

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
แมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กความเร็วสูง
High Sensitivity Nonmagnetic Material Magnetoresistance



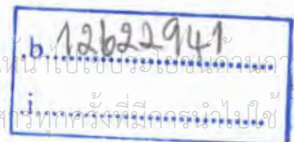
ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2555
คณะวิศวกรรมศาสตร์

RCH สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๗๕๗๑๘

๒๕๕๕



สงวนลิขสิทธิ์โดยทั้งสิ้น ลิดทิ้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

เลขทะเบียน 137349

วันเดือนปี 22 ต.ค. 2558

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการเอื้อเฟื้อสถานที่ ห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในการวิจัยต้นแบบ และศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายประทีป ไทเศรษฐวัฒน์ กุล ในการสร้างอุปกรณ์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงแก่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นกัลยามิตรไม่ว่าโดยตรง หรือโดยอ้อมก็ตาม อาทิเช่นคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนสนับสนุน เป็นต้น และหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนการวิจัยในโอกาสต่อไป



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล
(หัวหน้าโครงการ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...แมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กความไวสูง
ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) High Sensitivity Nonmagnetic Material Magneto-resistance
แหล่งเงิน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
ประจำปีงบประมาณ 2555
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2555
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล
..... รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล (หัวหน้าโครงการ)
..... สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
..... คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำสำคัญ (Keywords) Magneto-resistance, Current mode Hall Effect, Nonmagnetic
Material.....

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบเพื่อเพิ่มผลปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์แบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทซึ่งโครงสร้างแบบนี้จะทำให้พื้นที่ภายในวงแหวนมีสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็นศูนย์จึงส่งผลให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์อย่างเต็มที่และยังเป็นโครงสร้างที่ออกแบบง่ายไม่ซับซ้อนเพราะไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทซึ่งระยะห่างของอลูมิเนียมส่งผลโดยตรงกับปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรายังศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนผลของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ โดยพารามิเตอร์ที่เราใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ ชนิดของวัสดุ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ โดยในการจำลองแบบเราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน โดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD ในการจำลองการทำงาน ซึ่งโครงสร้างฮอลล์แบบใหม่ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่ดีกว่าโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมเมื่อโครงสร้างฮอลล์แบบใหม่สร้างจากวัสดุที่มีค่าโมบิลิตี้สูง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยและใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ โดยการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากที่สุดคือ 2883.724% ซึ่งมากกว่าแบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมถึง 906.265% เมื่อสร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, อุณหภูมิ 200 เคลวิน

Abstract

This project presents the new design which contributes to magnetoresistance effect on Hall plate structure. The new design on Hall plate is designed with rectangular aluminum ring surrounding on Hall plate. A new design creates zero Hall voltage area which the carriers move and deflect freely. It is easier design than the classical series resistance on Hall plate because the distance of aluminum space affects to magnetoresistance. This thesis also presents the parameters which contribute to magnetoresistance on Hall plate structure such as material type, doping concentration and temperature. Parameters which are used in this experiment are silicon and gallium arsenide at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at temperature 200, 250 and 300K with Sentaurus TCAD program for simulation. The new design has the percentage of magnetoresistance effect more than the classical series resistance on Hall plate when it is designed with high mobility material, low doping concentration and low temperature. Ones have changed the most up to 2883.724% or 906.265% more than classical series resistance when they are made of GaAs at $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ doping concentration, 200K.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	i
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	ix
สารบัญรูป.....	x
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์.....	6
2.2 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท (Hallplate sensor).....	14
2.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect).....	16
2.3.1 Physical magnetoresistance effect.....	16
2.3.2 Geometrical magnetoresistance effect.....	17
2.4 พารามิเตอร์ที่มีช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์.....	19
2.4.1 ผลของการชนกัน.....	20
2.4.2 ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่มีผลต่อความคล่องตัวของพาหะ.....	22
บทที่ 3 โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ.....	25
3.1 บทนำ TCAD.....	25
3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation).....	25
3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation).....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD.....	28
3.2.1 Sentaurus Workbench.....	28
3.2.2 Sentaurus Process	29
3.2.3 Sentaurus Structure Editor.....	30
3.2.4 Sentaurus Device.....	32
3.2.4.1 File.....	32
3.2.4.2 Electrode.....	33
3.2.4.3 Physics.....	34
3.2.4.4 Plot.....	34
3.2.4.5 Solve.....	35
3.2.5 Tecplot SV.....	35
3.2.6 Inspect.....	36
3.3 การจำลองแบบการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดย TCAD.....	36
3.3.1 ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	37
3.3.1.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท.....	37
3.3.1.2 การกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า.....	38
3.3.1.3 การแบ่งกริด(grid) ให้กับตัวอุปกรณ์.....	38
3.3.1.4 โครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ.....	39
3.3.2 การจำลองแบบการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท	39
3.3.2.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท.....	40
3.3.2.2 สร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	40
3.3.2.3 กำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม.....	40
3.3.2.4 การแบ่งกริด(grid) บนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	41
3.3.2.5 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ.....	42
3.3.3 การออกแบบโดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	42
3.3.3.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท.....	44

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.3.2	สร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	44
3.3.3.3	กำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	45
3.3.3.4	การแบ่งกริด(grid) บนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	46
3.3.3.5	โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ.....	46
3.3.4	การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง.....	47
3.4	พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีตร็อสแตติกโดยการจำลองแบบ TCAD...48	
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลองปรากฏการณ์แมกนีตร็อสแตติกที่โครงสร้างฮอลล์เพลท.....	49
4.1	ปรากฏการณ์แมกนีตร็อสแตติกบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	50
4.1.1	ซิลิคอนฮอลล์เพลท.....	51
4.1.2	แกลเลียมอาร์เซไนด์ฮอลล์เพลท.....	52
4.2	พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีตร็อสแตติกบนโครงสร้างฮอลล์เพลท...54	
4.2.1	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ.....	55
4.2.1.1	ซิลิคอน.....	55
4.2.1.2	แกลเลียมอาร์เซไนด์.....	56
4.2.2	ชนิดของวัสดุ.....	56
4.2.3	อุณหภูมิ.....	57
4.2.3.1	ซิลิคอน.....	57
4.2.3.2	แกลเลียมอาร์เซไนด์.....	58
4.3	การอนุกรมค่าความต้านทานบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	59
4.3.1	ซิลิคอน.....	62
4.3.2	แกลเลียมอาร์เซไนด์.....	63
4.4	พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีตร็อสแตติกของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	63
4.4.1	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ.....	64
4.4.1.1	ซิลิคอน.....	64
4.4.1.2	แกลเลียมอาร์เซไนด์.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ชนิดของวัสดุ.....	65
4.4.3 อุณหภูมิ.....	66
4.4.3.1 ซิลิคอน.....	66
4.4.3.2 แกลเลียมอาเซไนด์.....	67
4.5 การใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	71
4.6 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างที่ใช้วงแหวน อลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	73
4.6.1 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ.....	74
4.6.1.1 ซิลิคอน.....	74
4.6.1.2 แกลเลียมอาเซไนด์.....	75
4.6.2 ชนิดของวัสดุ.....	75
4.6.3 อุณหภูมิ.....	76
4.6.3.1 ซิลิคอน.....	76
4.6.3.2 แกลเลียมอาเซไนด์.....	77
4.7 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนท์ระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบ.....	78
บทที่ 5 การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์.....	80
5.1 ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer cleaning).....	80
5.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process).....	80
5.2.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation).....	80
5.2.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation).....	81
5.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process).....	81
5.4 การกัด (Etching).....	83
5.5 การลอกชั้นไวแสงออกจากแผ่นผลึก.....	83
5.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion).....	84
5.6.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....	84
5.6.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....	85
5.7 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization).....	86
5.8 กระบวนการสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	88
5.8.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design).....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.8.2 การสร้างโครงสร้างเพื่ออนุรักษ์ความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	89
5.8.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well.....	90
5.8.2.2 ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+).....	91
5.8.2.3 ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม.....	92
5.8.2.4 ขั้นตอนการสร้างกั๊ดชั้นโลหะ.....	93
5.9 กระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์แบบใหม่โครงสร้างฮอลล์เพลท.....	94
5.9.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design).....	94
5.9.2 การสร้างโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	96
5.9.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well.....	96
5.9.2.2 ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+).....	97
5.9.2.4 ขั้นตอนการสร้างกั๊ดชั้นโลหะ.....	99
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	101
เอกสารอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก (ก) คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ.....	108
ภาคผนวก (ข) โปรแกรมจำลองแบบ TCAD.....	109
ภาคผนวก (ค) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงพารามิเตอร์ในโมเดลที่เกี่ยวกับสภาพคล่องของพลาสมา.....	47
4.1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน บนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	59
4.2 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ของ การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	68
4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ที่กระยะห่างของอะลูมิเนียม.....	70
4.4 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ของโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอะลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	78
4.5 แสดงค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ระหว่างโครงสร้าง ทั้ง 2 แบบของวัสดุ 3 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน.....	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	6
2.2 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง z.....	8
2.3 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (n_i).....	10
2.4 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์.....	14
2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก).มุมมองด้านบน และ (ข).ภาคตัดขวาง.....	15
2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก).มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง.....	16
2.7 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect.....	17
2.8 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect.....	17
2.9 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s)	18
2.10 โครงสร้างของแมกนีโทรีซิสแตนซ์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลท.....	18
2.11 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	19
2.12 แสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆในผลึกสารของแข็ง เมื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำและมีการชนกับแลตทิซ.....	21
2.13 การเปลี่ยนแปลงสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่างๆกัน.....	23
2.14 แสดงค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ (ก). ซิลิคอน (ข) แกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่างๆที่ 300 K.....	24
3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง.....	27
3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD.....	27
3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	28
3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench.....	29
3.5 แสดงส่วนของการอิมพลานเทชันใน Sentaurus Process.....	29
3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor	30
3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน.....	31
3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด	31
3.9 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV.....	35
3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect.....	36
3.12 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD.....	37
3.13 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD.....	38
3.14 แสดงการแบ่งกริดบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	38
3.15 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	39
3.16 แสดงลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม.....	40
3.17 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมจากการ จำลองแบบ TCAD.....	41
3.18 แสดงการแบ่งกริดของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	41
3.19 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	42
3.20 แสดงประจุทางด้านข้างบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	43
3.21 โครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบ ฮอลล์เพลทโดยมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมกับหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตร.....	44
3.22 แสดงลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียม รูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	45
3.23 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยม ล้อมรอบฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD.....	45
3.24 แสดงการแบ่งกริดของโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียม รูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	46
3.25 แสดงโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	46
4.1 โครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	49
4.2 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งที่ความเข้มข้น อะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของซิลิคอนฮอลล์เพลท.....	51
4.3 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน.....	52
4.4 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งที่ความเข้มข้นอะตอม สารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของแกลเลียมอาเซนไนด์ฮอลล์เพลท.....	53

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน.....54
4.6	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของซิลิคอนฮอลล์เพลท.....55
4.7	การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท.....56
4.8	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์.....57
4.9	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$58
4.10	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$58
4.11	โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....60
4.12	แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวอนและศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งของการอนุกรม ค่าความต้านทานรวมบนซิลิคอนฮอลล์เพลท.....61
4.13	แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของฮอลล์เพลท และการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน.....62
4.14	แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของฮอลล์เพลท และการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์.....63
4.15	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ อุณหภูมิ 300 เคลวิน บนฐานรองซิลิคอน.....64
4.16	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่ อุณหภูมิ 300 เคลวิน บนฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์.....65
4.17	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน โครงสร้างฮอลล์เพลทของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์.....66
4.18	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีตรึชิสแดนท์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน โครงสร้างฮอลล์เพลทกับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองซิลิคอน...67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 เปร้รเซ็นต์การเปล่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่กับอุณหภูมิที่ความเข้มชั้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์.....	67
4.20 แสดงการเปร่ยนเทียบประยะท่างของอะลูมิเนียมของการอนุกรมค่าความต้านทานรวม บนโครงสร้างซิลิคอนฮอลล์เพลท.....	70
4.21 โครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบ ฮอลล์เพลท.....	71
4.22 แสดงการเปร่ยนเทียบค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน โครงสร้างฮอลล์เพลทและโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท ที่ความเข้มชั้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน.....	72
4.23 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวอนและค้กดาที่เท่ากันในแนวตั้งที่ความเข้มชั้นอะตอม สารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน.....	73
4.24 เปร้รเซ็นต์การเปล่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่กับความเข้มชั้นอะตอมสารเจือที่ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน.....	74
4.25 เปร้รเซ็นต์การเปล่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่กับความเข้มชั้นอะตอมสารเจือที่ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์.....	75
4.26 เปร่ยนเทียบเปร้รเซ็นต์การเปล่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่ของวัสดุ 2 ชนิด.....	76
4.27 เปร้รเซ็นต์การเปล่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มชั้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองซิลิคอน.....	77
4.28 เปร้รเซ็นต์การเปล่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนท่ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มชั้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์.....	77
5.1 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด.....	82
5.2 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนพื้นผิวฐานรองด้วยการหมุน.....	83
5.3 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ.....	84
5.4 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวขาอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก.....	86
5.5 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation).....	87
5.6 มาส์คตันแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวม.....	89
5.7 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างบ่อ n-well.....	90
5.8 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น n^+	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกและลวดลายที่ต้องการ.....	92
5.10 แสดงขั้นตอนกระบวนการกัดชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก.....	93
5.11 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	94
5.12 มาส์คต้นแบบกระบวนการสร้างการใช้วงแหวนลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	95
5.13 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างบ่อ n-well.....	96
5.14 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น p^+	98
5.15 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก.....	99
5.16 แสดงขั้นตอนกระบวนการกัดชั้นโลหะเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายที่ต้องการ.....	99
5.17 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	100
6.1 แสดงสภาพคล่องของพาหะเนื่องจากอุณหภูมิที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองซิลิคอน จากโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD.....	103

บทที่ 1

บทนำ

แม่เหล็ก (magnet) เป็นสิ่งที่สามารถดูดวัสดุบางชนิดได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูดสารบางอย่างได้ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ในบริเวณโดยรอบ เราสามารถตรวจสอบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหรือไม่โดยใช้เข็มทิศ แต่เราไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าใด นักวิทยาศาสตร์พยายามวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการต่างๆ แต่ในปัจจุบันเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวกและรวดเร็ว โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)^[1-4] ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นจากโครงสร้างวัสดุที่เป็นแท่งตัวนำยาวหรือเรียกว่าฮอลล์เพลท เมื่อให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าในตัวนำ ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดจากพาหะนำประจุเคลื่อนที่ด้วยผลของแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท เมื่อแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำสมดุลกับแรงลอเรนซ์ จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเช่นเดิมโดยไม่มี การเปียงเบนอีก^[5] ซึ่งตลอดหลายปีที่ผ่านมา ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้นำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษาเรียนรู้ รวมถึงนำไปสร้างตัวอุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ^[6,7] เป็นต้น

นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทแล้ว เรายังสามารถพบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์^[8-10] ในโครงสร้างฮอลล์เพลทได้อีกด้วย เนื่องจากวัสดุจำนวนมากเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก^[11] ดังนั้นเพื่อให้ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทมีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้น เราสามารถทำได้โดยการออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีขนาดสั้นหรือมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ เพื่อให้แรงลอเรนซ์มีค่ามากกว่าแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ทำให้กระแสเกิดการเปียงเบนซึ่งการเปียงเบนของกระแสทำให้เกิดผลของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น^[12,13] จากแนวคิดนี้เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทได้โดยการอนุกรมค่าความต้านทานรวมเพื่อเปรียบเสมือนการอนุกรมแผ่นฮอลล์เพลทที่มีขนาดความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ นำมาอนุกรมกันเพื่อให้ค่าความต้านทานรวมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้มีข้อเสียเปรียบในเรื่องของการออกแบบที่ยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมจะมีผลกับปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ดังนั้นเราจึงทำการศึกษาโครงสร้างแบบใหม่เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างก่อนหน้านี้ โดยการใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท^[14] ซึ่งจะทำให้พื้นที่ภายในวงแหวนสี่เหลี่ยมมีแรงดันฮอลล์เป็นศูนย์ซึ่งจะทำให้พาหะเกิดการเปียงเบนได้เต็มที่จึงทำให้โครงสร้างแบบใหม่ให้ผลแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่ดีกว่าแบบเดิม แต่อย่างไรก็ตามได้มีการค้นพบว่าปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์สามารถเพิ่มขึ้นอย่างมีระยะสำคัญได้เมื่ออยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสม^[15-18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นจากโครงสร้างวัสดุที่เป็นแท่งตัวนำยาวหรือเรียกว่าฮอลล์เพลท เมื่อให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นโดยมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าในตัวนำ ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดจากพาหะนำประจุเคลื่อนที่ด้วยผลของแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลททำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้น เมื่อแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้พาหะไม่เกิดการเบี่ยงเบนอีก ในโครงสร้างฮอลล์เพลทปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยซึ่งเราสามารถทำให้โครงสร้างฮอลล์เพลทมีปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์เพิ่มขึ้นได้โดยการออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีความยาวที่สั้นกว่าความกว้างมากๆ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทขึ้น จากหลักการนี้เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างของฮอลล์เพลทโดยการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งการออกแบบโครงสร้างนี้เป็นการออกแบบที่ค่อนข้างที่ยากเพราะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม จึงทำให้ผลแมกนีโตริซิสแดนท์เกิดขึ้นไม่เต็มที่เมื่อระยะห่างของอลูมิเนียมมากพอที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างการออกแบบขึ้นมาใหม่ให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนออกแบบง่ายและไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียม โดยการใช่วงแหวนอลูมิเนียมมาสร้างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท ซึ่งการออกแบบนี้จะทำให้พื้นที่ภายในกรอบสี่เหลี่ยมมีสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็นศูนย์ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนอย่างเต็มที่ โดยการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก^[19] ทำให้แมกนีโตริซิสแดนท์โครงสร้างฮอลล์แบบใหม่สามารถทดแทนแบบอนุกรมได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการจำลองแบบโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมทั้งพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ โดยเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานอนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งพารามิเตอร์ที่เราจะใช้ในการจำลองการทำงานได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ โดยในการทดลองเราจะใช้โครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดความยาว 400 ไมโครเมตร, กว้าง 100 ไมโครเมตร และหนา 1 ไมโครเมตร โดยในการจำลองแบบเราใช้สนามแม่เหล็กที่ 0 -3 เทสลา

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท
2. พัฒนาและปรับปรุงผลของแมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยส่งเสริมและสนับสนุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาการออกแบบโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมเพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทและระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมที่มีผลกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์
4. ศึกษาการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทซึ่งเป็นโครงสร้างที่ออกแบบง่ายและไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม
5. เปรียบเทียบโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทกับโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทที่มีต่อปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์
6. นำพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์มาประยุกต์ใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. ในโครงสร้างของฮอลล์เพลทสามารถเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์เป็นจำนวนมากได้เมื่ออยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสม
2. ในการออกแบบที่ให้ค่าความต้านทานอนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทเพื่อเพิ่มผลของแมกนีโตริซิสแดนท์ยังไม่สามารถให้ผลของแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ดีพอเมื่อระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมมีระยะที่ห่างกันมาก
3. โครงสร้างแบบใหม่ที่ใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทสามารถที่จะทำให้พื้นที่ภายในวงแหวนมีสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็นศูนย์และเป็นโครงสร้างที่ออกแบบได้ง่ายกว่าเพราะไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม
4. โครงสร้างแบบใหม่ที่ใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดมากกว่าโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานอนุกรมกันซึ่งจะทำให้ผลของแมกนีโตริซิสแดนท์มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

สนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดจากพาหะนำประจุเคลื่อนที่ด้วยผลของแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลททำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นเมื่อแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้พาหะไม่เกิดการเบี่ยงเบนอีกจึงทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์มีค่าน้อยลง ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการพัฒนาและปรับปรุงผลแมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท เพื่อให้สนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างไม่สามารถเกิดขึ้นมาได้ แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้มีข้อเสียเปรียบในเรื่องของการออกแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ยุ่งยากเพราะต้องคำนึงถึงระยะห่างของอลูมิเนียมซึ่งมีผลต่อปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทซึ่งเป็นโครงสร้างที่ออกแบบง่ายเพราะไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมและยังทำให้พื้นที่ภายในวงแหวนเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็นศูนย์ ดังนั้นในงานวิจัยเราจึงทำการเปรียบเทียบปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์กับโครงสร้างทั้ง 2 แบบ ปรากฏว่าผลของแมกนีโตริซิสแดนท์มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 20.0 % ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่สนามแม่เหล็ก 0- 3 เทสลา อีกทั้งโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทยังสามารถแก้ปัญหาในเรื่องของระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมและยังสามารถให้ผลแมกนีโตริซิสแดนท์ได้ดีกว่าโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมอีกด้วย เมื่อสร้างจากวัสดุที่มีค่าสภาพคล่องของพาหะที่สูง

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยสำหรับงานวิจัยนี้ เราศึกษาการออกแบบโครงสร้างใหม่เพื่อเพิ่มผลแมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม หลังจากนั้นนำพารามิเตอร์ต่างๆ มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มผลปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างทั้ง 2 แบบ ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนโครงสร้างของฮอลล์เพลทและปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างของฮอลล์เพลท
2. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD
3. ศึกษาผลแมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย TCAD
4. ศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท
5. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD
6. ศึกษาผลปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมและระยะห่างของอลูมิเนียมที่มีผลต่อปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทด้วยโปรแกรมการจำลองการทำงาน TCAD
8. เปรียบเทียบผลแมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลททั้งสองแบบที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย TCAD
9. นำพารามิเตอร์ที่ได้ทำการศึกษามาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างทั้ง 2 แบบ เพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์ในโครงสร้างทั้งสองแบบ
10. นำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ในกระบวนการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์

โดยเนื้อหาในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษาสำหรับงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท คุณสมบัติทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ และแนวคิดในการจำลองการออกแบบเพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์แบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

บทที่ 3 โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD และการจำลองแบบการทดลอง

กล่าวถึงเทคโนโลยี TCAD เบื้องต้นและการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม TCAD ในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

ผลการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทและปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์ทั้งโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทและโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช่วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมทั้งประยุกต์ใช้พารามิเตอร์เพื่อช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์ รวมถึงเปรียบเทียบผลแมกนีโตรีซิสแดนท์ที่ได้จากการจำลองการทำงานของโครงสร้างทั้ง 2 แบบ

บทที่ 5 การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง สรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการจำลองการทำงานและข้อเสนอแนะต่างๆ

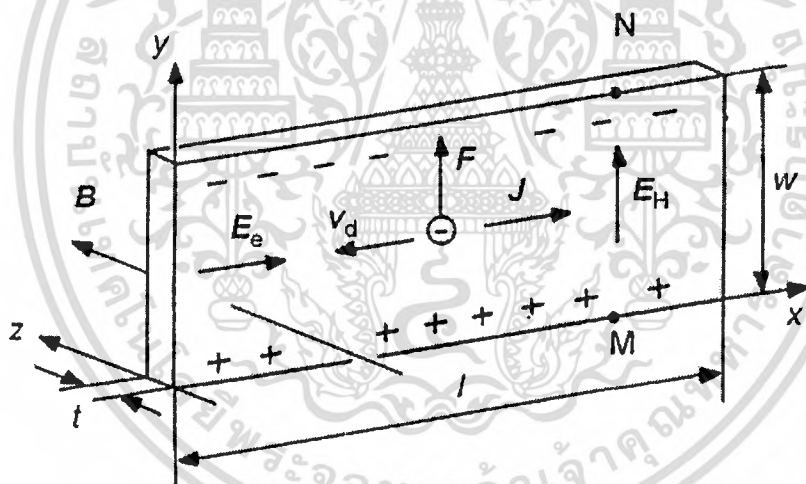
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซ็นเซอร์แม่เหล็ก (Magnetic Sensor) เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานจากปรากฏการณ์หลายอย่างด้วยกัน เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect), ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect) หรือ ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ เป็นต้น ซึ่งตลอดหลายปีที่ผ่านมา ปรากฏการณ์ฮอลล์ และปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ได้นำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษาเรียนรู้ รวมถึงนำหลักการของฮอลล์มาใช้สร้างอุปกรณ์หลายชนิดเช่น คีย์บอร์ด (Keyboards), แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometers), เซ็นเซอร์วัดระยะ (displacement sensors) รวมถึงแมกเนติกเซ็นเซอร์ (magnetic sensors) ต่างๆ มากมาย เป็นต้น

2.1 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)



รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.1^[20] ซึ่งแสดงอุปกรณ์ฮอลล์เพลทในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความกว้าง w ยาว l และหนา t เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามไฟฟ้า E_e ในทิศทาง $+x$ จะทำให้เกิดมีแรงกระทำกับประจุพาหะ วัสดุเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นพาหะส่วนมากคืออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบดริฟท์ด้วยความเร็วค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “ความเร็วดริฟท์” (Drift velocity: V_d) โดยมีทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าคือทิศลบ x และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า I_x ไหลในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือก็คือมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้า เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้สนามแม่เหล็ก B ในทิศทาง $+z$ และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส I_x พบว่าจะมีแรงกระทำต่อพาหะเกิดขึ้น ซึ่งแรงที่กระทำต่อพาหะนี้เรียกว่า “แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force: F_L)” ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนไปด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทางทิศ $+y$ ส่วนทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศทาง $-y$ จะเกิดประจุไฟฟ้าชนิดตรงกันข้ามอีกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือ โฮล (hole) สิ่งนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นซึ่งเรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H มีทิศทาง $+y$ สนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้เกิดแรงไฟฟ้ากระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางทิศ $-y$ เมื่อแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทาง $+x$ เช่นเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอีก เมื่อทำการวัดแรงดันทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศ y จะพบแรงดันฮอลล์ (V_H) ขึ้น ซึ่งแรงดันฮอลล์หาได้จากสมการที่ 2.1

$$V_H = R_H I_x B_z / t \quad (2.1)$$

R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall constant) จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าแรงดันฮอลล์จะแปรผกผันกับความหนาของแผ่นฮอลล์เพลท

จากที่กล่าวก่อนหน้านี้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ (F_L) ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2

$$\vec{F}_L = -q(\vec{v}_x \times \vec{B}_z) \quad (2.2)$$

v_x คือ ความเร็ว drift เฉลี่ยของประจุพาหะในทิศทาง x

อิเล็กตรอนจะถูกเบี่ยงเบนด้วยแรงลอเรนซ์ ในทิศทาง $+y$ ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทส่วนทิศทาง $-y$ ก็เกิดพาหะประจุอีกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือโฮล สิ่งนี้จะสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก สนามไฟฟ้าฮอลล์ในขณะนี้หาได้จากสมการที่ 2.3

$$E_H = v_x B_z \quad (2.3)$$

ความหนาแน่นกระแส J_x คือ

$$J_x = nq v_x \quad (2.4)$$

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน $= -1.6 \times 10^{-19}$ คุลอมบ์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 และ 2.4 สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H จะแสดงตามสมการที่ 2.5

$$E_H = -J_x B_z / nq \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูณทั้งสองข้างด้วยความกว้าง w ก็จะได้

$$E_H w = -J_x w t B_z / n q t \quad (2.6)$$

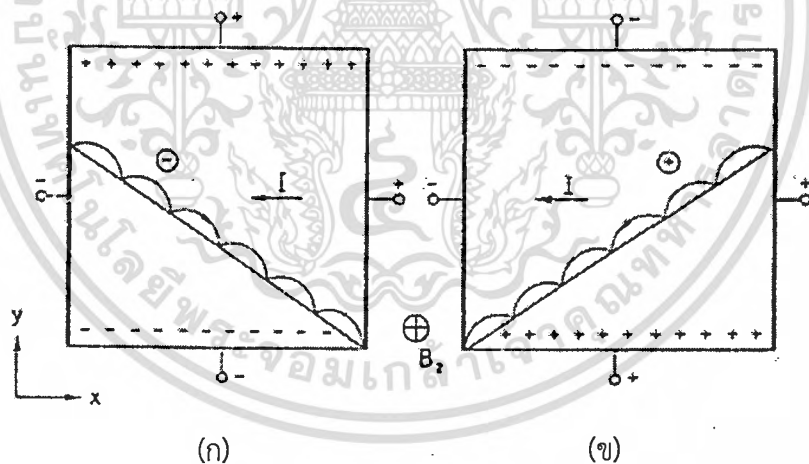
ดังนั้นแรงดันฮอลล์จะได้

$$V_H = -I_x B_z / n q t \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.7 กับสมการที่ 2.1 จะได้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) ของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.8

$$R_H \text{ (electrons)} = -1/nq \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) จะแปรผกผันกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration) สิ่งนี้จึงอธิบายความจริงที่ว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำจะมีมากกว่าในโลหะ อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ถูกเบี่ยงเบนด้วยผลของสนามแม่เหล็ก^[9] แสดงในรูปที่ 2.2(ก) นำไปสู่แรงดันฮอลล์ที่มีค่าเป็นลบ โวลท์ก็เป็นพาหะนำไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำ แรงลอเรนซ์ F_L ของประจุพาหะที่เป็นบวกเช่นโฮลจะตรงข้ามกับประจุพาหะที่เป็นลบ ซึ่งส่วนของโฮลจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2(ข) แรงดันฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) มีค่าเป็นบวก



รูปที่ 2.2 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามแม่เหล็กในทิศทาง z

จากรูปที่ 2.2 พาหะทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลเมื่อเคลื่อนที่ด้วยผลของสนามแม่เหล็กจะเกิดการชนกับแลตทิซ (lattice) หรืออะตอมสารเจือ^[21,22] แต่ละการชนความเร็วของพาหะจะลดลงเป็นศูนย์ และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอีกครั้งด้วยผลของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และแรงลอเรนซ์ F_L ในทิศทาง y สำหรับสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีค่าเป็นบวกตามสมการที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_H \text{ (holes)} = +1/pq \quad (2.9)$$

การได้มาถึงสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นสามารถหาได้จากที่กล่าวมา แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารชนิดอินทรีนซิคเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กพหุประจุทั้งสองชนิดจะเบี่ยงเบนไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้กระแสไหลในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทาง y แสดงตามสมการที่ 2.10

$$E_H = E_y = v_x B_z \quad (2.10)$$

เมื่อมีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟท์ (Drift velocity)

$$v_x = -\mu_n E_x \quad (2.11)$$

ที่ μ_n คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าเป็นบวก สำหรับความหนาแน่นกระแสในทิศทาง y จะได้

$$J_{ny} = qn\mu_n E_y \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.10 – 2.11 เราจะพบว่า $J_{ny} = -qn\mu_n^2 B_z E_x$ (2.13)

