4000,9000 4500,9000 4500,8500 4000,8500;
P 5000,9000 5500,9000 5500,8500 5000,8500;
LSIM3D;
( Prolyt SIM3D black,stipple1 );
P 0,10000 6500,10000 6500,7500 0,7500;
LIMP2;
( Prolyt IMP2 #ff0000,stipple1 );
P 990,9010 1510,9010 1510,8490 990,8490;
P 1990,9010 2510,9010 2510,8490 1990,8490;
P 2990,9010 3510,9010 3510,8490 2990,8490;
P 3990,9010 4510,9010 4510,8490 3990,8490;
P 4990,9010 5510,9010 5510,8490 4990,8490;
E;
=====

```

##### 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;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

maskfile : "";
scale : 1;
domain : "";
dimension : 1;
stretch : "";
}, region : "SIM3D", coordinate_shift : true, output : "n@node@", node : "@node@", side
: front, graphics : true, depth : 200 um, user_grid : default, grid_refinement : Struct {
  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 (dopant : "phosphorus", concentration : 1e16 /cm3, resistivity : 0 ohm-cm);
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 @xj@)
(define NDope 5e19)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(define PDope -1e20)

(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\ 1e16
  \Depth\ Xj
  \Erf\ \Factor\ 0.8)
(sdedr:define-gaussian-profile
  \DP.IMP1\ (ActiveConcentration PDopant)
  \PeakPos\ 0
  \PeakVal\ (abs PDope)
  \ValueAtDepth\ 1e16
  \Depth\ Xj
  \Erf\ \Factor\ 0.8)
", tsuprem4 : "

");
pattern (layer : "IMP2", polarity : dark_field);
insert (dios : "

", sprocess : "

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
");
anneal (time : 30 min);
etch (material : "resist", etch_type : strip, etchstop : "default");
deposit (material : "aluminum", thickness : 1 um, dopant : "default");
pattern (layer : "M1", polarity : light_field);
etch (material : "aluminum", thickness : 1 um, etch_type : anisotropic, etchstop :
"default");
etch (material : "resist", etch_type : strip, etchstop : "default");
```

```
=====
```

## 2. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนด mesh และข้อไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง

```
===== 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)
    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)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

(sdedr:define-refinement-window "RW.CC2"
  "Cuboid" (position 14.5 94.5 198.5) (position 20.5 100.5 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.CC2"
  2.0 2.0 2.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.CC2"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.CC2" "RS.CC2" "RW.CC2" )

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.SC1"
  "Cuboid" (position 24.5 94.5 198.5) (position 30.5 100.5 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.SC1"
  2.0 2.0 2.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.SC1"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.SC1" "RS.SC1" "RW.SC1" )

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.CC1"
  "Cuboid" (position 34.5 94.5 198.5) (position 40.5 100.5 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.CC1"
  2.0 2.0 2.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.CC1"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.CC1" "RS.CC1" "RW.CC1" )

;-----

```

```
(sdedr:define-refinement-window "RW.SC2"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
"Cuboid" (position 44.5 94.5 198.5) (position 50.5 100.5 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS. SC2"
  2.0 2.0 2.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS. SC2"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP. SC2" "RS. SC2" "RW. SC2" )
```

```
;-----
```

```
(sdedr:define-refinement-window "RW.CC3"
  "Cuboid" (position 54.5 94.5 198.5) (position 60.5 100.5 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS. CC3"
  2.0 2.0 2.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS. CC3"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP. CC3" "RS. CC3" "RW. CC3" )
```

```
;-----
```

```
(sdedr:define-refinement-window "RW.Sub1"
  "Cuboid" (position 0 75 195) (position 75 120 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Sub1"
  2.0 2.0 2.0
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Sub1"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP. Sub1" "RS. Sub1" "RW. Sub1" )
```

```
;-----
```

```
(sdedr:define-refinement-window "RW.Sub2"
  "Cuboid" (position 14.5 94.5 195) (position 60.5 100.5 200.5) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Sub2"
  1.0 1.0 1.0
  0.05 0.05 0.05 )
```

```
(sdedr:define-refinement-function "RS. Sub2"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

"DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP. Sub2" "RS. Sub2" "RW. Sub2" )

;-----

; ===== Contacts =====
;-- CC2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "CC2" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "CC2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 17.5 97.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 17.5 97.5 200.5)))

;-- SC1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "SC1" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "SC1")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 27.5 97.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 27.5 97.5 200.5)))

;-- CC1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "CC1" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "CC1")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 37.5 97.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 37.5 97.5 200.5)))

;-- SC2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "SC2" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "SC2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 47.5 97.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 47.5 97.5 200.5)))

;-- CC3 contact:
(sdegeo:define-contact-set "CC3" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "CC3")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 57.5 97.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 57.5 97.5 200.5)))

;-- substrate contact:
(define dfbool (sdegeo:get-default-boolean))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
(sdegeo:create-cuboid (position -75 -120 -200.0)
(position 75 120.0 @<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@")

; Build Mesh
(system:command "snmesh n@node@_msh")
=====

```

### 3. คำสั่งสำหรับจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง

```

===== Bias Constant Current =====
#if @lcc1Vcc1@ == 0
#noexec
#endif
!(
if { "@Type@" == "n" } {
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"
}
)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

set IMPACT "hAvalanche(Okuto) eAvalanche(Okuto)"
set EQNS "Poisson Electron Hole"
}
)!

```

```

Electrode {
  { Name="CC1" Voltage=0.0 }
  { Name="CC2" Voltage=0.0 }
  { Name="CC3" Voltage=0.0 }
  { Name="SC1" Voltage=0.0 current=0.0 }
  { Name="SC2" Voltage=0.0 current=0.0 }
}

```

```

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

```

```

Physics {
  EffectivIntrinsicDensity( Slotboom )
  Mobility (
    DopingDependence(Masetti)
    CarrierCarrierScattering(ConwellWeisskopf)
    HighFieldSaturation(Canali)
  )
  Recombination (
    TrapAssistedAuger
    SRH(DopingDep)
  )
  MagneticField = ( 0.0, @BField@, 0.0 )
}

```

```

Physics (MaterialInterface="Oxide/Silicon") {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Recombination(surfaceSRH)
}

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

InitialStep=1e-3 Minstep=1e-5 MaxStep=0.3
Goal { Name="CC1" Voltage=! (puts [expr $Sign*@Vcc1@])! }
){ Coupled { !(puts $EQNS)! } }

```

```

* Change base to current mode
Set ( "CC1" mode Current )

```

\*- Ramp base to lbmin

```

NewCurrentFile= "lcc1_newd_01"
Quasistationary (
InitialStep=1e-6 Increment=1.5
Minstep=1e-8 MaxStep=0.3
Goal { Name="CC1" Current=! (puts [expr $Sign*@lcc1@])! }
){ Coupled { !(puts $EQNS)! } }
CurrentPlot ( Time = (Range = (0.0 0.2) Intervals=10;
Range = (0.2 1.0) Intervals=20))
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ค.**  
**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

1. สวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์โย “การจำลองแบบเพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสเบี่ยงเบนบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 (EENET 2016), 25-27 พฤษภาคม, ภูเก็ต, ประเทศไทย, 2559
2. T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai “The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 13<sup>th</sup> (ECTI-CON 2016), June 28–July 1, Chiang Mai, Thailand, 2016.
3. S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai “Effect of Substrate Depth to 5-Contact Vertical Hall” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 14<sup>th</sup> (ECTI-CON 2017), 27-30 June, Phuket, Thailand, 2017.