สำหรับโฮลจะได้ $J_{py} = +qp\mu_p^2 B_z E_x$ (2.14)

สำหรับความหนาแน่นกระแสทั้งหมดในทิศทาง y แสดงในสมการที่ 2.15

$$J_y = q(n\mu_n + p\mu_p) E_y \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.15 จะเท่ากับผลบวกของสมการที่ 2.13 กับ 2.14

$$q(n\mu_n + p\mu_p) E_y = -q(n\mu_n^2 - p\mu_p^2) B_z E_x \quad (2.16)$$

ดังนั้นสนามไฟฟ้า E_y จะแสดงตามสมการที่ 2.17

$$E_y = (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) B_z E_x / (p\mu_p + n\mu_n) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสนามไฟฟ้าฮอลล์ $E_y = R_H J_x B_z$ (2.18)

และความหนาแน่นกระแส $J_x = q(n\mu_n + p\mu_p) E_x$ (2.19)

จากสมการที่ 2.17, 2.18 และ 2.19 สัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกแสดงตามสมการที่ 2.20

$$R_H = (p\mu_p^2 - n\mu_n^2) / q(p\mu_p + n\mu_n)^2 \quad (2.20)$$

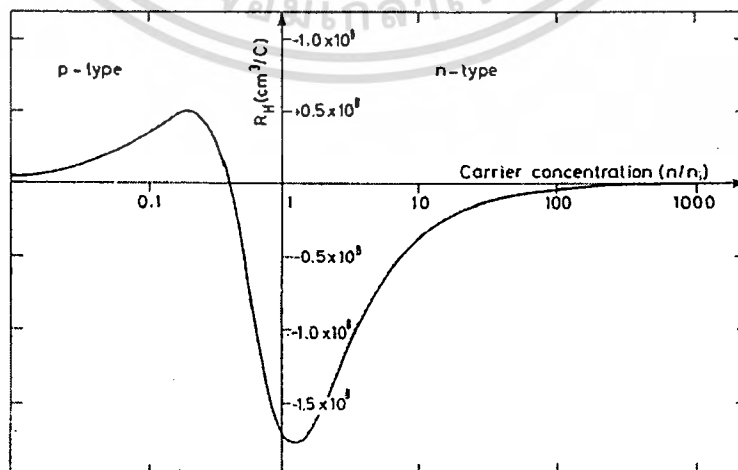
สำหรับวัสดุชนิดเอ็น ($n \gg p$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์ $R_H = -1/nq$ (2.21)

สำหรับวัสดุชนิดพี ($p \gg n$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์ $R_H = 1/pq$ (2.22)

จะเห็นว่าในสมการที่ 2.21 และ 2.22 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จะคล้ายกับกรณีในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นตามสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิกแสดงดังสมการที่ 2.23

$$R_H = (\mu_p - \mu_n) / n_i q (\mu_p + \mu_n) \quad (2.23)$$

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ฮอลล์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration) ในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิก (n_i) ซึ่งเปลี่ยนแปลงจากสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จากรูปเราจะพบค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์เป็นศูนย์ที่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากโมบิลิตี้ (mobility) ที่แตกต่างกันของอิเล็กตรอนกับโฮล และจากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าในที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยจะทำให้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงขึ้นได้^[9]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (n_i) ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ฮอลล์ยังเป็นวิธีที่นิยมนำมาวัดค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะและสภาพคล่องของพาหะได้อีกด้วย

$$\text{จากสมการ} \quad J_x = pqv_x \quad \text{หรือ} \quad v_x = \frac{J_x}{pq} \quad (2.24)$$

$$\text{และสนามไฟฟ้าฮอลล์} \quad E_H = E_y = J_x B_z / pq \quad (2.25)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{pq} = R_H \quad (2.26)$$

จากรูป 2.1 เมื่อทำการวัดแรงดันฮอลล์ระหว่างขอบด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในทิศทาง y ซึ่งมีระยะความกว้างเท่ากับ w จะได้

$$V_y = V_H = E_y w \quad \text{หรือ} \quad E_y = \frac{V_H}{w} \quad (2.27)$$

โดย V_H คือแรงดันฮอลล์ ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ โดยการแทนค่าสมการกระแส $J_x = \frac{I}{w \cdot t}$ และ $E_y = \frac{V_H}{w}$ ลงในสมการที่ 2.26 จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{wIB_z} \cdot w \cdot t \quad \text{หรือ} \quad R_H = \frac{V_H t}{IB_z} = \frac{1}{pq} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ 2.28 ความหนาแน่นของโฮลคือ

$$p = p_0 = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x B_z}{q \cdot t \cdot V_H} \quad (2.29)$$

$$\text{และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ} \quad \rho = R \frac{w \cdot t}{l} = \frac{V}{I_x} \frac{w \cdot t}{l} \quad (2.30)$$

โดย R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของแท่งสาร (โอห์ม)

และจากสมการ $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{pq\mu_p}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\mu_p = \frac{1}{\rho p q} = \frac{1}{\rho} \cdot R_H \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.29, 2.30 และ 2.31 จะเห็นว่า การทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแท่งสารกึ่งตัวนำได้ คือ ความหนาแน่นของพาหะ, สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้แล้วจากสมการ 2.31 โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (R_H) และสภาพต้านทาน (ρ) ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ จะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าสภาพคล่อง (μ_p) และค่าความหนาแน่นของพาหะที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ ซึ่งข้อมูลนี้มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆ ของสารกึ่งตัวนำ

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าแรงดันฮอลล์ (R_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีค่าเป็นลบ(-) คือ $R_H = -1/nq$ โดยเฉพาะแรงดันฮอลล์ (V_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารชนิดพี คือมีค่าเป็นลบด้วย ดังนั้น การวัดแรงดันของฮอลล์ทำให้เราสามารถบ่งชี้ชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดเอ็นหรือพีได้อีกด้วย

ขณะที่ค่าความไวในการตอบสนอง (Sensitivity: S) คือ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันฮอลล์ต่อหนึ่งหน่วยกระแสและสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H \cdot G}{t} = \frac{G}{n \cdot q \cdot t} \quad (2.32)$$

โดยที่ G คือ พารามิเตอร์โครงสร้าง (geometry factor) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.33

$$G = \frac{V_H \cdot t}{R_H I_x B_z} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.32 จะเห็นได้ว่า ค่าความไวในการตอบสนองจะมีค่าสูงเมื่อฮอลล์เพลทมีความหนาแน่นของพาหะที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิในแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นผลของการรวมเวกเตอร์ของ E_H และ E_x ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน $+x$ เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะซึ่งทำมุม θ_H กับแกน $+x$ ซึ่งมุม θ_H ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) โดย

$$\tan \theta_H = \frac{E_H}{E_x} \quad (2.34)$$

โดยการแทนค่า $E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot q}$ และ $J_x = \sigma \cdot E_x$ ลงในสมการที่ 2.34 จะได้ว่า

$$\tan \theta_H = \frac{J_x B_z}{p \cdot q} \cdot \frac{\sigma}{J_x} = \frac{\sigma \cdot B_z}{p \cdot q}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ
$$\tan \theta_H = \frac{\sigma \cdot B_z}{p \cdot q} = p \cdot q \cdot \mu_p \frac{B_z}{p \cdot q} = \mu_p B_z \quad (2.35)$$

ดังนั้นจะได้
$$\frac{\sigma}{p \cdot q} = \mu_p$$

หรือ
$$\mu_p = \sigma \cdot R_H \quad (2.36)$$

ในการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วนี้ ไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันของพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงไม่ถูกต้องนัก ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีนี้พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ R_{HI} สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ได้โดย

$$R_{HI} = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.37)$$

และ
$$\tan \theta = \frac{3\pi}{8} \mu_p \cdot B_z = \mu_H \cdot B_z \quad \text{หรือ} \quad \mu_H = \frac{\tan \theta_H}{B_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p$$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$\mu_{HI} = \mu_H = 1.18 \mu_p \quad (2.38)$$

เมื่อ μ_H คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ (Hall mobility)

และ μ_{HI} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (ionized impurity scattering) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันกับของพาหะกับอะตอมสารเจือ R_{HI} แสดงได้ดังสมการที่ (2.39)

$$R_{HI} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (2.39)$$

และ
$$\mu_{HI} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.40)$$

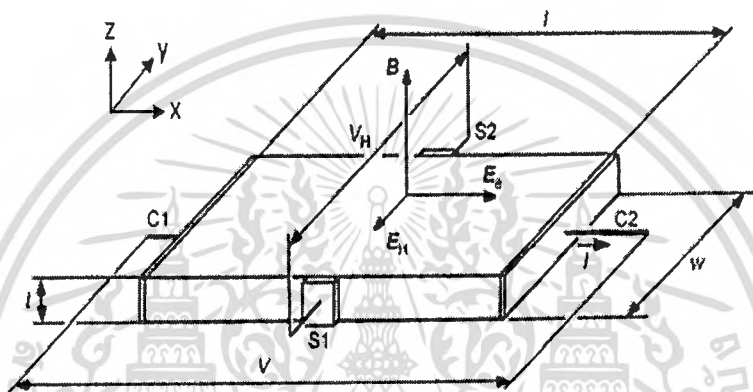
เมื่อ μ_{HI} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

และ μ_p คือ ค่า Mobility ของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท (Hallplate sensor)

เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการทำงาน โดยลักษณะของอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงโครงสร้างของแผ่นฮอลล์เซ็นเซอร์ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-substrate) ที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ w ความยาวเท่ากับ l และความหนาของแผ่นฮอลล์เท่ากับ t โดยประกอบด้วยขั้วใช้งาน 4 ขั้วคือ C1, C2, S1 และ S2 เมื่อให้กระแสไฟฟ้าระหว่างขา C1 กับ C2 และสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางกระแสจะปรากฏแรงดันฮอลล์ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา S1 กับ S2 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.41^[20]



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I \cdot B_z}{t} \tag{2.41}$$

โดยที่ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง t คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพิจารณาจากพฤติกรรมของพาหะคือ อิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งในกรณีอุปกรณ์ฮอลล์ที่อิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมากๆ ($n \gg p$) สามารถแสดงสมการแรงดันฮอลล์ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{r_n}{q \cdot n \cdot t} \cdot G \cdot B_z \cdot I \tag{2.42}$$

โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

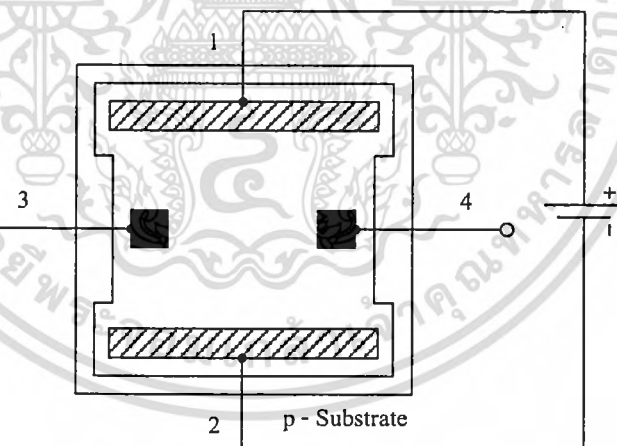
จากสมการที่ 2.41 และ 2.42 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับ

แรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.43

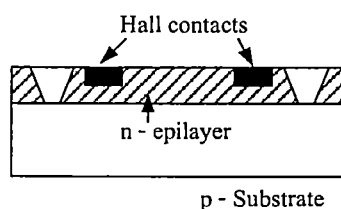
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} \cdot \frac{l}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H}\right) \right] \cdot \left[1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{s}{w} \cdot \frac{\theta_H}{\tan \theta_H} \right] \quad (2.43)$$

โดยในการออกแบบอุปกรณ์ฮอลล์จะกำหนดให้ค่า $G = 1$ ซึ่งพารามิเตอร์โครงสร้างจะเท่ากับหนึ่งได้ ถ้าออกแบบให้ $l/w = 3$ และ $s/w < 1$ โดยตำแหน่งของขั้วเซนเซอร์จะออกแบบที่ระยะ $1/2$ ของความยาวฮอลล์เพลท ในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เซ็นเซอร์ชนิดแวนดิงและแวนอน ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.5 (ก) และ 2.5(ข) แสดงมุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนดิงชนิดเอ็น^[23] ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแวนดิงฉากกับอุปกรณ์ โครงสร้างคือ ใช้ฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาชั้นอิพิทาเซียลระหว่าง $5 - 10 \mu\text{m}$ โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ $200 \times 200 \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิ (Epilayer) สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนดิงสามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน^[23]

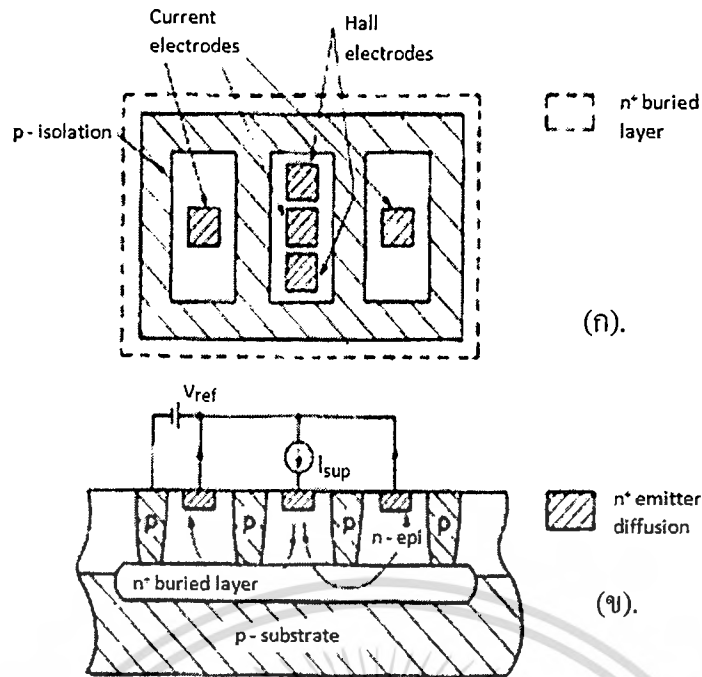


(ก).



(ข).