# EENET2016

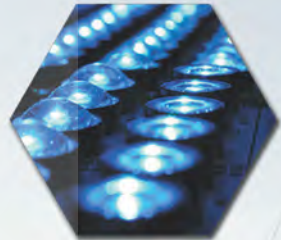
**Innovation for Sustainability Entrepreneur**

25-27 May 2016, Duangjitt Resort & Spa,  
Patong Beach, Phuket



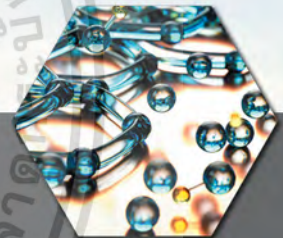
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

**The 8th Conference of Electrical Engineering Network  
of Rajamangala University of Technology**



## Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน(ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



# การจำลองแบบเพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสเบี่ยงเบนบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส

## A Simulation to Study the Effect of Deviation Current on 5-Contacts Vertical Hall Device

สวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์<sup>1</sup>, เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล<sup>1</sup> และ อัมพร โพธิ์โย<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4550 E-mail: s8601172@kmitl.ac.th

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่ที่ 1 วังตะเคียน อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9

EL05

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส โดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเบี่ยงเบนของกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ จากการจำลองการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ แสดงให้เห็นถึงการเบี่ยงเบนของกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กอย่างเป็นเชิงเส้นสำหรับอุปกรณ์ที่มีฐานรองชนิด n ความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  และ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสมีค่าอยู่ในช่วง 20-40% ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต นั่นหมายความว่าผลกระทบเบี่ยงเบนของกระแสเป็นกลไกที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส

คำสำคัญ: อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส, การจำลองแบบ, Sentaurus TCAD

### Abstract

This paper presents a simulation of 5-contacts vertical Hall device by Sentaurus TCAD. For study the effect of deviation current which affect to output voltage of the device. A simulation of magnetic field response to device was shown the deviation current which linearity response to magnetic field. For n-type substrate concentration  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  and  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , the deviation current created voltage about 20-40 percent of the total output voltage that mean the effect of deviation current is one of the importance mechanism for 5-contacts vertical Hall device.

Keywords: 5-Contacts vertical Hall device, Simulation, Sentaurus TCAD

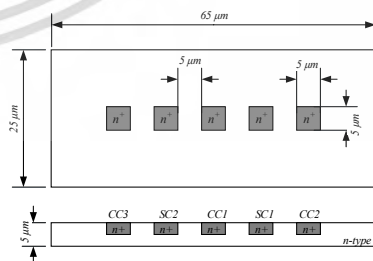
### 1. บทนำ

อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ที่มีทิศในแนวขนานกับผิวของอุปกรณ์

โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ในการอธิบายกลไกที่เกิดขึ้น [1] เอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall device) จะถูกวัดในรูปแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ในขณะที่อุปกรณ์บางประเภท เช่น ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแม่เหล็กแบบเดรนคู่ (Dual-Drain Magnetic Field-Effect Transistor)[2] และ แมกนีโตไดโอดแบบคู่ (Dual Magnetodiode)[3] จะอาศัยการเบี่ยงเบนของพาหะหรือกระแสที่เกิดจากแรงลอเรนตซ์ (Lorentz deflection) ทำให้ได้ความแตกต่างของกระแสเป็นเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส ในรูปแบบ 2D-3D ที่ผ่านมาโดยใช้ตัวช่วยต่างๆ[4] จะไม่ได้กล่าวถึงกลไกการเบี่ยงเบนของกระแสที่อาจส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ แนวคิดของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัสโดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เสมือนจริง เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์

## 2. การจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส

### 2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์



รูปที่ 1 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส

โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยฐานรองชนิด n ที่มีความเข้มข้นต่ำกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเบนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

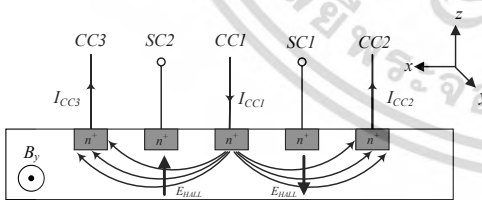
บริเวณที่ถูกเจือด้วยความเข้มข้นสูง (n+) เพื่อที่จะสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก โดยมี 3 รอยสัมผัสที่ทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสที่ให้กระแสไฟฟ้าวิ่งไหลเข้าและออกซึ่งเรียกว่า รอยสัมผัสกระแส (current contacts (CC)) ส่วนอีก 2 รอยสัมผัสจะถูกใช้วัดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ เรียกว่า รอยสัมผัสรับรู้ (sense contacts (SC)) รอยสัมผัสกระแสทั้งสามจะวางอยู่ที่บริเวณด้านซ้ายสุดและขวาสุดบนพื้นผิวของอุปกรณ์ ในขณะที่อีกรอยสัมผัสจะวางอยู่บริเวณกึ่งกลางของอุปกรณ์ ส่วนรอยสัมผัสรับรู้จะวางอยู่ระหว่างรอยสัมผัสกระแสทั้งสามดังแสดงในรูปที่ 1

### 2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์

การใช้งานโดยทั่วไปของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัสจะไบอัสกระแสเข้าที่รอยสัมผัส CC1 ในขณะที่รอยสัมผัส CC2 และ CC3 จะทำหน้าที่เป็นกราวด์ ดังนั้นกระแสจะไหลจากรอยสัมผัส CC1 ไปยังรอยสัมผัส CC2 และ CC3 ผ่านไดรอยสัมผัส SC1 และ SC2 ตามลำดับ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศที่ขนานกับผิวของอุปกรณ์ สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำพาหะทำให้เกิดแรงลอเรนตซ์ขึ้น แรงลอเรนตซ์จะทำให้เกิดการสะสมของพาหะและเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ ( $E_H$ ) บริเวณไดรอยสัมผัส SC1 และ SC2 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้นบริเวณรอยสัมผัส SC1 และ SC2 จึงปรากฏแรงดันไฟฟ้าขึ้น (รูปที่ 2) โดยผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัสทั้งสองหรือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์จะเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) ตามสมการ

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H \quad (1)$$

เมื่อ  $V_{SC1}$  และ  $V_{SC2}$  คือแรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัส SC1 และ SC2



รูปที่ 2 หลักการทำงานของอุปกรณ์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส

### 2.3 การจำลองแบบอุปกรณ์

ฐานรองของอุปกรณ์จะถูกจำลองด้วยความหนา 5  $\mu\text{m}$  เนื่องจากโดยปกติแล้วตัวอุปกรณ์จะถูกสร้างเป็นบอชนิด n ลงในฐานรองชนิด p เพื่อทำการแยกขาดทางไฟฟ้า ในบทความนี้เราจึงทำการจำลองเฉพาะส่วนที่เป็นตัวอุปกรณ์เพื่อลดระยะเวลาในการจำลองแบบลง สำหรับการจำลองแบบ ฐานรองของตัวอุปกรณ์จะถูกกำหนดให้มีความ

เข้มข้น  $10^{15}$  และ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลระหว่างความเข้มข้นทั้งสองค่า ส่วนบริเวณรอยสัมผัสจะถูกเจือด้วยความเข้มข้น  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  เพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มิก ในการจำลองเราจะไบอัสกระแสคงที่ขนาด 0.5 mA เข้าที่รอยสัมผัส CC1 และทำการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศ y โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง 0-0.4 T เพื่อดูการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์

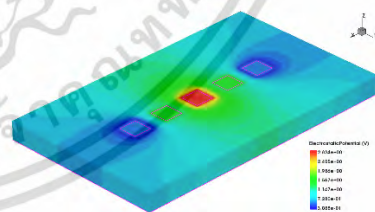
สำหรับการจำลองผลกระทบจากสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD การไหลของพาหะในอุปกรณ์จะใช้สมการขนส่งแบบ Galvanic transport[5] ที่มีพื้นฐานมาจากสมการความหนาแน่นกระแสการแพร่-ลอยเลื่อน โดยเพิ่มทอมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไปดังสมการ

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

โดย  $\alpha = n$  หรือ  $p$ ,  $\vec{g}_a$  คือเวกเตอร์กระแสที่ไม่ขึ้นกับสภาพคล่องของพาหะ,  $\mu_a^*$  คือสภาพคล่องฮอลล์,  $\mu_a$  คือสภาพคล่องของพาหะ,  $\vec{B}$  คือเวกเตอร์สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำและ  $B$  คือขนาดของเวกเตอร์

### 2.4 ผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์ผล

ผลการจำลองสำหรับฐานรองความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสกระแสคงที่ 0.5 mA ด้วยความเข้มของสนามแม่เหล็ก 0.4 T โดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD จะแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งชัดเจนบ่งบอกถึงขนาดของศักย์ไฟฟ้า โดยสีแดงคือบริเวณที่มีศักย์สูงส่วนสีน้ำเงินคือบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าสำหรับฐานรองความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.4 T

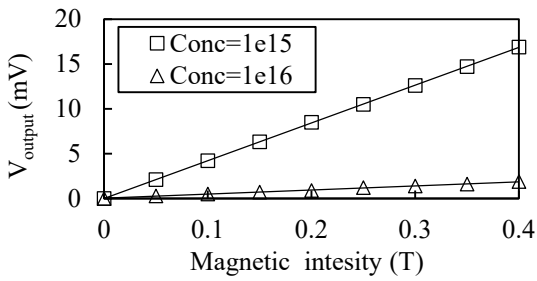
รูปที่ 4 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  และ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ผลการตอบสนองมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ดี โดยมีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับกระแส (current-related sensitivity ( $S_I$ )) เท่ากับ 84.3 V/A-T และ 9.2 V/A-T ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้นต่ำจะตอบสนองดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

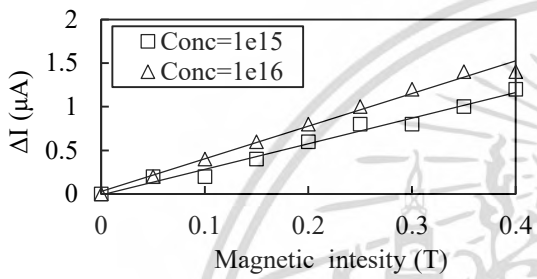
**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)



รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตอบสนองสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5 ความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

โดยปกติแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัสจะสามารถหาได้ตามสมการที่ (1) นั่นก็คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ทั้งหมดจะเป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) แต่จากการจำลองที่ได้ (รูปที่ 5) แสดงให้เห็นว่าเกิดความแตกต่างของกระแสทั้งสองฝั่ง ( $I_{CC2} \neq I_{CC3}$ ) ทำให้ได้ค่าความแตกต่างของกระแส ( $\Delta I$ ) ซึ่งตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในลักษณะเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัสจะประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแส ( $V_{\Delta I}$ ) เราจึงสามารถเขียนสมการที่ (1) ใหม่เป็น

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H + V_{\Delta I} \quad (3)$$

โดยค่าความแตกต่างของกระแสที่ทำให้เกิดแรงดัน  $V_{\Delta I}$  สามารถระบุได้จาก

$$\Delta I = \frac{|I_{CC2} - I_{CC3}|}{2} \quad (4)$$

โดย  $I_{CC2}$  และ  $I_{CC3}$  คือกระแสที่รอยสัมผัส CC2 และ CC3 ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$I_{CC2} = \frac{I_{CC1}}{2} + \Delta I, \quad I_{CC3} = \frac{I_{CC1}}{2} - \Delta I \quad (5)$$

เมื่อ  $I_{CC1}$  คือกระแสไอฮอลล์ที่รอยสัมผัส CC1 ดังนั้น

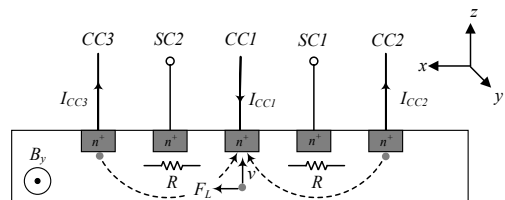
$$I_{CC1} = I_{CC2} + I_{CC3} \quad (6)$$

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสที่ได้จากการจำลองจะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแส

$B$ (T)	ความเข้มข้น $10^{15} \text{ cm}^{-3}$			ความเข้มข้น $10^{16} \text{ cm}^{-3}$		
	$V_{output}$ (mV)	$V_{\Delta I}$ (mV)	$\%V_{\Delta I}$	$V_{output}$ (mV)	$V_{\Delta I}$ (mV)	$\%V_{\Delta I}$
0	0	0	0	0	0	0
0.05	2.1	0.7	33.3	0.3	0.1	33.3
0.10	4.2	0.7	16.7	0.5	0.2	40.0
0.15	6.3	1.5	23.8	0.7	0.3	42.9
0.20	8.5	2.2	25.9	0.9	0.3	33.3
0.25	10.5	3.0	28.6	1.2	0.4	33.3
0.30	12.6	3.0	23.8	1.4	0.5	35.7
0.35	14.7	3.7	25.2	1.6	0.6	37.5
0.40	16.9	4.4	26.0	1.9	0.6	31.6

จากตารางจะเห็นได้ว่า  $V_{\Delta I}$  สำหรับอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  มีค่ามากกว่าอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้น  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  เนื่องจากฐานรองความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  มีความต้านทานเนื้อสาร ( $R$ ) มากกว่า สำหรับ  $\%V_{\Delta I}$  ของความเข้มข้น  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ที่มีค่าสูงกว่าเนื่องจาก  $V_H$  และ  $V_{\Delta I}$  จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของฐานรองเพิ่มขึ้น แต่  $V_H$  จะลดลงในสัดส่วนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับ  $V_{\Delta I}$  จึงส่งผลให้  $\%V_{\Delta I}$  ของความเข้มข้น  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  มีค่าที่มากกว่า



รูปที่ 6 กลไกการเบี่ยงเบนพาหะในอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

การเบี่ยงเบนของกระแสเกิดจากกลไกการเบี่ยงเบนพาหะดังแสดงในรูปที่ 6 พาหะที่เป็นอิเล็กตรอนในฐานรองรับชนิด n จะไหลจากรอยสัมผัส CC3 และ CC2 ไปยัง CC1 โดยมีทิศตรงข้ามกับการไหลของกระแส เมื่อใส่สนามแม่เหล็กในทิศทาง  $y$  ( $B_y$ ) พาหะที่เคลื่อนที่ได้รอยสัมผัส CC1 ในทิศ  $-z$  จะถูกแรงลอเรนตซ์ ( $F_L$ ) ผลักไปในทิศ  $x$  จึงทำให้กระแสบางส่วนถูกเบี่ยงเบนไป โดยกระแสที่รอยสัมผัส CC2 จะเพิ่มขึ้นด้วยเทอม  $\Delta I$  และกระแสที่รอยสัมผัส CC3 จะลดลงด้วยเทอม  $-\Delta I$  เมื่อกระแสเบี่ยงเบนส่วนที่เพิ่มขึ้นไหลผ่านความต้านทานเนื้อสาร ระหว่างรอยสัมผัส CC1 และ CC2 ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัส SC1 มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันกระแสเบี่ยงเบนส่วนที่หายไป ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่รอยสัมผัส SC2 ลดลง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าส่วนที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสสามารถเขียนได้เป็น

$$V_{\Delta I} = (\Delta I)R - (-\Delta I)R = 2(\Delta I)R \quad (7)$$

ซึ่ง  $\Delta I$  คือกระแสเบี่ยงเบน และ  $R$  คือความต้านทานเนื้อสาร

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส ในกรณีนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเบี่ยงเบนของกระแสเข้ามาด้วย

### 3. สรุป

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ นอกจากจะมีส่วนที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์แล้ว ยังมีส่วนที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสร่วมด้วย นั่นหมายความว่าผลของการเบี่ยงเบนของกระแสจะช่วยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเบี่ยงเบนของกระแสสำหรับอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้น  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  จะมีค่ามากกว่าอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้น  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  เปอร์เซ็นต์ของผลการเบี่ยงเบนที่ได้จะมีค่าประมาณ 20 ถึง 30% และ 30 ถึง 40% สำหรับอุปกรณ์ที่มีความเข้มข้น  $10^{15}$  และ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ตามลำดับ

### 4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] R.S. Popovic, "The vertical Hall-effect device," IEEE Electron. Device Letters, vol. EDLS (9), pp. 357-358, 1984.
- [2] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk, "Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation," Int. Journal of

Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering vol. 3, no. 4, 2009.

- [3] T. Phetchakul, S. Junkamkaw, "Dual Magnetodiode," in 12<sup>th</sup> Int. Symp. on Integrated Circuits, SG, 2009, pp. 502-504.
- [4] Ch. Schott, Z. Randjelovic, J.-M. Waser and R.S. Popovic, "2D Nonlinearity simulation of the vertical Hall sensor using SESES", in 1st Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators, Santa Clara, CA, USA, 1998.
- [5] TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version H-2013.3.