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนดิง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แอนไอโซทรอปิก (ก). มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง

โดยแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6(ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเซ็นเซอร์แม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการฉีดในลักษณะแนวตั้ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์

2.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

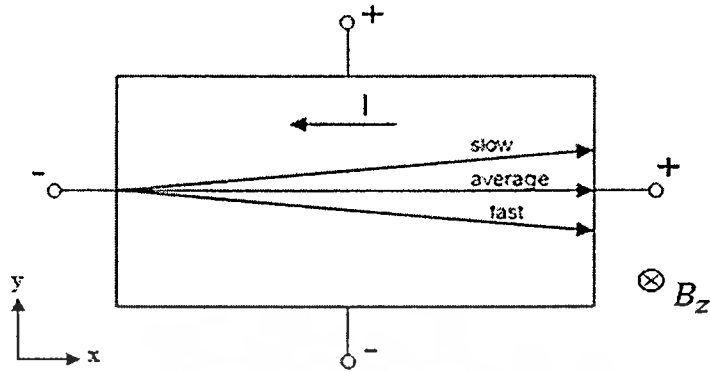
นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท เรายังสามารถพบกับปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์คือ ปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่กล่าวมานี้มีสาเหตุหลักๆอยู่ 2 สาเหตุคือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการกระจายความเร็วของประจุพาหะ หรือที่เรียกว่า (Physical magnetoresistance effect) และ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า (Geometrical magnetoresistance effect)

2.3.1) Physical magnetoresistance effect

จากที่กล่าวมาเป็นการสมมุติว่าพาหะประจุทั้งหมดมีการกระจายความเร็วที่เท่ากัน แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นซึ่งในกรณีของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพาหะประจุจะมีการกระจายความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีผลทำให้พาหะประจุมีแรงลอเรนซ์ที่ต่างกัน ในกรณีนี้พาหะประจุบางตัวแรงลอเรนซ์จะใหญ่กว่าแรงเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าฮอลล์แต่พาหะประจุบางตัวอาจไม่เป็นเช่นนั้น สิ่งนี้มีผลทำให้พาหะประจุบางตัวเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นส่วนพาหะประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

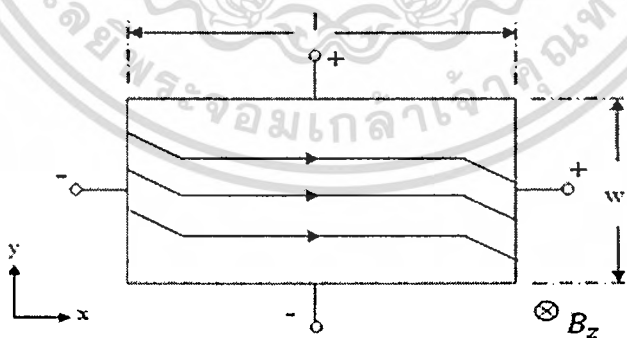
บางตัวเกิดการเบี่ยงเบนลงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขึ้นเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก^[9]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect

2.3.2) Geometrical magnetoresistance effect

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากโครงสร้างของฮอลล์เพลทที่เป็นแผ่นยาวโดยปกติจะมีความยาวมากกว่าความกว้างจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ขึ้น แรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำจะสมดุลกับแรงลอเรนซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีความกว้างมากกว่าความยาวจะมีผลทำให้แรงดันฮอลล์เพลทมีค่าลดลงและไม่สมดุลกับแรงลอเรนซ์ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบน ซึ่งการเบี่ยงเบนนี้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน สาเหตุของความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์หรือที่เรียกว่า Geometrical magnetoresistance effect จากรูปที่ 2.8 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์จะแสดงออกมามากเมื่อฮอลล์เพลทมีขนาดของความยาวที่สั้นเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างและผลแมกนีโตรีซิสแตนซ์จะแสดงออกมามากที่สุดบริเวณข้อสัมผัส^[9]

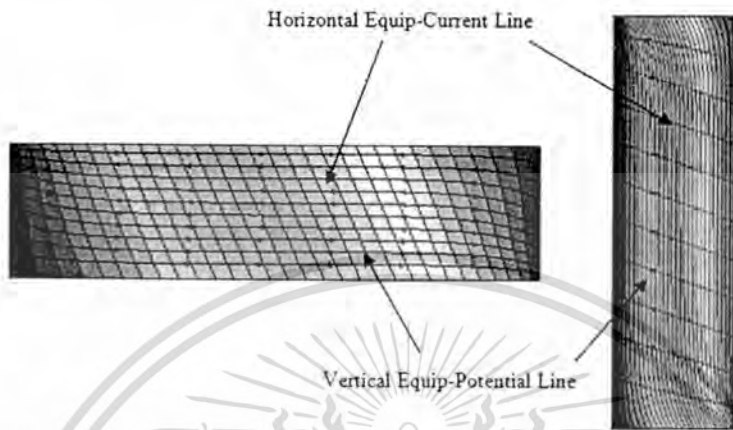


รูปที่ 2.8 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect

รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์และความหนาแน่นกระแสในฮอลล์เพลท จากตัวอย่างแสดงฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาวและขนาดสั้น ความหนาแน่นกระแสถูกแทนที่ด้วยเส้นกระแส (Equip-current lines) (เส้นตรงมีหัวลูกศร) และสนามไฟฟ้าฮอลล์ถูกแทนที่ด้วยเส้นศักย์ไฟฟ้า (Equip-potential lines) (เส้นตรงไม่มีหัวลูกศร) ในบริเวณตรงส่วนกลางของฮอลล์เพลท

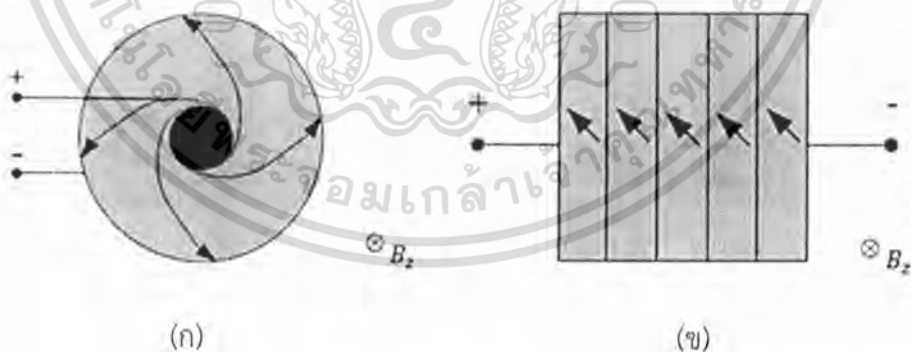
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีขนาดยาวเส้นกระแสยังคงไหลโดยไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งสังเกตได้จากเส้นศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นดังรูป 2.9(ก) และในบริเวณส่วนกลางของแผ่นฮอลล์เพลทที่มีขนาดสั้นเส้นศักย์ไฟฟ้ายังคงขนาดเท่ากับหน้าสัมผัสไฟฟ้าซึ่งแสดงว่าไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นจึงทำให้เส้นกระแสเกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 2.9(ข)



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s)

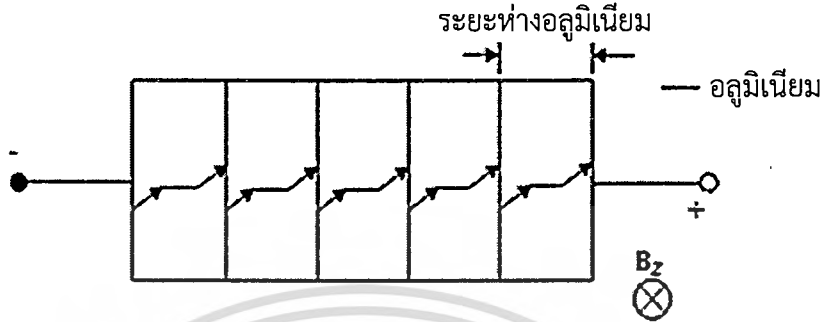
ซึ่งการทำให้ผลปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์มีค่ามากขึ้นจะต้องทำการออกแบบให้แรงดันฮอลล์มีค่าลดลงหรือไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นได้เพื่อให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์อย่างเต็มที่ ซึ่งมีสองวิธีดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10^[9]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตริซิสแตนท์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.10(ก) แบบดิสก์จะมีวงกลมวงนอกและวงใน การออกแบบนี้มีผลทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นมาได้ ส่วนอีกหนึ่งวิธีแสดงในรูปที่ 2.10(ข) เป็นการอนุกรมค่าความต้านทานรวมของฮอลล์เพลทโดยอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (l/w) มีค่าน้อยนำมาต่ออนุกรมกัน ส่งผลให้ไม่มีแรงดันฮอลล์เกิดขึ้นมาได้ทำให้พาหะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไวส์สำหรับการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญเตเห็นาเปเซประเยชนดานการค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กอย่างไรก็ตามโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่องการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมมีผลกระทบกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์ ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.11 โดยถ้าช่องว่างของอลูมิเนียมมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นในระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ที่มีค่าลดลง โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการออกแบบโครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อช่วยในเรื่องของการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากเกี่ยวกับระยะห่างดังกล่าว

2.4 พารามิเตอร์ที่มีช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์

จากที่กล่าวก่อนหน้านี้ว่าอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟต์เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2 จากสมการ เราพบว่าแรงลอเรนซ์จะแปรเป็นสัดส่วนกับความเร็วดริฟต์ของอิเล็กตรอน ซึ่งความเร็วดริฟต์ของอิเล็กตรอนแปรโดยตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้าตามสมการที่ 2.44

$$v = -\mu_n \cdot \varepsilon_x \quad (2.44)$$

จากสมการเครื่องหมายลบแสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่มีทิศตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าและ μ_n คือค่าคงที่ค่าหนึ่ง ถูกเรียกว่า “สภาพคล่อง” หรือ โมบิลิตี (Mobility) จากสมการที่ (2.44) อาจเขียนใหม่เป็น

$$\mu_n = \frac{v}{\varepsilon} \quad (2.45)$$

ดังนั้นเรานิยามสภาพคล่องของพาหะได้ว่า ความเร็วของพาหะต่อหนึ่งหน่วยสนามไฟฟ้า และถูกพิจารณาเป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าความคล่องตัวของพาหะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากของสารกึ่งตัวนำ ไม่ว่าจะเป็นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะมันเป็นตัวบอกถึงว่าพาหะจะเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด ซึ่งภายในสารของแข็งประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซที่มีอยู่อย่างหนาแน่น อะตอมเหล่านี้จะเป็นอุปสรรคและขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะ ดังนั้นขณะที่พาหะเคลื่อนที่จึงเกิด “การชนกัน” (Collision) ระหว่างพาหะเช่นอิเล็กตรอนหรือโฮลกับอะตอม ซึ่งอาจเป็นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเอง หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆก็ได้ การชนกันนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อเกิดการชนกันความเร็วและทิศทางของการเคลื่อนที่ของพาหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนมีค่าลดลงเป็นศูนย์ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการชนกันอีกครั้งหนึ่งความเร็วก็จะลดลงเป็นศูนย์อีก ซ้ำไปเช่นนี้เรื่อยๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “การกระเจิง” (Scattering) จะเห็นว่าผลของการชนกัน จึงทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนถูกจำกัด และมีค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง เรียกว่า “ความเร็วดริฟท์” (Drift velocity)

2.4.1 ผลของการชนกัน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ เราจะพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้โดยอิสระในสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง และไม่มีสนามอื่นใดหรือสิ่งกีดขวางใดๆเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น กรณีของอิเล็กตรอนที่มีมวล m_0 ได้รับสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง ทำให้เกิดแรง F กระทำต่ออิเล็กตรอน และทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระโดยมีความเร่ง a กรณีนี้ความเร็วของอิเล็กตรอนสามารถหาได้ดังนี้

$$F = ma = m \frac{dv}{dt}$$

แต่แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า \mathcal{E} ที่กระทำต่ออิเล็กตรอนคือ

$$F = -q\mathcal{E} = \text{ค่าคงที่}$$

ดังนั้นจะได้ว่า $m \frac{dv}{dt} = -q\mathcal{E}$ หรือความเร็วของอิเล็กตรอนก็คือ

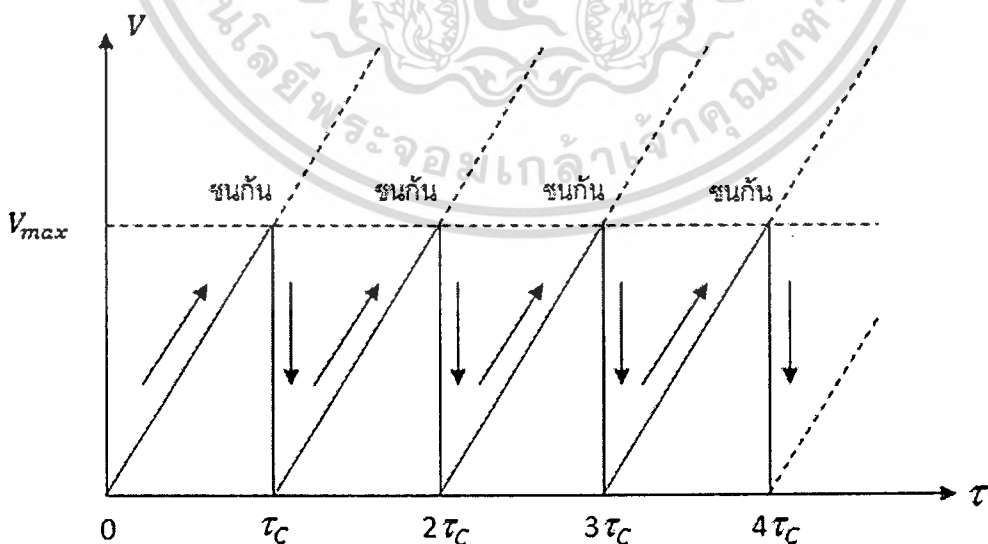
$$v(t) = \frac{-q\mathcal{E} \cdot t}{m} \quad (2.46)$$

จากสมการที่ 2.46 แสดงว่า ถ้าสนามไฟฟ้า \mathcal{E} คงที่ จะทำให้มีแรงค่าคงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนตลอดเวลา ความเร็วของอิเล็กตรอนจึงเพิ่มขึ้นกับเวลา หรือก็คือมีความเร่งเกิดขึ้นนั่นเอง เครื่องหมายลบในสมการ (2.46) แสดงถึงทิศทางของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า การสมมุติว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆเข้ามาเกี่ยวข้องไม่สามารถนำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะในสารของแข็งได้ เพราะโดยความเป็นจริงแล้วภายในโลหะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซจำนวนมากมาย ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จึงทำให้มีการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นความเร็วจึงถูกควบคุมจากการชนกันนี้เอง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารของแข็งจึงถูกพิจารณาว่าไม่เป็นไปโดยอิสระเช่นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ในการพิจารณาผลที่เกิดจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซ ถ้ากำหนดให้ τ_c คือเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันในแต่ละครั้ง (Mean time between collision) ซึ่งหมายถึงช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้เกิดการชนกันหนึ่งครั้ง ดังนั้นในเวลา 1 วินาที จะเกิดการชนกันจำนวนเท่ากับ $1/\tau_c$ ครั้งหรือก็คือ จำนวนครั้งของการชนกันใน 1 วินาทีเท่ากับ $1/\tau_c$ ครั้ง หรืออาจเรียกว่า “ความถี่ของการชนกัน” เวลาก่อนที่จะเกิดการชนกันจะเป็นเวลาที่อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงสุด คือ v_{max} ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงถูกจำกัดความเร็วที่ $t = \tau_c$ และจะได้ว่า

$$v_{max} = -\frac{q \cdot \varepsilon \cdot \tau_c}{m} \quad (2.47)$$

หลังการชนกันอิเล็กตรอนจะมีความเร็วลดลงเป็นศูนย์ทันที ต่อจากนั้นการเคลื่อนที่ก็จะเริ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง โดยความเร็วจะเริ่มจากศูนย์แล้วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆกับเวลาจนถึงเวลา τ_c ความเร็วก็จะเป็นค่าสูงสุดตามสมการที่ (2.47) การเปลี่ยนแปลงความเร็วกับเวลา t ใดๆ ซึ่งอยู่ในช่วงก่อนการชนกัน ($0 < t < \tau_c$) อาจหาได้จากสมการที่ (2.47) และเขียนแสดงเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 2.12 จากรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นผลจากการพิจารณาว่าพาหะเคลื่อนที่โดยไม่มีสนามของแลตทิซเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่มีการชนกันกับแลตทิซจะเห็นว่าความเร็วของอิเล็กตรอนยังคงแปรกับเวลาอย่างเชิงเส้น แต่มีความเร็วจำกัดได้สูงสุดที่ v_{max} เนื่องจากมีการชนกันเกิดขึ้น^[24]



รูปที่ 2.12 แสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆในผลึกสารของแข็ง เมื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำและมีการชนกับแลตทิซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่มีผลต่อความคล่องตัวของพาหะ

จากสมการที่ 2.47 เราสามารถเขียนค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนได้เป็นตามสมการที่ 2.48

$$\mu_n = \frac{q\tau_c}{m} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ 2.48 เนื่องจากสภาพคล่องแปรโดยตรงกับเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของพาหะกับอะตอมในผลึกสารของแข็งในแต่ละครั้ง หรือ $\mu \propto \tau_c$ ซึ่ง τ_c เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของพาหะกับอะตอมในผลึกสารของแข็งในแต่ละครั้ง ซึ่งอะตอมใดๆ ในผลึกสารของแข็งในที่นี้อาจหมายถึงอะตอมของสารกึ่งตัวนำซึ่งเรียกว่า “แลตทิซ” (Lattice) หรืออาจเป็นอะตอมสารเจือ (Impurity atom) ที่ถูกเติมเข้าไปก็ได้ ดังนั้นจะได้ว่าใน 1 วินาที จะมีการชนกันรวมทั้งหมด $1/\tau_c$ ครั้ง และถ้าให้ τ_L เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันของพาหะกับแลตทิซ และ τ_i เป็นเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกันเนื่องจากพาหะกับอะตอมสารเจือ จะได้ว่าใน 1 วินาที จะมีการชนกันของพาหะกับแลตทิซ $1/\tau_L$ ครั้ง และมีการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ $1/\tau_i$ ครั้ง ดังนั้นการชนกันทั้งหมด = การชนกับแลตทิซ + การชนกับอะตอมสารเจือ

$$\text{หรือ} \quad \frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_L} + \frac{1}{\tau_i} \quad (2.49)$$

แต่เนื่องจากสภาพคล่องแปรโดยตรงกับเวลาเฉลี่ยระหว่างการชนกัน ดังนั้นสมการที่ 2.49 สามารถเขียนในรูปของสภาพคล่องได้เป็น

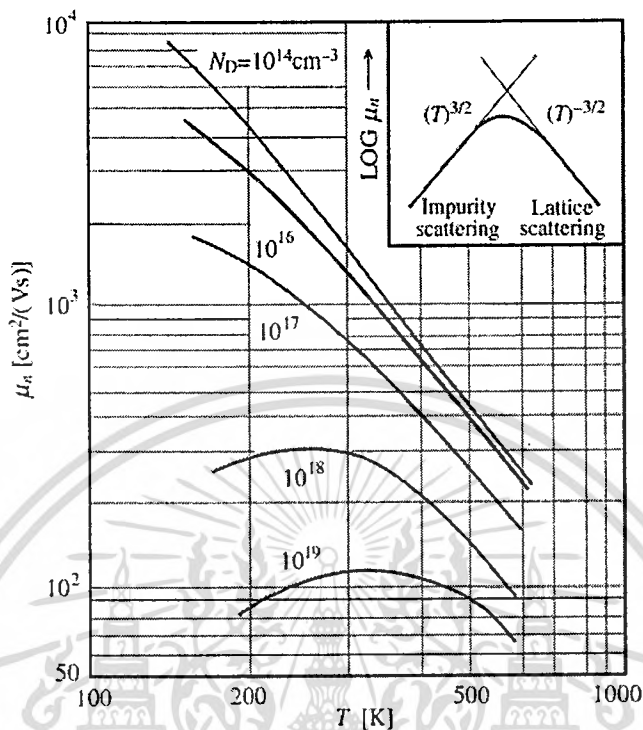
$$\frac{1}{\mu_T} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_i} \quad (2.50)$$

โดยที่ μ_T หมายถึงสภาพคล่องโดยรวมของพาหะ
 μ_L หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับแลตทิซ
 μ_i หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับอะตอมสารเจือ

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ หรือมีอะตอมสารเจือเพียงเล็กน้อย เช่นน้อยกว่า 10^{16} อะตอมต่อลบ.ซม. ผลของการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือจะมีน้อยกว่าการชนกับแลตทิซทำให้สภาพคล่องของพาหะแปรกับอุณหภูมิเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการชนกับแลตทิซจะมีมากขึ้นทำให้สภาพคล่องมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานจากความร้อนจะมีมากพอที่จะทำให้พาหะชนกับแลตทิซมากขึ้น ความเร็วจึงลดลง ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิสูงนี้สภาพคล่องของพาหะจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

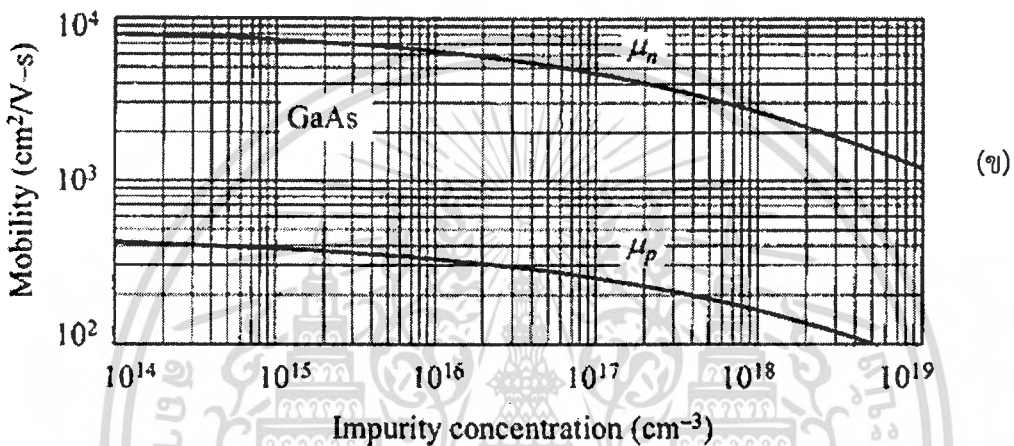
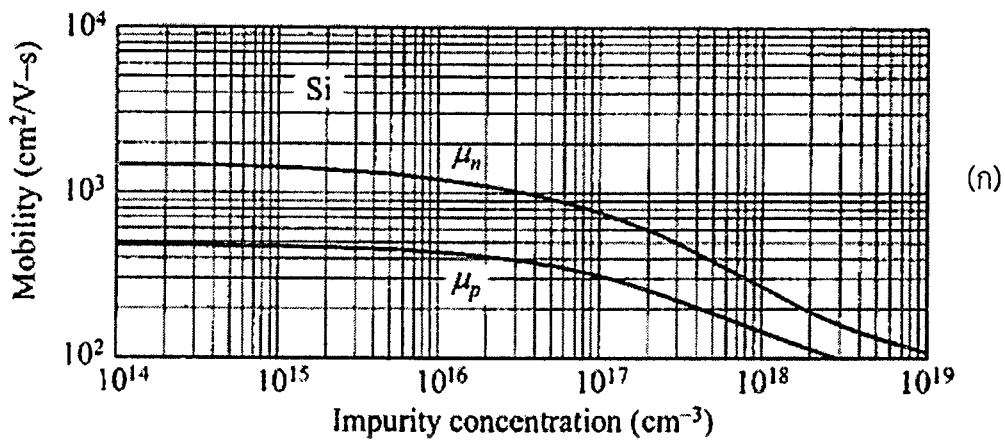
ลดลงและจะแปรผกผันกับ $T^{-3/2}$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ถูกรวมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นจึงต่างไปจากกรณีสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (หรือเมื่อมีอะตอมสารเจือน้อย)



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่างๆกัน

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกรวมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น^[25,26] เช่น มากกว่า 10^{17} อะตอมต่อลบ.ซม. ในกรณีนี้สามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิช่วงต่ำๆ จะมีการชนระหว่างพาหะกับแลตทิซที่น้อยมาก สภาพคล่องจึงถูกกำหนดด้วยผลของการชนกันระหว่างพาหะกับอะตอมสารเจือเพียงอย่างเดียว ยิ่งมีอะตอมสารเจือมากจะมีการชนกันมาก ทำให้สภาพคล่องยิ่งมีค่าต่ำ^[27] อย่างไรก็ตามในขณะนี้เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นเล็กน้อย พลังงานจากความร้อนจะทำให้พาหะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น พาหะจึงมีความเร็วมากขึ้น ดังนั้น ในช่วงนี้จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสภาพคล่องจะเพิ่มขึ้นด้วย จนกระทั่งที่อุณหภูมิค่าหนึ่งสภาพคล่องจะมีค่าสูงสุด^[28] ดังนั้นนอกจากสภาพคล่องจะเกิดจากการชนกับแลตทิซ μ_L ซึ่งแปรกับ $\frac{1}{T^{3/2}}$ แล้ว สภาพคล่องยังเกิดขึ้นกับการชนกับอะตอมสารเจือ μ_i จะแปรกับ $\frac{T^{3/2}}{N}$ ซึ่ง N ในที่นี้หมายถึงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือทั้งหมดที่มีอยู่ (หรือ $= N_D + N_A$)

นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิคงที่ 300K ค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน และโฮลในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์จะเปลี่ยนแปลงกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าน้อยสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าเกือบคงที่ แต่เมื่อความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าสูงเช่นมากกว่า 10^{15} อะตอมต่อลบ.ซม. สภาพคล่องของพาหะจะลดลงขณะที่ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าสูงขึ้นนั้น ไม่น่าแปลกใจให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ (ก) ซิลิคอน (ข) แกลเลียมอาเซไนด์ ที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือความเข้มข้นค่าต่างๆที่ 300 K

จากที่กล่าวมาเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างฮอลล์เพลทได้ ซึ่งในโครงสร้างฮอลล์เพลทผลของปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก เนื่องจากแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะที่เกิดขึ้นเบี่ยงเบนไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตามเราพบว่าการเบี่ยงเบนของพาหะจะขึ้นอยู่กับแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์จะแปรโดยตรงกับสภาพคล่องของพาหะ ดังนั้นเพื่อให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีการเบี่ยงเบนมากขึ้น เราจะต้องทำให้ค่าสภาพคล่องของพาหะมีค่าสูง ซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1.) อุณหภูมิต่ำ โดยที่อุณหภูมิต่ำ พลังงานความร้อนมีค่าน้อยทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Thermal vibration) น้อยตามไปด้วย โครงสร้างของแลตทิซจึงอยู่ในสภาวะที่ค่อนข้างนิ่ง กรณีนี้โอกาสที่จะเกิดการชน จึงมีน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการสั่นของอะตอมเกิดขึ้นมาก การชนกันเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “การกระเจิงเนื่องจากแลตทิซ” (Lattice scattering) หรือ “การกระเจิงเนื่องจากความร้อน” (Thermal scattering) ในทางอุดมคติที่ 0K อะตอมจะไม่มีสั่นเลย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของแลตทิซจะอยู่ในสภาวะนิ่ง หรือมีลักษณะเป็น Stationary Lattice ดังนั้นการชนกันจะไม่เกิดขึ้นเลยซึ่งจะทำให้ค่าสภาพคล่องมีค่าสูง

2.) ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ อะตอมสารเจือที่ถูกเติมลงไปในสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการรบกวนสนามศักย์เดิมของแลตทิซ ดังนั้นในบริเวณอะตอมสารเจือสนามศักย์ของแลตทิซจึงมีค่าไม่สม่ำเสมอ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้มีการหักเหเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลให้มีโอกาสชนกันง่ายขึ้น ยิ่งอะตอมสารเจือมีจำนวนมากโอกาสการชนก็จะสูง ซึ่งการชนกรณีนี้ถูกเรียกว่า “การชนเนื่องจากสารเจือ” (Impurity scattering) จึงส่งผลให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าสูงขึ้น เราจึงต้องเติมด้วยอะตอมสารเจือน้อยๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ

ในเนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองแบบการทำงาน และการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โปรแกรม Sentaurus TCAD (Technology CAD) คือโปรแกรมหนึ่งที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงาน เพื่อพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างหรือพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำให้ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินการทดสอบเพื่อพัฒนาและปรับปรุงผลของแมกนีโตรีซิสแตนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท ตลอดถึงการออกแบบต่างๆเพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท เช่นการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นด้วย

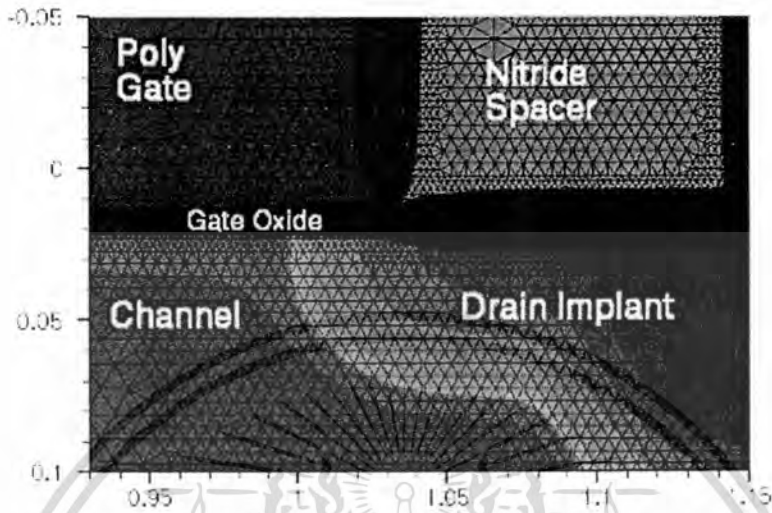
3.1 บทนำ TCAD

การจำลองการทำงาน TCAD ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะกับงานด้านอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor Industry) เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความเร็วในการค้นคว้าวิจัยหรือพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้ผลิตตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor device) ใช้ TCAD สำหรับการวิเคราะห์ผลซึ่งก็คือการตรวจสอบ, วิเคราะห์, การศึกษาวิธีที่ดีที่สุดขั้นตอนกระบวนการสร้างและยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนกระบวนการสร้างในวงจรรวมได้อีกด้วย โดย TCAD แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก โดย TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆอยู่ 2 ส่วนในการจำลองการทำงานได้แก่ การจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง (process simulation) และการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ต่อไป

3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)

ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งเป็นการจำลองแบบที่อยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนแผ่นฐานรอง เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในทางวิชาการ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

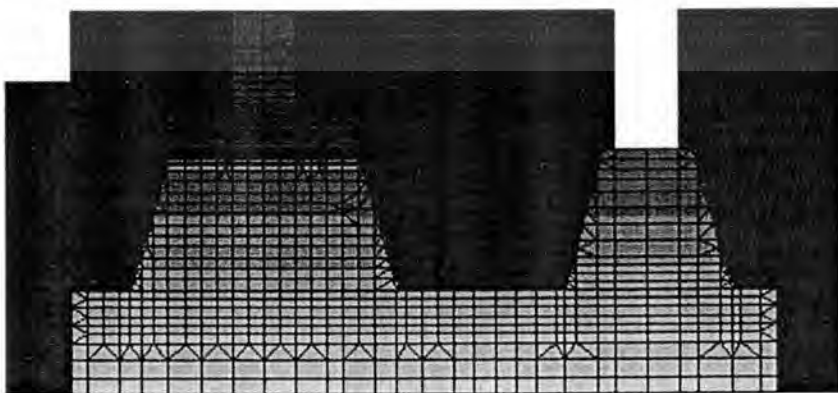
ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูกเมส (mesh) หรือกริด (grid) และถูกแทนที่ด้วย finite-element structure เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในส่วนการจำลองแบบกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง

3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

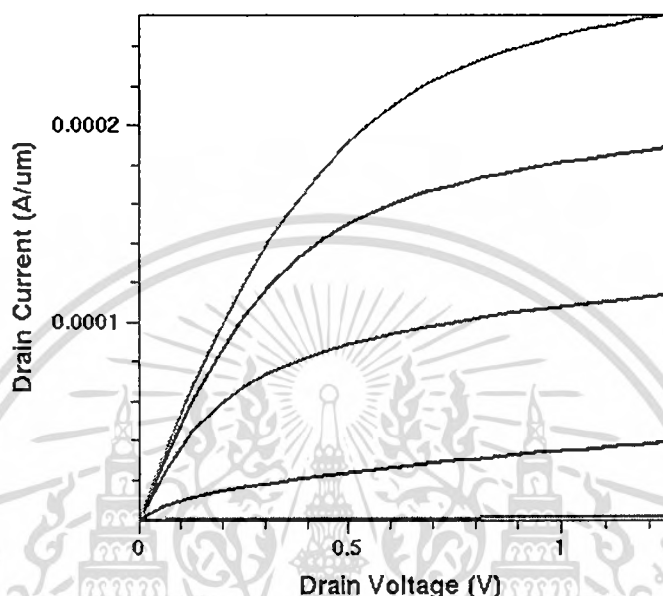
ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD เราสามารถที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกเมส จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วย finite-element structure ซึ่งแต่ละโนดของตัวอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติทางด้านต่างๆ ที่ร่วมกันอยู่ เช่น ชนิดของวัสดุ (material type), ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (doping concentration), ความหนาแน่นกระแส (current density), สนามไฟฟ้า (electric field), อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ (generation and recombination rates) และคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งแต่ละโนดคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำมาคำนวณซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ขั้วไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นต้น การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD จะแก้ปัญหาสมการต่างๆมากมายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) และสมการอื่นๆ หลังจากการแก้สมการเหล่านี้ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD จะมีส่วนประกอบย่อยๆ อยู่ 7 ส่วนดังนี้

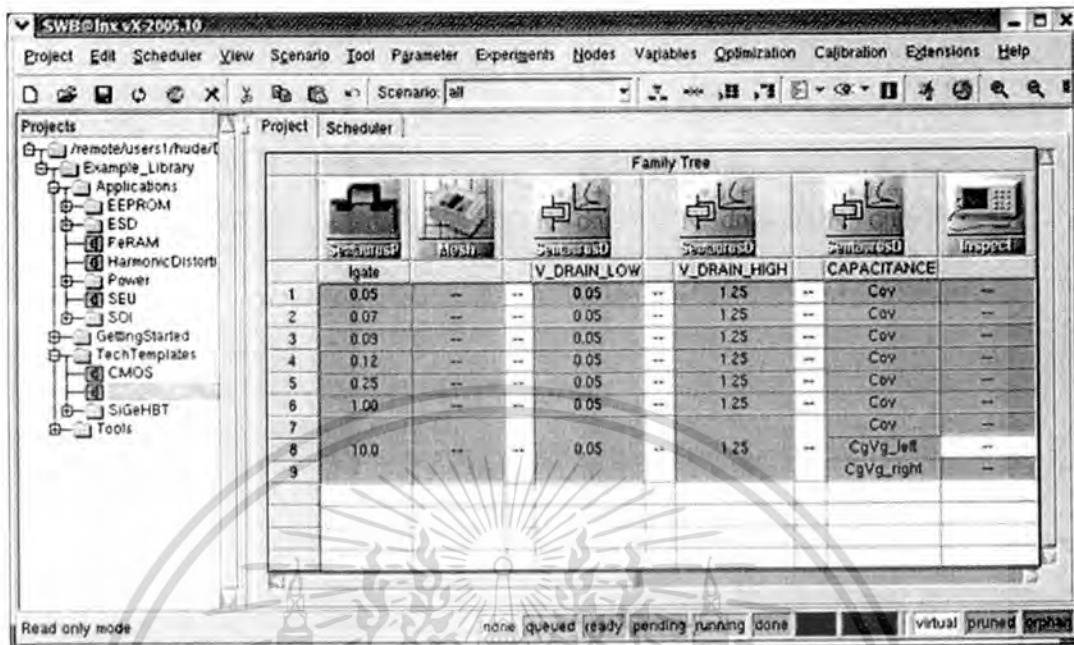
- 3.2.1 Sentaurus Workbench
- 3.2.2 Sentaurus Process
- 3.2.3 Sentaurus Structure Editor
- 3.2.4 Sentaurus Device
- 3.2.5 Tecplot SV
- 3.2.6 Inspect

3.2.1 Sentaurus Workbench

Sentaurus Workbench เป็นโปรแกรมส่วนหลักที่รวบรวมส่วนต่างๆในโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เข้าไว้ด้วยกันเช่น การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (Sentaurus Process)^[29], การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Device)^[30] และเครื่องมือในการวิเคราะห์ (Inspect) เป็นต้น โดยโปรแกรม Sentaurus Workbench สามารถให้ผู้ใช้กำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

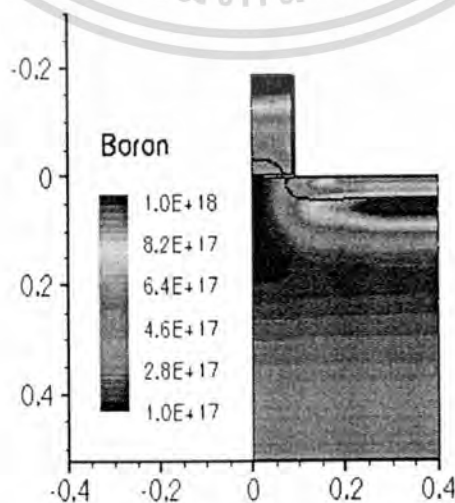
ตามที่ต้องการได้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการจำลองการทำงาน โดย TCAD ในส่วนของ Sentaurus Workbench แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench

3.2.2 Sentaurus Process

Sentaurus Process เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งใน Sentaurus Process จะใช้คำสั่งในการจำลองแบบการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วยคำสั่งต่างๆ เช่น การกำหนดชนิดและตำแหน่งฐานรอง, กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) หรือกระบวนการอิมพลาเนชัน (implantation) เป็นต้น โดยรูปที่ 3.5 แสดงกระบวนการจำลองแบบการอิมพลาเนชัน



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนของการอิมพลาเนชันใน Sentaurus Process

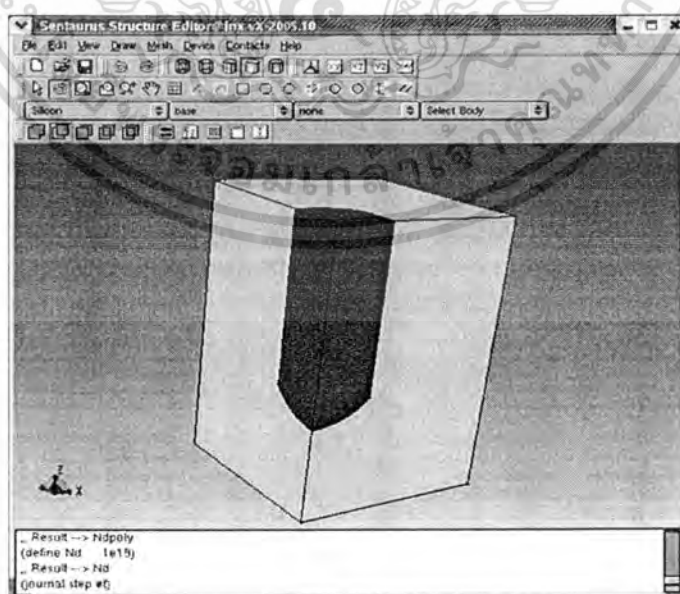
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในวงจำกัด ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 Sentaurus Structure Editor

Sentaurus Structure Editor เป็นส่วนของการออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสามารถที่จะทำการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยขั้นตอนแรกของการจำลองการทำงานทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เราจะทำการสร้างรูปร่างของตัวอุปกรณ์ เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangles), รูปหลายเหลี่ยม (polygons), ลูกบาศก์ (cuboids), รูปทรงกระบอก (cylinders), รูปทรงกลม (spheres) และรูปต่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปร่างและโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเกิดจากรูปร่างง่ายๆเหล่านี้ ซึ่งหน้าต่างในส่วนของ Sentaurus Structure Editor^[31] แสดงในรูปที่ 3.6



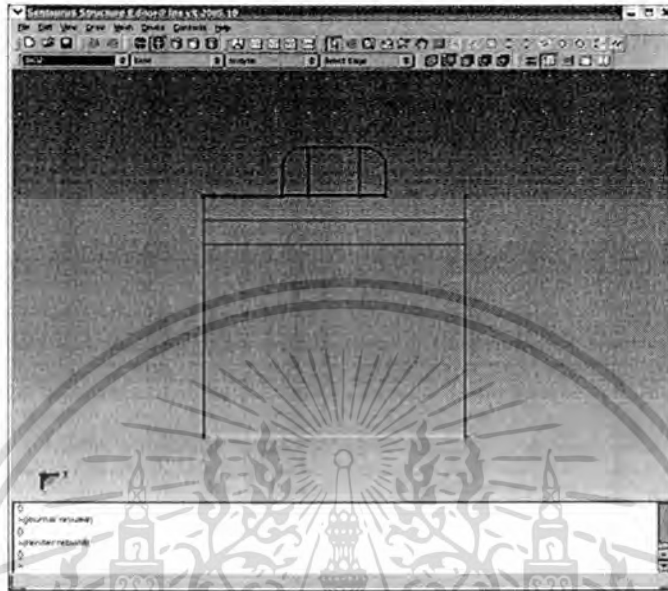
(ก) 2 มิติ



(ข) 3 มิติ

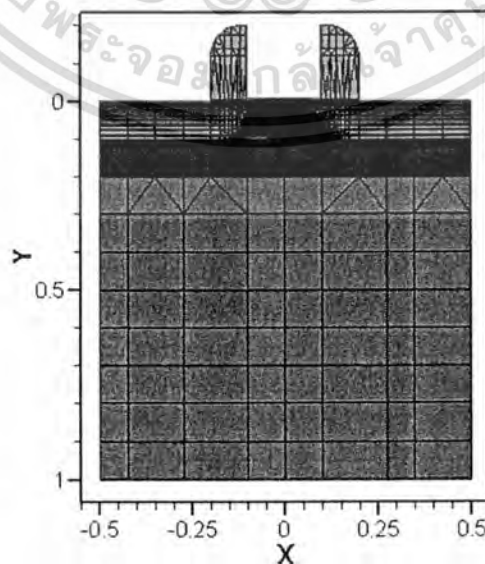
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราสามารถที่จะกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

จากนั้นในส่วนของ Sentaurus Structure Editor เราสามารถกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือในบริเวณหรือส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นมา ต่อจากนั้นจะเป็นการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างรูปร่างตัวอุปกรณ์และการแบ่งกริดเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการกำหนดกริดเสร็จแล้วก็จะเป็นการสร้างตัวอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ต่อจากนั้นก็เข้าสู่ในส่วนของการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ ซึ่งในส่วนนี้จะอยู่ในส่วนของ Sentaurus Device ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

3.2.4 Sentaurus Device

Sentaurus Device คือการจำลองแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่นคุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical), ความร้อน (thermal) หรือแสง (optical) ในตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งในคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆมากมายที่เราสามารถที่จะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์ เซมิคอนดักเตอร์หรือคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขในการจำลองแบบ Sentaurus Device จึงถูกใช้ในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อความเข้าใจในการทำงานของตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ภายใต้คุณสมบัติต่างๆทำงานได้ดีที่สุด ซึ่งในส่วน Sentaurus Device จะประกอบด้วยส่วนคำสั่งต่างๆมากมาย เช่น

3.2.4.1 File

3.2.4.2 Electrode

3.2.4.3 Physics

3.2.4.4 Plot

3.2.4.5 Solve

3.2.4.1 File

ในส่วน file จะเป็นการกำหนดไฟล์อินพุต และเอาต์พุต ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่น

File {

* Input Files

Grid = "nmos_msh.tdr"

* Output Files

Current = "n1_des.plt"

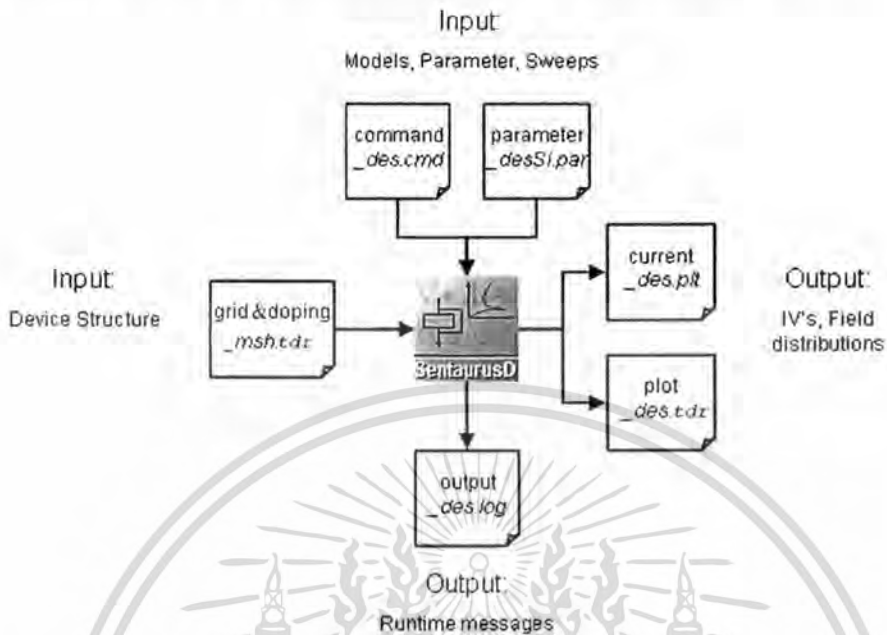
Plot = "n1_des.tdr"

}

ในส่วนของ Input Files จะเป็นไฟล์ที่ได้หลังจากการสร้าง Sentaurus Structure Editor เสร็จแล้ว เช่น รูปร่างของตัวอุปกรณ์ก็จะประกอบไปด้วยขนาดและวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, ลักษณะการโด๊ป, ตำแหน่งของหน้าสัมผัสไฟฟ้า และขนาดของการแบ่งกริด (grid) หรือเมส (mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ และในส่วน Output Files ก็จะเป็นข้อมูลต่างๆที่ต้องการหลังจาก Sentaurus Device ดำเนินการเสร็จแล้ว ซึ่งไฟล์เอาต์พุตเหล่านี้

ก็จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณแล้ว เช่น ไฟล์ Current ก็จะเป็นเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนไฟล์ `_des.log` เราใช้สำหรับตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งไฟล์อินพุต เอาต์พุต ต่างๆแสดงดังในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device

3.2.4.2 Electrode

ในส่วนของ Electrode เป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า ซึ่งแต่ละหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดอยู่ที่นี่จะต้องสอดคล้องกับชื่อหน้าสัมผัสที่ถูกกำหนดไว้ใน Sentaurus Structure Editor ในส่วนของ Electrode เราสามารถที่จะกำหนดคุณสมบัติของหน้าสัมผัสไฟฟ้าเช่น แรงดัน, กระแส, หน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบช็อตกั, และคุณสมบัติอื่นๆ เช่น