สวัสดีพงษ์ พูลสวัสดิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจ: การออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



รศ.ดร. เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์จาก Tokai University ประเทศญี่ปุ่น งานวิจัยที่สนใจ : เซ็นเซอร์สารกึ่งตัวนำในวงจรรวม



ดร. อัมพร โพธิ์ไย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก Katholieke University of Leuven ประเทศเบลเยียม งานวิจัยที่สนใจ : เทคโนโลยีกระบวนการสร้างระดับจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Final Program

# ECTI-CON 2016

ChiangMai Thailand, June 28 - 1 July , 2016

13<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics  
Computer, Telecommunications and Information Technology



Illustrated by Assoc.Prof. Wichit Chomtaveewiroot

**Rajamangala University of Technology Lanna**  
**ChiangMai, Thailand**

เว็บไซต์นี้เป็นเพียงเครื่องมือสนับสนุนการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device

Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat  
 Department of Electronics, Faculty of Engineering,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Bangkok, Thailand  
 toempong.ph@kmitl.ac.th

Amporn Poyai  
 Thai Microelectronics Center,  
 National Electronics and Computer Technology Center,  
 Chachoengsao, Thailand

**Abstract**— This paper presents the new model of 5-contacts vertical Hall device. Despite of the induced force from Hall electric field act upon the current along the contacts for induced Hall voltage, there are some deviation currents from the middle contact that contribute the Hall voltage. The deviation current pass through the bulk resistance causes the voltage drop between the voltage contacts. From this study for n-type substrate, the deviation current created voltage about 20-30 percent of the total Hall voltage that mean it is the importance mechanism for vertical Hall device. This study used 3-D simulation by Sentaurus TCAD.

**Keywords**—5-contacts vertical Hall device; Sentaurus TCAD; carrier deflection

## I. INTRODUCTION

The 5-contacts vertical Hall device (5C-VHD) is usually used for detect an in-plane component of magnetic field based on Hall Effect and devised by R.S. Popovic [1]. The potential applications range of 5C-VHD is large. They are widely used in the fields of automotive and contactless current sensors. A Hall device appears to be the most popular integrated structures for sensor applications.

In the past, it has been analyzed and simulated 2D-3D vertical Hall in a various ways [2-6]. They explained that the Hall voltage was induced by induced force act upon the horizontal carrier current in converse direction. Analysis and simulation of 5C-VHD regularly neglected about the carrier deflection which generated unbalance current to form deviation current. Voltage of this effect may affect to output device. However, the explanation about this effect is not mentioned up to date.

This paper concentrates on a simulation of Hall device to analytical study the effect from deviation current of this device by using Sentaurus TCAD.

## II. STRUCTURE AND SIMULATION OF 5-CONTACTS OF VERTICAL HALL DEVICE

### A. Structure

The 5-contacts vertical Hall device basically consists of n-doped silicon with five n+ electrodes at the surface forming a square structure. The three electrodes (placed at both side and

middle) serve as current input and current output contacts are called current contacts (CC), whereas the signal electrodes are called sense contacts (SC) which place between them. Structure and dimension of 5 C-VHD is shown in Fig. 1.

Normally, device is fabricated in CMOS well which is into p-substrate; therefore it is simulated at thickness  $5\mu\text{m}$  because it is normal thickness of n-well. Concentration of n-well is  $10^{15}\text{ cm}^{-3}$  and n+ electrodes are fabricated by ion-implantation of phosphorus  $5\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$  for forming ohmic contacts.

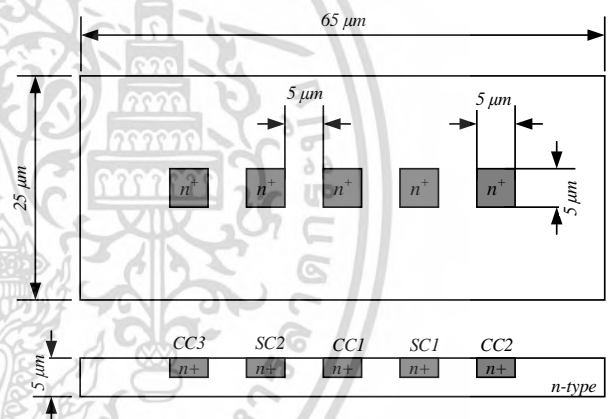


Fig. 1. The configuration of 5-contacts vertical Hall device

### B. Simulation

In a conventional uses, the device is biased constant current thru contact *CC1* whereas contacts *CC2* and *CC3* are grounded. After applied a magnetic field in direction of parallel to the device surface can be generated Hall electric field ( $E_H$ ) under both sense contacts (*SC1*, *SC2*) in a z-axis (Fig. 2). This electric field can be explained by Hall effect. Output voltage ( $V_{output}$ ) or Hall voltage ( $V_H$ ) can consequently be measured by measuring the voltage between both senses contacts express as:

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H \quad (1)$$

where  $V_{SC1}$  and  $V_{SC2}$  are voltage of sense contact *SC1* and *SC2*.

For analysis of magnetic field effects in 5C-VHD by Sentaurus TCAD, the transport equation governing the flow of electrons and holes in the interior of the device must be set up and solved. To this end, the commonly used drift-diffusion-based model of the carrier current densities and must be augmented by magnetic field-dependent terms that account for the action of the transport equations governing the flow of electrons and holes in the interior of the device, the Lorentz force on the motion of the carriers [7]

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

where

$\alpha = n$  or  $p$ .

$\vec{J}_\alpha$  = carrier current density.

$\vec{g}_\alpha$  = current vector without mobility.

$\mu_\alpha^*$  = the Hall mobility.

$\vec{B}$  = the magnetic induction vector.

$B$  = the magnitude of this vector.

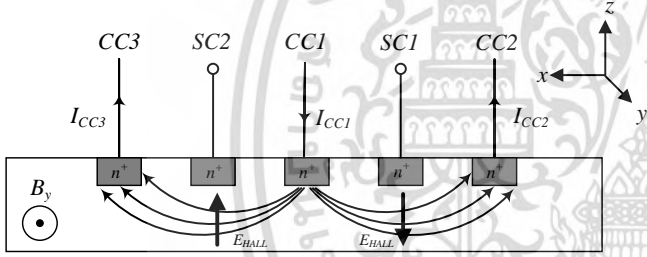


Fig. 2. The Hall effect in a 5-contacts vertical Hall device

The device is biased by constant current 0.5mA thru contact *CC1* and a magnetic field is applied along *y*-axis and varied in the range of 0 to 0.4T which are conditions for 3-D simulation of 5C-VHD. Afterwards, output voltage and deviation current are plotted versus magnetic field.

### III. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The device model for this simulation is shown in Fig. 3 which is related to dimensions in Fig. 1 and the concentration doping as mention before. This structure is designed as non-conventional structure which has 5 contacts, 3 current contacts and 2 voltage contacts by do not consider any mapping from conventional planar structure. The potential distribution of the device under applied bias 0.5 mA and magnetic field intensity (*B*) in *y* direction 0.4 T is shown in Fig. 4. It shows the equipotential line that can be measure in the term of Hall voltage output. Figure 5 shows the plot of output voltage ( $V_{output}$ ) or Hall voltage as defined in (1) to the magnetic field in *y* direction between 0-0.4 T. The output shows linearly

dependence both in *y* and  $-y$  direction with the value of current related sensitivity ( $S_I$ ) is 84.2V/TA. The output voltages occur from the induced Hall electric field in *z*-axis. As shown in Fig.2, the voltage at *SC1* is positive (for electron carrier case) and *SC2* is negative when the magnetic field in *y* direction is applied. It causes by the induced Hall electric field from current cross magnetic field vector. That was explained by this model for 5 contacts vertical Hall device mechanism.