Electrode {

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

```
{ Name="drain" Voltage=0.0 Resistor=100}
```

```
{ Name="gate" Voltage=0.0 Barrier=-0.55}
```

```
{ Name="base" Voltage=0.0 Current=0 Barrier=-0.55}
```

```
{ Name="HEMTgate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.78}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.3 Physics

ในส่วนของ Physics จะเป็นส่วนที่โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทำงานจะถูกนำมาประกาศไว้ในส่วนนี้ ซึ่งตัวอย่างของโมเดลทางฟิสิกส์ เช่น โมเดลที่เกี่ยวกับสภาพคล่องของพาหะ (carrier mobility model), การเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ (band-gap narrowing model), การไอออไนซ์เนื่องจากการชน (impact ionization model) เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างโมเดลทางฟิสิกส์เช่น

Physics {

Mobility(DopingDep HighFieldSat)

}

ซึ่ง DopingDep หมายถึง การลดลงของสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นอะตอมสารเจือ HighFieldSat หมายถึง ความเร็วอิ่มตัวของพาหะ (velocity saturation) เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง

3.2.4.4 Plot

ในส่วน Plot เป็นส่วนที่เราใช้สำหรับดูการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นหลังจากทำการจำลองในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จ โดยเราสามารถที่จะกำหนดในสิ่งที่เราต้องการทราบได้ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี้, ความเร็วของพาหะ หรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่ได้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงหลังจากการดำเนินการในส่วนของ Sentaurus Device เสร็จแล้วซึ่งถูกเก็บไว้ในไฟล์เอาต์พุตในส่วนของ File ที่กล่าวไว้ในตอนต้น ซึ่งตัวอย่างในส่วนของ Plot เช่น

Plot {

eDensity hDensity eCurrent hCurrent

Potential SpaceCharge ElectricField

eMobility hMobility eVelocity hVelocity

Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

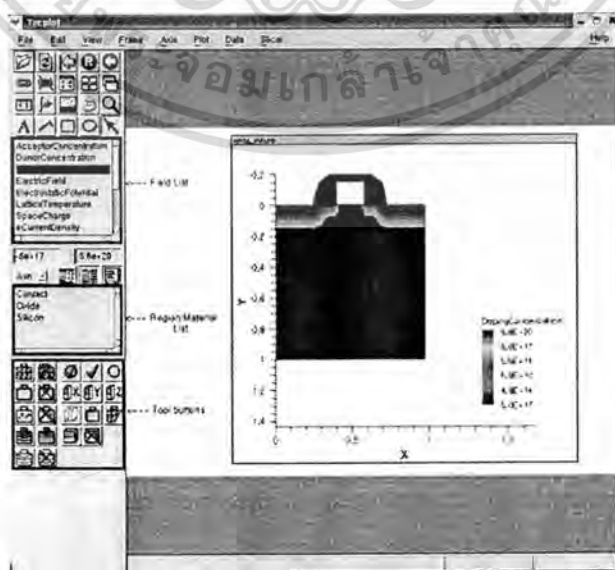
3.2.4.5 Solve

ในส่วนของ Solve จะเป็นส่วนในการกำหนดค่าแรงดันหรือกระแสให้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้า และ สมการทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equations) และสมการอื่นๆที่จำเป็นในการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการจำลองการทำงาน ซึ่งตัวอย่างของ Solve เช่น