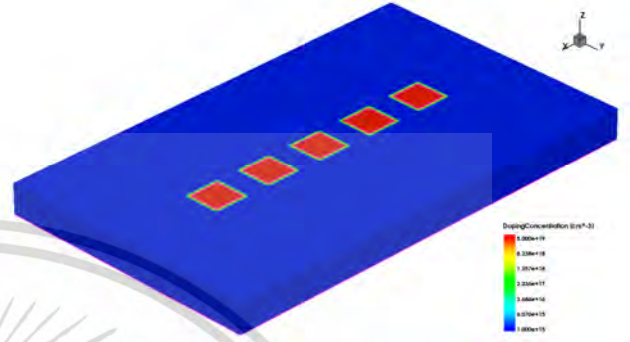


Fig.3. 3-D Dopng profile of 5-contacts vertical Hall device

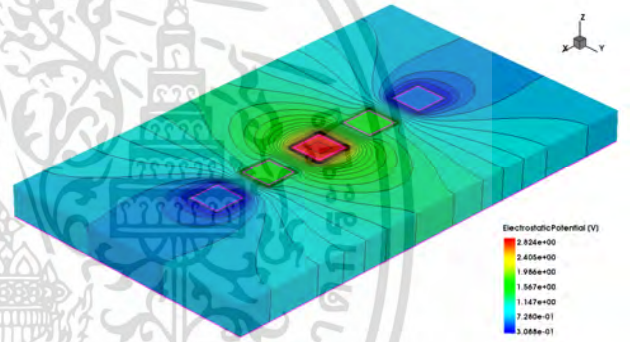


Fig. 4. Potential distribution of 5-contacts vertical Hall device for  $I_{CC1}=0.5\text{mA}$  and  $B=0.4\text{T}$

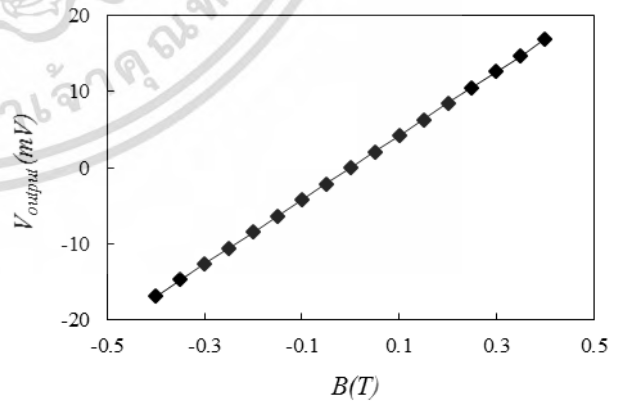


Fig. 5. Output voltage response of 5-contacts vertical Hall device to magnetic field.

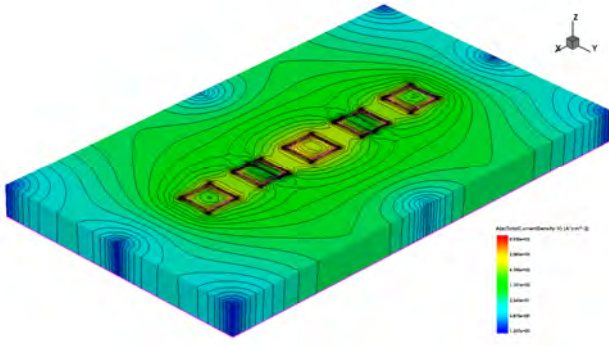


Fig. 6. Current density distributions of 5-contacts vertical Hall device for  $I_{CC1}=0.5\text{mA}$  and  $B=0.4\text{T}$

The current  $I_{CC2}$  and  $I_{CC3}$  are measured during applied magnetic field for investigation of the deviation current. The current density distribution in the same condition is shown in Fig. 6. It shows the equip-current line that can calculate the deviation current  $\Delta I$ . The deviation current is given by

$$\Delta I = \frac{(I_{CC2} - I_{CC3})}{2} \quad (3)$$

where  $I_{CC2}$  and  $I_{CC3}$  are current at contact  $CC2$  and  $CC3$  which can be written as:

$$I_{CC2} = \frac{I_{CC1}}{2} + \Delta I, \quad I_{CC3} = \frac{I_{CC1}}{2} - \Delta I \quad (4)$$

where  $I_{CC1}$  is total biased current at contact  $CC1$ .  $I_{CC1}$  can be written as:

$$I_{CC1} = I_{CC2} + I_{CC3} \quad (5)$$

Fig. 7 shows the plot of deviation current versus magnetic field. It is linearly dependence. It means that magnetic field induced force affect to some current under the middle contact  $CC1$ .

As device has some more affect from carrier deflection which leads to equation (1) that can be rewritten as:

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H + V_{\Delta I} \quad (6)$$

where  $V_{\Delta I}$  is generated voltage from deviation current.

Table 1 summarizes the simulation responses,  $V_{output}$ , and deviation current,  $\Delta I$ , and generated voltage,  $V_{\Delta I}$ , from deviation current which are calculated from (3) and (6), respectively. The percentage of  $V_{\Delta I}$  calculated from (6) is shown in table 1. It shows that the voltage from the current deviation has a significant of output voltage. The percentages are in the range between 17.62 to 35.24 %.

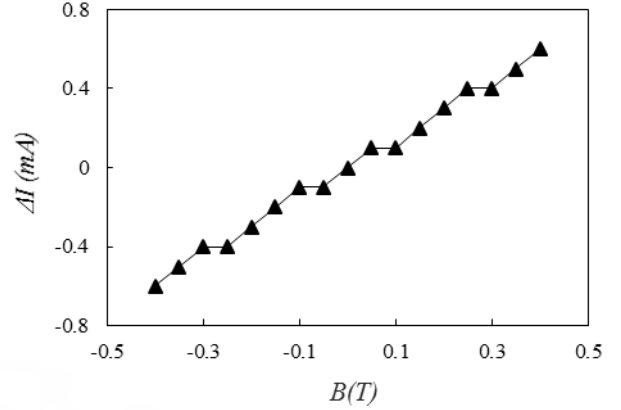


Fig. 7. Deviation current of 5-contacts vertical Hall device to magnetic field.

TABLE I. Results of Simulation, Output Voltage ( $V_{out}$ ), Deviation current ( $\Delta I$ ), Generated Voltage from Deviation Current ( $V_{\Delta I}$ )

$B$ (T)	$V_{output}$ (mV)	$\Delta I$ ( $\mu\text{A}$ )	$V_{\Delta I}$ (mV)	% $V_{\Delta I}$
0	0	0	0	0
0.05	2.10	0.10	0.74	35.24
0.10	4.20	0.10	0.74	17.62
0.15	6.30	0.20	1.48	23.49
0.20	8.50	0.30	2.22	26.12
0.25	10.50	0.40	2.96	28.19
0.30	12.60	0.40	2.96	23.49
0.35	14.70	0.50	3.70	25.17
0.40	16.90	0.60	4.44	26.27

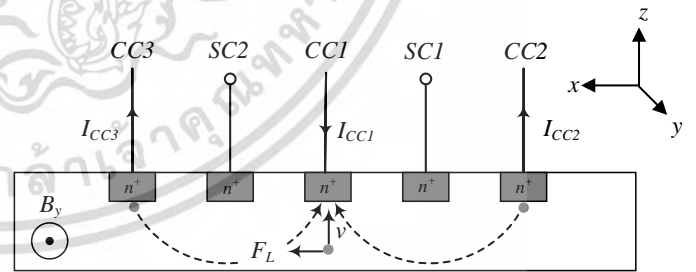


Fig. 8. The mechanism of carrier deflection.

The deviation current caused by carrier deflection mechanism is shown in Fig.8. The figure shows the carrier electron of n type substrate flow from  $CC3$  and  $CC2$  to  $CC1$ . The conventional current is in the opposite direction of electron current. When applied magnetic field in  $y$  direction  $B_y$ , the deflection current from the induced force  $F_L$  in  $x$  direction cause the carrier in the middle under  $CC1$  deflect some currents

in x direction. The current  $I_{CC3}$  is greater than  $I_{CC2}$ . The deviation  $\Delta I$  is now negative value. This causes the current  $I_{CC3}$  increased by  $\Delta I$  and the current  $I_{CC2}$  decreased by  $-\Delta I$ . The deviation current pass through bulk resistance  $R$  between current contacts  $CC1$  and  $CC3$  creates more extra voltages drop at voltage contact  $SC2$ . In the same way, deviation current  $-\Delta I$  pass through current contacts  $CC1$  and  $CC2$  create less extra voltages drop at the voltage contact  $SC1$ . The part of output voltage from deviation current can be written as

$$V_{\Delta I} = (\Delta I)R - (-\Delta I)R \quad (7)$$

$$V_{\Delta I} = 2(\Delta I)R. \quad (8)$$

So the Hall voltage in 5-contacts vertical Hall device includes the output voltage from this effect.

#### IV. CONCLUSION

The deviation current from induced force from magnetic field of 5-contacts vertical Hall device was studied. It found that there was the deviation current during applied magnetic field. In spite of the output voltage induced by Hall electric field, there were some voltages from the deviation current including in the total output voltage. The percentage of this effect by calculation is between 20 to 30 percent.

#### ACKNOWLEDGMENT

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

#### REFERENCES

- [1] R.S. Popovic, "The vertical Hall-effect device", IEEE Electron Device Letters, vol. EDLS (9), pp. 357-358, 1984.
- [2] Z. Randjelovic, R.S. Popovic, "Characterization, simulation and macro modelling of vertical Hall devices", Microelectronics Journal, vol. 29, pp. 715-719, 1998.
- [3] C. Schott, Z. Randjelovic, J.-M. Waser and R.S. Popovic, "2D Nonlinearity simulation of the vertical Hall sensor using SESES", [1st International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators, Santa Clara, CA, USA, April, 6-8, 1998].
- [4] A. M. J. Huizer and H. P. Baltes, "Numerical modeling of vertical Hall-effect devices", IEEE Electron Device Letters, vol. EDL-5, No.11, 1984
- [5] Nebojsa Jankovic, Sanja Aleksic and Dragan Pantic, "Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices", [Proceeding of Small Systems Simulation Symposium 2012, Nis, Serbia 12<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> February 2012].
- [6] P.A. Besse, Ch. Schott and R.S. Popovic, "Analytical study of vertical Hall-devices using an adapted conform mapping technique", [Proceedings of the International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Semiconductors, Sensors and Actuators MSM'98, April 6-8, 1998, Santa Clara, California, USA, Paper T4.6.4, pp. 660-665. ISBN 0-96661-35-0-3].
- [7] TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version H-2013.3.

# ECTI-CON 2017

2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics,  
Computer, Telecommunications and Information Technology

27-30 June 2017

Phuket, Thailand

PROCEEDINGS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่  
ECTI-CON 2017  
Phuket, Thailand

# Effect of Substrate Depth to 5-Contact Vertical Hall

Sawatdipong Poonsawat, Toempong Phetchakul  
Department of Electronics, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
Bangkok, Thailand  
58601172@kmitl.ac.th, toempong.ph@kmitl.ac.th

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

**Abstract**—We studied the five-contact vertical Hall device using TCAD at various depth of substrate. Two main mechanisms of Hall voltage are induced voltage from Lorentz's force and differential current. At low depth, the percentage of voltage from Lorentz's force is much greater than the voltage from differential current. The depth does not only affect Hall voltage by Lorentz's force but also affect contact differential current. The Hall voltage and sensitivity of device are increased with substrate depth until the critical value. The sensitivity of device is saturation when the substrate depth is more than 70  $\mu\text{m}$ . The output voltage from differential current is 45% of overall output voltage at saturation condition.

**Keywords**- TCAD; 5 contacts; vertical Hall; parallel magnetic field; differential current

## I. INTRODUCTION

The Hall magnetic sensor have widely been used in field of automotive, medical, smartphone, and various industrial which they are fully compatible with integrated CMOS technologies. The most common Hall sensor topology is the vertical Hall device [1], such device is a one type of magnetic sensor which sensitive to a magnetic field in the plane of the chip. It is resemble to the parallel field Hall microsensor [2]. Both devices can detect a magnetic field in the same direction. But both devices are difference structure which the vertical Hall device consist of five contacts whereas the parallel Hall field is designed as three contacts. Therefore they have a difference principle to detect a magnetic field. Nevertheless, structure of vertical Hall device was similar to the parallel field Hall micro sensor cause additional phenomenon inside the device that is extracted by TCAD simulation in [3]. Actually, such device is designed with the deep N-well of High-Voltage CMOS technology [4] or N-well of standard CMOS technology [5] to prevent current injected in the substrate of a CMOS circuit and also allow define active region. Furthermore it's also fabricated within N-substrate for discrete device. The vertical Hall device is fabricated with difference technology cause a different depth of active region, which affect to sensitivity of device [6]. For this reason, the active region of device depends on depth of N-well for each CMOS technology.

Generally, the output voltage of vertical Hall device is described by Hall effect [1]. In such device, a magnetic field also has an additional effect, it causes a differential current affect to output voltage of device. Overall output voltages that consist of both parts are Hall voltages from Lorentz's force and voltages from differential current [3]. The depth of device is

the significant parameter influence to differential current and Hall voltage. It determines attribute current distribution and canceling voltage at the rear side [6]. The principles of the conventional five-contact vertical Hall device and additional effect in order to let reader familiar with concept of device are described. Then we concentrate on influence of depth effect on differential current and overall output voltages, that extracted by simulation. Finally, we conclude the result of the depth effect to the device.

## II. VERTICAL HALL DEVICE

### A. Principle

The structures of conventional vertical Hall device (VHD) consist of five contacts at surface. Each contact is heavily doped to form Ohmic contact (Fig.1). The three contacts are located at middle and outermost middle contacts. They serve as current input and current output contacts which called current contacts (CC) and both contacts are placed between current contacts which called sense contact (SC) used for measure output voltage of device. This device can detect a magnetic field in direction of parallel to the device surface. In the presence of a magnetic field, Hall field will appear beneath both sense contacts. The Hall field was generated by accumulation of carriers which drift through both sense contacts. Such carriers are accumulated at upper edges and lower edges of device between three current contacts (at both sense contacts) in the antipodes direction. It is well known Hall effect. Thus we can extract the Hall voltage from voltage difference between both sense contacts (Fig.2a).

Owing to the device was designed to resemble a parallel field Hall microsensor include three current contacts. Parallel Hall field microsensor can detect a magnetic field based on the current deflection effect. This effect cause imbalance current at both side current contacts (CC2, CC3). Output voltage responds to a magnetic field of the parallel field Hall microsensor that can measure by connecting resistor to both current contacts.

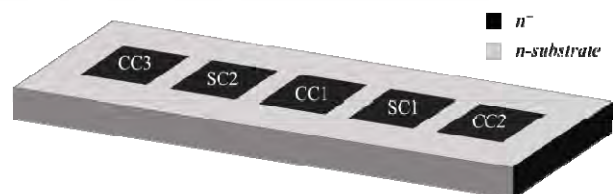


Fig. 1. The structure of vertical Hall device.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

978-1-5386-0449-6/17/\$31.00 ©2017 IEEE

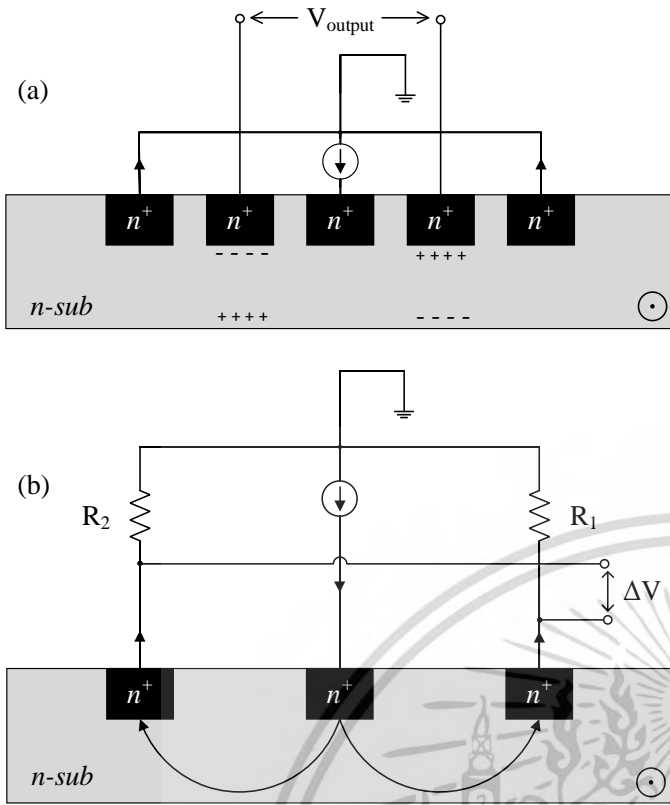


Fig. 2. (a) Principle of conventional 5 contacts vertical Hall device. (b) Principle of parallel field 3 contacts Hall microsensor.

The current deflection effect cause different voltage drop on connected resistor (Fig.2b). For this reason, the vertical Hall device with three current contacts (located outermost of both sides and middle) and two sense contacts (placed between three current contacts) cause both effect (Hall effect and current deflection effect) in one device.

For structure of vertical Hall device, current deflection occurs, it is unnecessary to connect a resistor to current contacts. Because bulk resistance between sense contacts (SC1, SC2) and current contacts (CC2, CC3) represents as resistors (\$R\_{12}\$, \$R\_{23}\$) that connect between both contacts. Consequently, output voltage measure at both sense contacts are consist of Hall voltage from Lorentz's force and generated voltage from differential current.

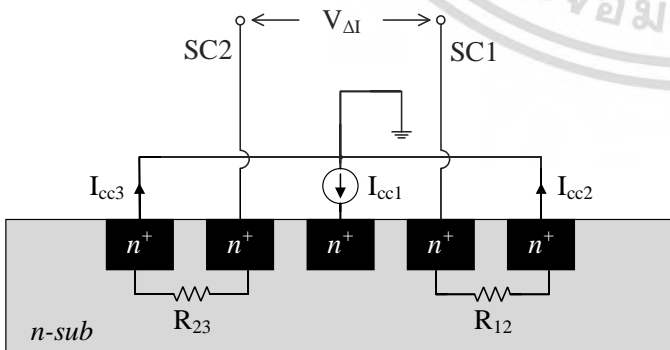


Fig. 3. The couple equivalent resistor between sense contacts (SC1, SC2) and current contacts (CC1, CC2).

### B. Sensitivity of vertical Hall device

As mentioned previously for the output voltage of the VHD consist of Hall voltage (\$V\_H\$) and generated voltage from differential current (\$V\_{\Delta I}\$) express as

$$V_{output} = V_{SC1} - V_{SC2} = V_H + V_{\Delta I} \quad (1)$$

where \$V\_{sc1}\$ and \$V\_{sc2}\$ are voltages of sense contact SC1 and SC2, respectively. For above equation can be used to define the sensitivity of sensor (it is the capability of sensor to transform the magnetic field into an output voltage or output current). We have two sensitivities \$S\_H\$ and \$S\_{\Delta I}\$ which depending on both output quantity, Hall voltage and voltage from differential current. Sensitivities of device can be express as

$$S = S_H + S_{\Delta I} \quad (2)$$

here, \$S\_H\$ and \$S\_{\Delta I}\$ can be given by

$$S_H = \frac{V_H}{B} \quad [V/T] \quad (3)$$

$$S_{\Delta I} = \frac{V_{\Delta I}}{B} \quad [V/T] \quad (4)$$

Since the current deflection effect causes the differential output currents. Thus we can express sensitivity in the terms of differential current or deviation current (\$\Delta I\$)

$$S'_{\Delta I} = \frac{\Delta I}{B} \quad [A/T] \quad (5)$$

The differential current can extracted from different individual components \$I\_{cc2}\$ and \$I\_{cc3}\$ through contacts CC2 and CC3 whereas Hall voltages and generated voltage from differential current are extracted from overall output voltage. We can discriminate \$V\_{\Delta I}\$ from \$V\_{output}\$ with roughly estimate by Ohm's law, which \$V\_{\Delta I}\$ can define by differential current and equivalent resistor between sense contact and current contact as

$$V_{\Delta I} = V_{R12} - V_{R23} = I_{CC2}R_{12} - I_{CC3}R_{23} \quad (6)$$

$$V_{\Delta I} = (I_{CC2})(R_{12} - \Delta R_{12}) - (I_{CC3})(R_{23} + \Delta R_{23}) \quad (7)$$

For roughly estimate, we assume that the resistance \$R\_{12}\$ and \$R\_{23}\$ as well as \$\Delta R\_{12}\$ and \$\Delta R\_{23}\$ are identical values since symmetrical structure of VHD (in the absence of magnetic field). The differential current is given by

$$\Delta I = \frac{I_{CC2} - I_{CC3}}{2} \quad (8)$$

The existence of magnetic field, a resistance of a VHD can be changed that depends on the magnetic field. It is the magnetoresistance effect. This effect is influence on the resistance of \$R\_{12}\$ and \$R\_{23}\$ as well as \$\Delta R\_{12}\$ and \$\Delta R\_{23}\$, hence the bulk resistance \$R\_{12}\$ and \$R\_{23}\$ are changed by \$\Delta R\_{12}\$ and \$\Delta R\_{23}\$.

### III. SIMULATION , RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we present the simulation of magnetic response of VHD. The simulated structure of VHD depicted in Fig. 4. The current contacts (CC1, CC2, CC3) and sense contacts (SC1, SC2) are identical with dimensions \$l\_c = 5 \mu m\$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

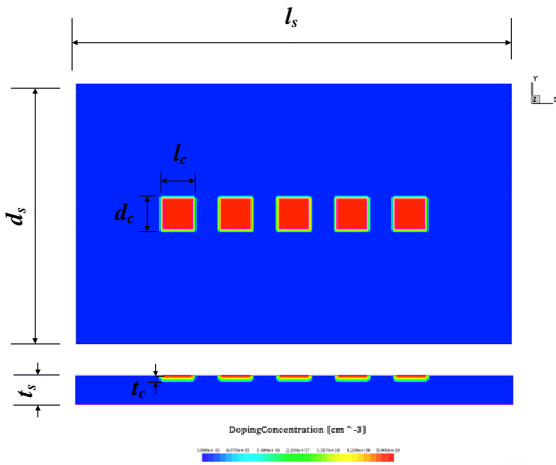


Fig. 4. The simulated structure of VHD

$d_c = 5 \mu\text{m}$ , and  $t_c = 1 \mu\text{m}$ . The contacts were doped  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ . The gap between overall contacts is equidistant ( $5 \mu\text{m}$ ). The effective area of VHD is thickness  $d_s = 25 \mu\text{m}$ , the length of device is  $l_s = 75 \mu\text{m}$ , and its depth is  $t_s$ . The depth of device  $t_s$  will be varied to achieve purpose of this work.

For simulation of VHD by using TCAD, we use galvanic transport model to simulate the magnetic respond [7]. The VHD have been simulated in 2D under condition of varying magnetic field up to 0.4 T and biased constant current 0.5 mA thru contact CC1. The magnetic responding of VHD by simulation is shown in Fig. 5 and 6. We have simulated the magnetic responding of seven VHD with various depth 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , and 150  $\mu\text{m}$ , respectively.

Fig. 5 and 6, It is clearly seen the output voltage ( $V_{\text{output}}$ ) responding to magnetic field and the differential current ( $\Delta I$ ) responding to magnetic field are linearity and increase with the depth. In other words, the depth is strongly influence on the output voltage of device. From previously estimate before, we can approximate the generated voltage from differential current ( $V_{\Delta I}$ ) by equation (7) which  $V_{\Delta I}$  are directly proportional to the differential current ( $\Delta I$ ). Therefore  $V_{\Delta I}$  are increased by  $\Delta I$ .  $V_{\Delta I}$  in term of percentage of various depths is illustrated in Fig. 7.

Fig. 7 represents the percentage of  $V_{\Delta I}$  ( $\%V_{\Delta I}$ ) at various depths. The  $\%V_{\Delta I}$  is about 25 to 45% of overall output voltage. In range of depth 5 to 70 micrometers,  $\%V_{\Delta I}$  has high variation until the depth above 70 micrometers, it will be stable. The deep device allows current distribute deep into substrate whereas the shallow device will push the current enclose to the surface. The devices which are deep enough will lead a saturation of distribution current. Hence the depths over 70 micrometers are not increase the differential current. From simulated results, we can evaluate sensitivity of each device by equation (3) and (4). The sensitivity of generated voltage from differential current, Hall voltage from Lorentz's force and overall output voltage are illustrated in Fig. 8, 9, and 10. The results in Fig. 8 and 9 show various sensitivity of  $V_{\Delta I}$  when the depths are increased. The deep devices contribute current distribution into substrate whereas the shallow devices restrict current distribution into substrate. Therefore differential current component are increased by current distribution deep into substrate.

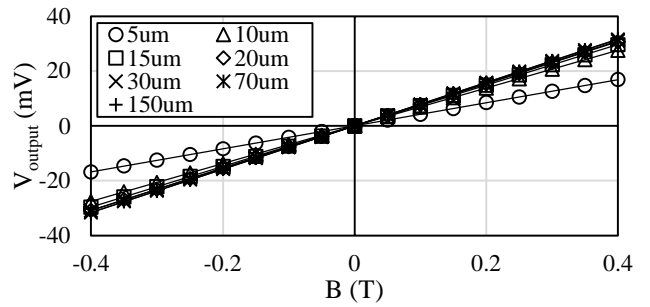


Fig. 5. Output voltage responding to magnetic field of VHD.

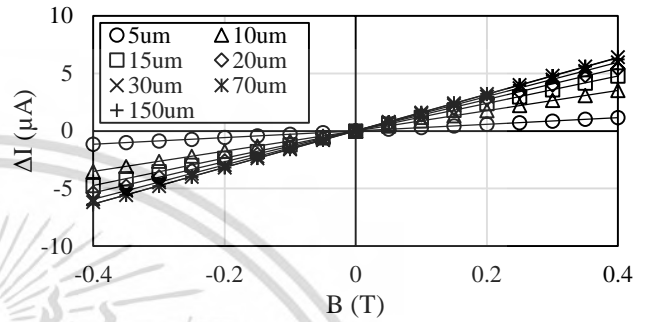


Fig. 6. The differential current responding to magnetic field of VHD.

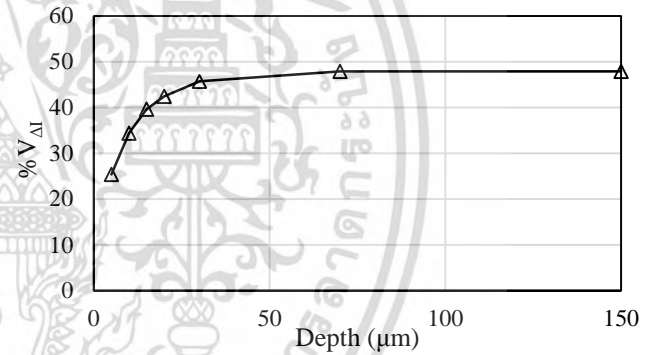


Fig. 7. The generated voltage from differential current in term of percentage of overall output voltage at various depths.

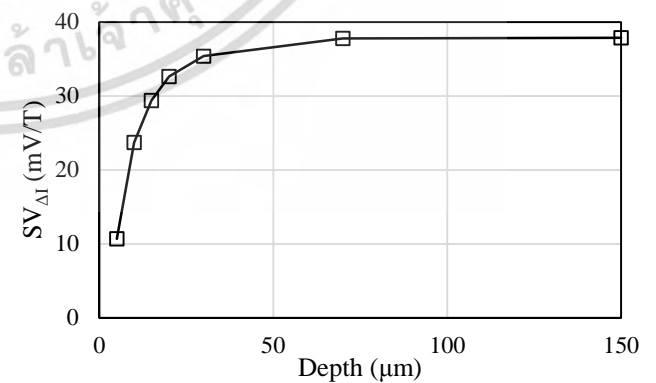


Fig. 8. Sensitivity of generated voltage from differential current at various depths.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

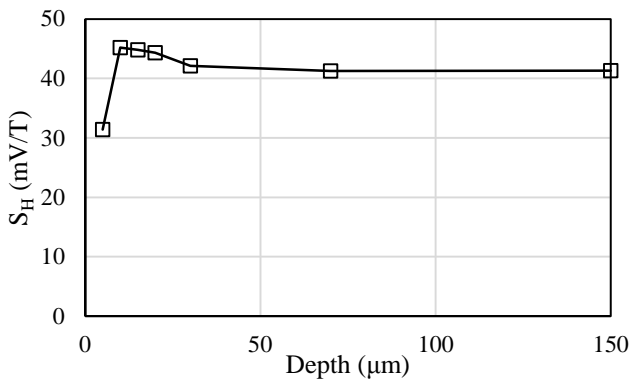


Fig. 9. Sensitivity of Hall voltage by Lorentz's force at various depths.

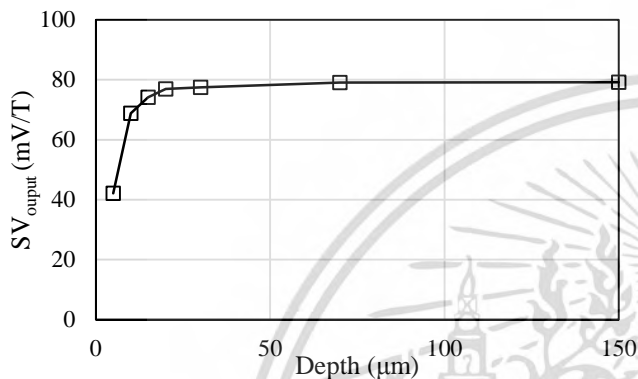


Fig. 10. Sensitivity of device (sensitivity of overall output voltage) at various depth.

The sensitivity of Hall voltage are varied by the depth as same as the sensitivity of  $V_{Hl}$ . The maximum sensitivities are in a range of 15 to 30 micrometers. Thus sensitivity of our devices is mostly from Hall voltage in this range. Device which has depth above 70 micrometers, the sensitivity of devices from Hall voltage and voltage from differential current are equally. For this reason, our VHDs which are deep enough will have positive impact on Hall voltage and generated voltage from differential current.

#### IV. CONCLUSION

In this study, we present the effect of substrate depth to vertical Hall device VHD. The mechanisms of this device are mainly from Hall voltage from Lorentz's force and differential current from magnetoresistance. We simulated VHD with seven depths. The depth affects both Hall voltage from Lorentz's force and differential current. At low depth, the percentage of voltage from Lorentz's force is much greater than the voltage from differential current. From simulation results, the percentage of generated voltage from differential current is increased when depth is increasing. In range of depth 5 to 70 micrometers, generated voltage from differential current has high variation until the depth above 70 micrometers generated voltage from differential current will be stable at about 45% of overall output voltage. The deep device is suitable for differential current mechanism hence it has positive effect to sensitivity of VHD.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center for supporting the TCAD simulation.

#### REFERENCES

- [1] R.S. Popovic, "The vertical Hall-effect device", IEEE Electron Device Letters, vol. EDLS (9), pp. 357-358, 1984.
- [2] Siya V. Lozanova and Chavdar S. Roumenin, "Parallel-Field Silicon Hall Effect Microsensors With Minimal Design Complexity", IEEE Sensors Journal, vol. 9, No.7, July 2009.
- [3] T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai "The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device", [Proceeding of International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computers, Telecommunications and Information Technology, June 28 -July 1, Chiang Mai, Thailand, 2016]
- [4] Elva Jovanovic, Danijela Pantic, and Dragan Pantic, "Simulation of Vertical Hall Sensor in High-voltage CMOS Technology", [Proceeding of TELSIS, 1-3 October 2003]
- [5] J. Pascal, L. Hebrard, J. B. Kammerer, V. Frick, J. P. Blonde, "First Vertical Hall Device in standard 0.35 μm CMOS Technology", Sensor and Actuators A : Physical, vol. 147, 15 September 2008, pp. 41-46.
- [6] J. Pascal, L. Hebrard, J. B. Kammerer, V. Frick, J. P. Blonde, "Intrinsic limit of the sensitivity of CMOS integrated vertical Hall devices", Sensor and Actuators A : Physical, vol. 152, 21 May 2009, pp. 21-28.
- [7] TCAD Sentaurus Manual, Synopsys, Version L-2016.03.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	14 มกราคม พ.ศ. 2536
ที่อยู่	17/6 หมู่ 14 ต. าบส่าช้าง อําเภอลําพูนจํายกัรตี จังหวัตนครราชสีมา 30230
ประวัติการศึกษา	2558 ส ำเัรกการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. สวัสดิพงษ์ พูลสวัสดิ์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล และ อัมพร โพธิ์โย “การจำลองแบบเพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสเบี่ยงเบนบนอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 รอยสัมผัส” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 (EENET 2016), 25-27 พฤษภาคม, ภูเก็ต, ประเทศไทย, 2559
2. T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai “The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 13<sup>th</sup> (ECTI-CON 2016), June 28–July 1, Chiang Mai, Thailand, 2016.
3. S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai “Effect of Substrate Depth to 5-Contact Vertical Hall” International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 14<sup>th</sup> (ECTI-CON 2017), 27-30 June, Phuket, Thailand, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้