```
Solve {
  Coupled(Iterations=100){ Poisson }
  Coupled{ Poisson Electron Hole }
  Quasistationary(
    Goal{ Name="contact name" Voltage= voltage value }
  ){ Coupled{ Poisson Electron Hole } }
}
```

3.2.5 Tecplot SV

ส่วนของ Tecplot SV เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงาน ตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ในส่วนต่างๆที่ต้องการทราบซึ่งจะถูกกำหนดไว้แล้วในส่วน Plot โดย Tecplot SV จะแสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี, ความเร็วของพาหะ หรือ ความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งในส่วน Tecplot SV แสดงดังรูปที่ 3.10

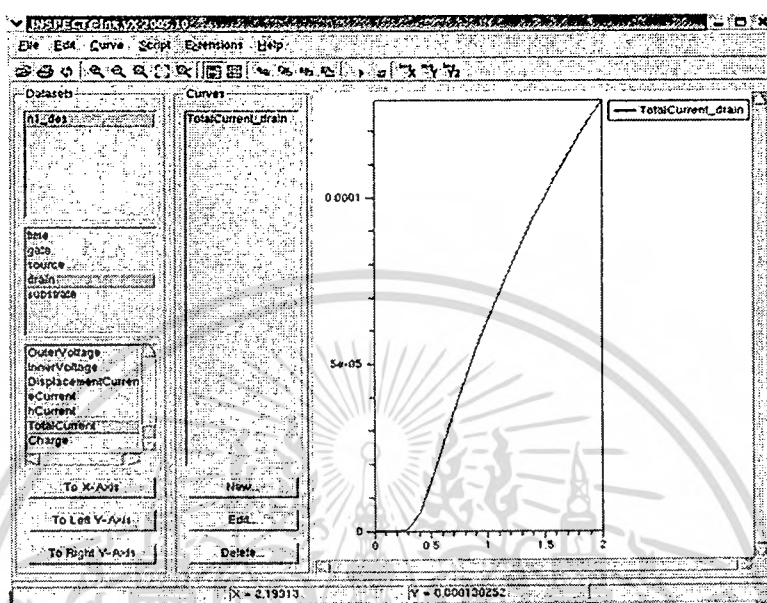


รูปที่ 3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 Inspect

Inspect คือเครื่องมืออีกชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานในรูปของกราฟ x-y (x-y data) เช่น ปริมาณความหนาแน่นการแพร่, ปริมาณกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect



รูปที่ 3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เราใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทแบบต่างๆ เช่น ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท, การออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ดีขึ้นด้วย โดยพารามิเตอร์ที่เราใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ โดยในการจำลองแบบเราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน

3.3 การจำลองแบบการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดย TCAD

ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทเราจะทำการจำลองแบบทั้งหมด 3 โครงสร้าง เพื่อสังเกตผลปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้น คือ โครงสร้างไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

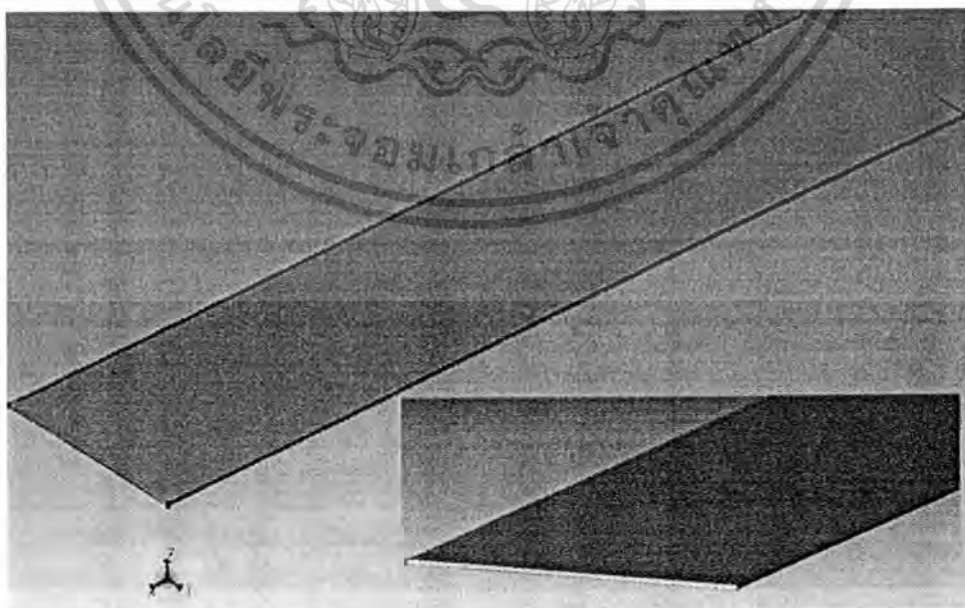
ฮอลล์เพลท, การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท โดยแต่ละโครงสร้างจะมีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการจำลองแบบ TCAD อยู่ 3 ส่วนได้แก่ 1. การออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor) 2. การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง (Sentaurus Device) 3. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองนำมาแสดงผล ซึ่งในส่วนของตัวโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองแบบการทำงานปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์ของแต่ละโครงสร้างจะแสดงในส่วนของภาคผนวกแต่ที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้จะแสดงถึงแต่ละโครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแบบในส่วนของ Sentaurus Structure Editor เท่านั้น ซึ่งจะแสดงแต่ละโครงสร้างดังนี้

3.3.1 ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท

ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของ Sentaurus Structure Editor ในการจำลองแบบใช้โครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร โดยทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในแนวแกน y ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ซึ่งโครงสร้างสำหรับใช้ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทแสดงขั้นตอนในส่วนต่างๆดังนี้

3.3.1.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท

โดยขั้นตอนแรกของการจำลองแบบการสร้าง เราจะทำการสร้างแผ่นฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12

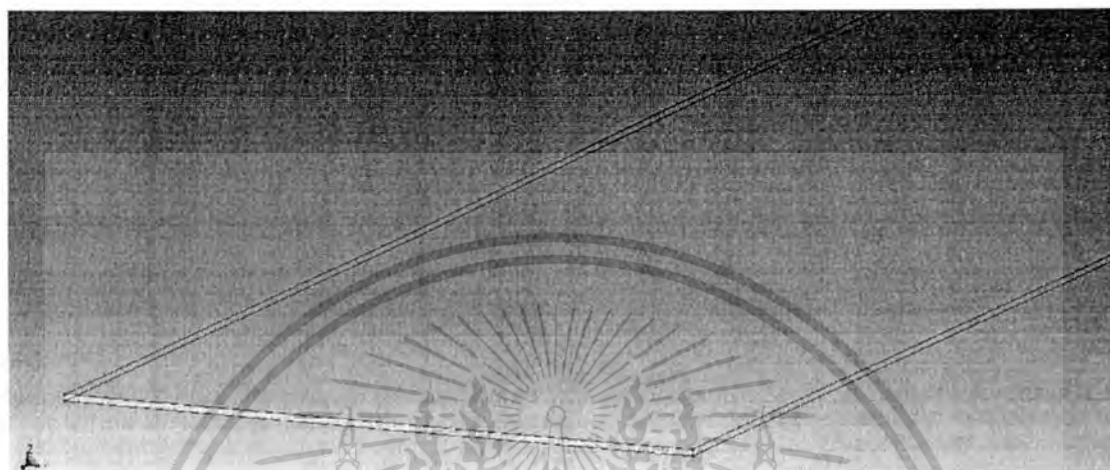


รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า

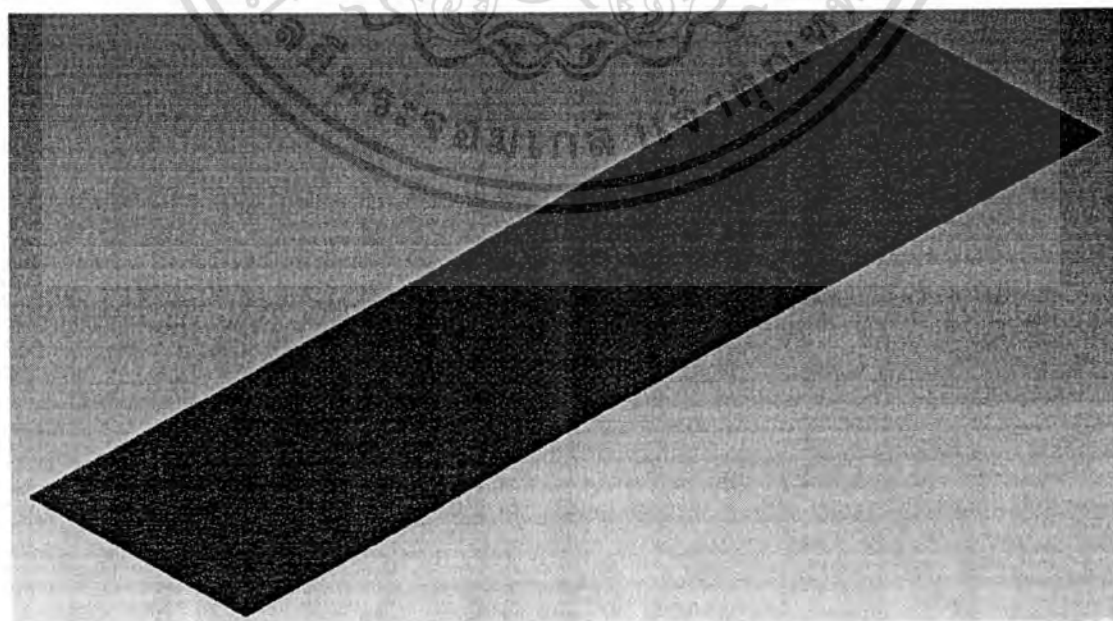
เมื่อกำหนดขนาดของแผ่นฮอลล์เพลทเสร็จแล้ว เราจะทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้าง ซึ่งจากรูปที่ 3.13 เราจะเห็นว่าหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.13 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD

3.3.1.3 การแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์

หลังจากการสร้างตัวอุปกรณ์และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์แล้ว เราจะทำการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.14 แสดงการแบ่งกริดบนโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.4 โครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ

หลังจากการสร้างแผ่นฮอลล์เพลทใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาดและวัสดุที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้โครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

3.3.2 การจำลองแบบการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากโครงสร้างฮอลล์เพลทเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแตนท์เพียงเล็กน้อยดังนั้นเพื่อเพิ่มค่าแมกนีโตริซิสแตนท์ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเราจึงออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีความสั้นหรือมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่าแรงลอเรนซ์ทำให้กระแสเกิดการหักเห ซึ่งนำไปสู่การออกแบบโดยการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทเพื่อเพิ่มค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานรวมกับสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.19 ซึ่งจากรูปแสดงการออกแบบการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร โดยใช้อลูมิเนียมที่มีความยาว 0.5 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตร เช่นเดียวกับขนาดความกว้างของฮอลล์เพลท และหนาครึ่งหนึ่งของฮอลล์เพลทคือ 0.5 ไมโครเมตร โดยให้มีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร จากบริเวณกึ่งกลางของอลูมิเนียม โดยทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในแนวแกน y ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเช่นเดียวกัน ซึ่งโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทสำหรับใช้ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนท์แสดงขั้นตอนในส่วนต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท

โดยขั้นตอนแรกของการจำลองแบบการสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท เราจะทำการสร้างแผ่นฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12

3.3.2.2 สร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

เมื่อกำหนดขนาดของแผ่นฮอลล์เพลทเสร็จแล้ว เราจะทำการสร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยใช้อลูมิเนียมที่มีความยาว 0.5 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตร และหนา 0.5 ไมโครเมตร โดยให้มีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.16

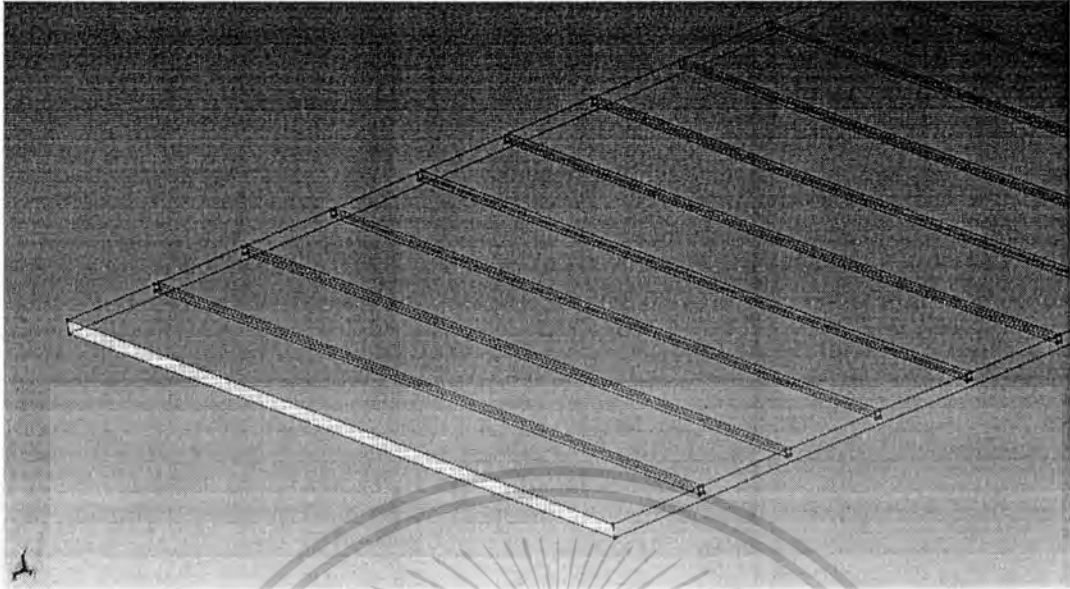


รูปที่ 3.16 แสดงลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม

3.3.2.3 กำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม

เมื่อกำหนดลวดลายและขนาดของอลูมิเนียมเสร็จแล้ว เราจะทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งจากรูปที่ 3.17 เราจะเห็นว่าหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้

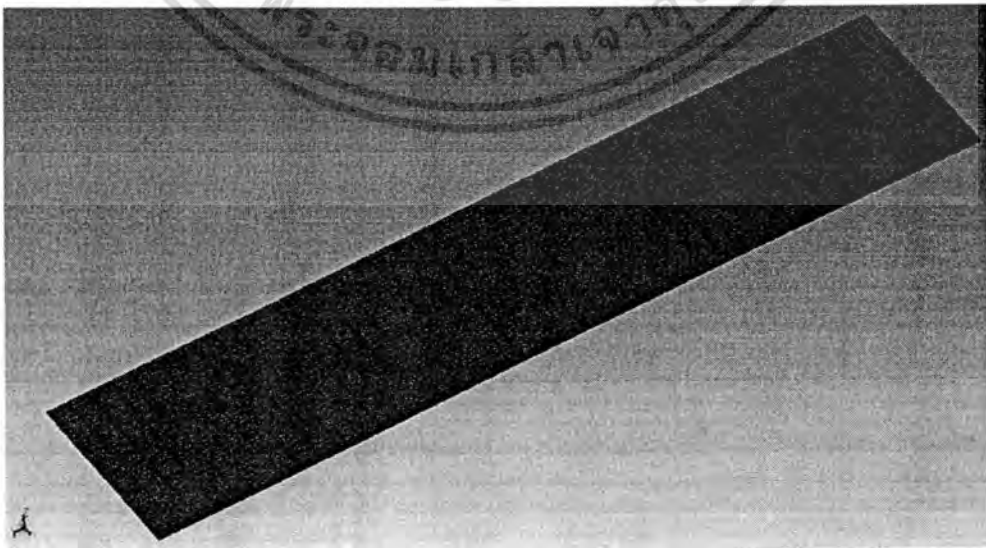
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมจากการจำลองแบบ TCAD

3.3.2.4 การแบ่งกริด (grid) บนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท

หลังจากทำการสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทและการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์แล้ว เราจะทำการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการแบ่งกริดของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้ผู้ใดนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และจะดำเนินการฟ้องดำเนินคดีตามกฎหมายต่อไป

3.3.2.5 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ

หลังจากการสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาด วัสดุ และการออกแบบที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้ โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองแบบดังแสดงใน รูปที่ 3.19



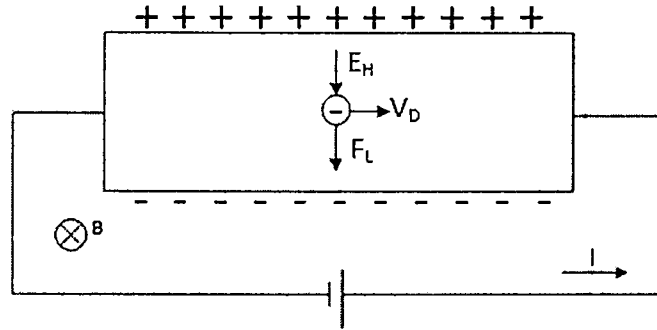
รูปที่ 3.19 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

อย่างไรก็ตามการอนุกรมความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่อง การออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างช่องว่างอลูมิเนียมมีผลกับปรากฏการณ์ แมกนีโตรีซิสแตนซ์ โดยถ้าช่องว่างของอลูมิเนียมมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิด สนามไฟฟ้าฮอลล์ระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมได้ ซึ่งอาจส่งผลกับค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่มีค่าลดลง โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการ ออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อช่วยใน เรื่องของการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากและระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมดังกล่าว

3.3.3 การออกแบบโดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

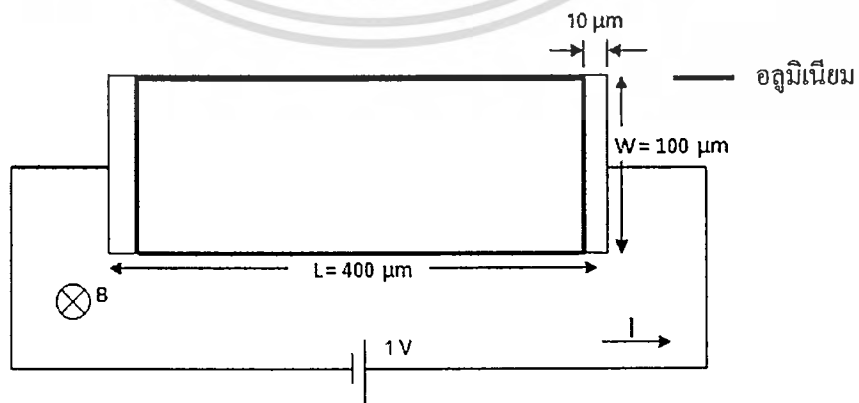
จากโครงสร้างฮอลล์เพลท ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากสนามไฟฟ้าทางด้านข้างของแผ่น ฮอลล์เพลท ซึ่งเกิดจากประจุชนิดตรงกันข้ามดังแสดงในรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



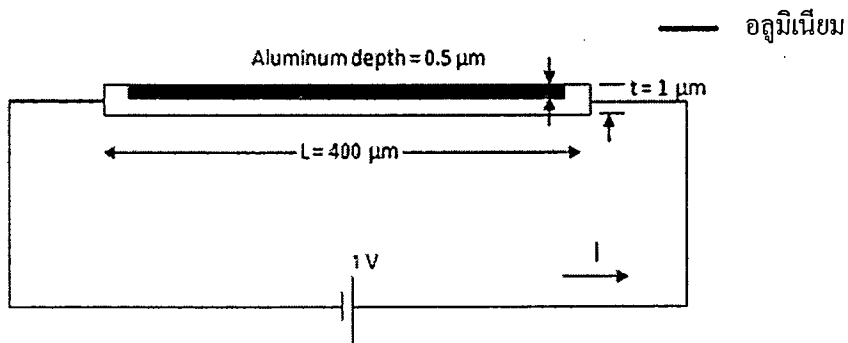
รูปที่ 3.20 แสดงประจุทางด้านข้างบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าโดยไม่มีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นอีก ทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อย แต่เราสามารถทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์มีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นได้โดยการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งได้กล่าวก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามเราพบว่าการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบต่างๆ เช่นการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากและระยะห่างของช่องว่างอลูมิเนียมมีผลโดยตรงกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ ดังนั้นเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว เราจึงทำการออกแบบโครงสร้างฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยมีระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ถูกจำลองแบบขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากพาหะประจุบริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทซึ่งจะทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์เกิดขึ้นไม่เต็มที่ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าฮอลล์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมเป็นศูนย์จึงทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนอย่างเต็มที่ตามความเข้มข้นแม่เหล็ก อีกทั้งยังเป็นการออกแบบที่ค่อนข้างง่ายเพราะไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียม



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.21 โครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมกับหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตร

ในส่วนนี้เราจะทำการจำลองแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD โดยเราจึงทำการจำลองแบบโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร จากนั้นจะทำการสร้างวงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทที่มีความยาว 380 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตร และลึก 0.5 ไมโครเมตร โดยทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทในแนวแกน y ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเช่นเดียวกัน ซึ่งโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทสำหรับการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์แสดงขั้นตอนในส่วนต่างๆดังนี้

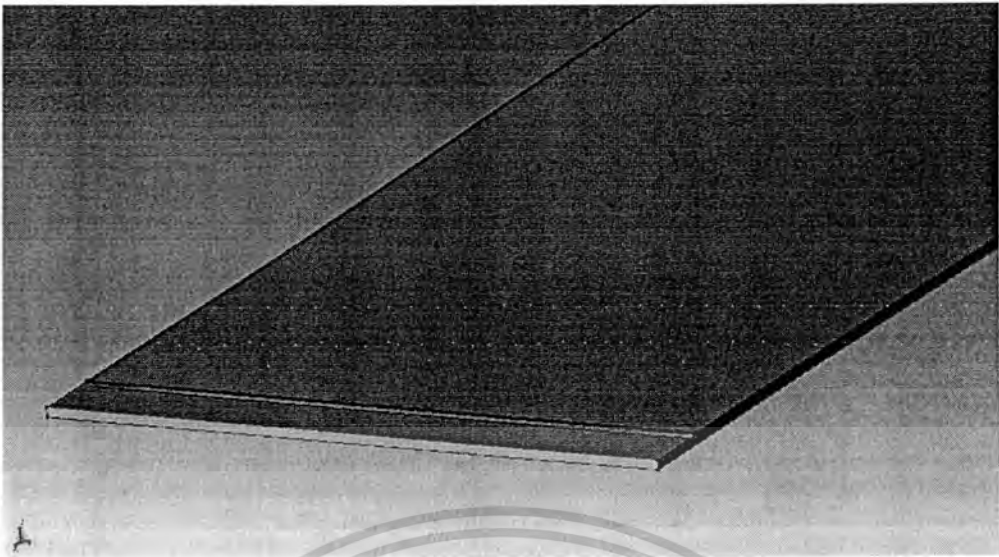
3.3.3.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท

โดยขั้นตอนแรกของการจำลองแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท เราจะทำการสร้างแผ่นฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12

3.3.3.2 สร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

เมื่อกำหนดขนาดของแผ่นฮอลล์เพลทเสร็จแล้ว เราจะทำการสร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท โดยใช้อลูมิเนียมที่มีความยาว 380 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตร และหนา 0.5 ไมโครเมตร โดยให้มีระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.22

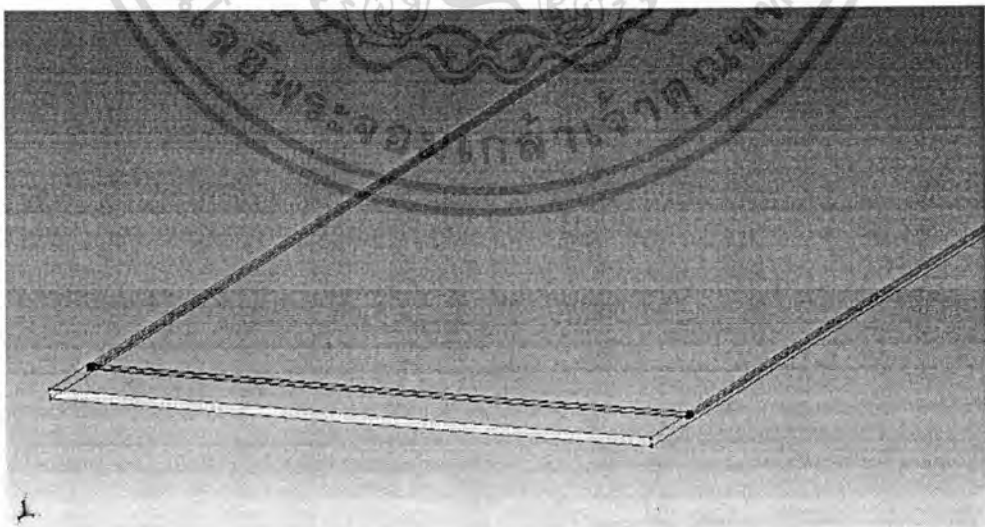
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แสดงลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลา

3.3.3.3 กำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลา

เมื่อกำหนดลวดลายและขนาดของอลูมิเนียมเสร็จแล้ว เราจะทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลา ซึ่งจากรูปที่ 3.23 เราจะเห็นว่าหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้

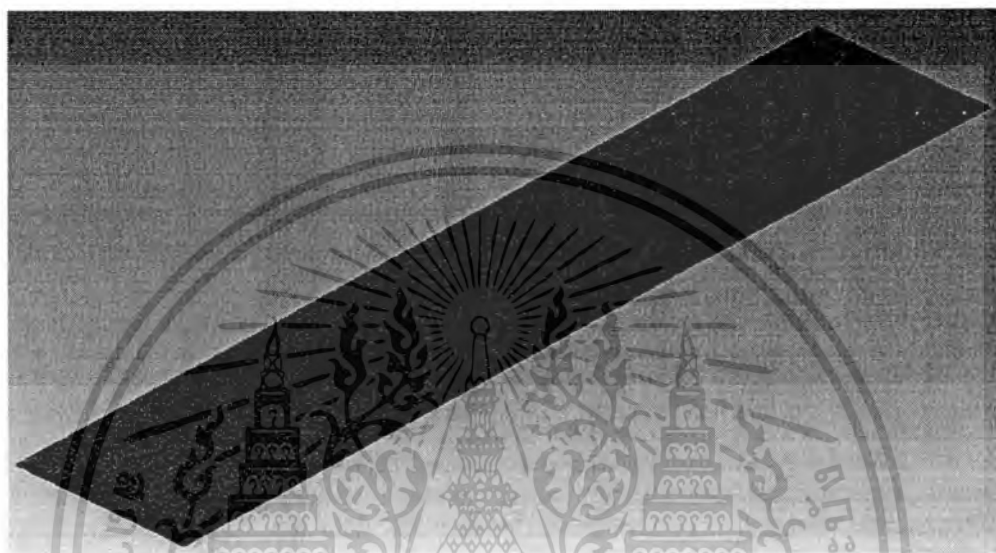


รูปที่ 3.23 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมล้อมรอบฮอลล์เพลาจากการจำลองแบบ TCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.4 การแบ่งกริด(grid) บนโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลา

หลังจากทำการสร้างโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลาและการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์แล้ว เราจะทำการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงการแบ่งกริดของโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลา

3.3.3.5 โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลาในการจำลองแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.25 แสดงโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลา ซึ่งด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการสร้างโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอคูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาด วัสดุ และการออกแบบที่ต้องการเรียบร้อยแล้วเราก็จะได้โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอคูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 3.25

3.3.4 การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง

ในการจำลองแบบโมเดลทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการจำลองแบบการทำงานเพื่อศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแทนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท เราจะทำการจำลองแบบโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆ ไว้ในส่วนของ Sentaurus Device เช่น โมเดลสภาพคล่องของพาหะ โดยใน Sentaurus Device ประกอบด้วยโมเดลที่เกี่ยวกับสภาพคล่องของพาหะมากมาย เช่น สภาพคล่องของพาหะเนื่องจากอุณหภูมิและความเข้มข้นอะตอมสารเจือ สภาพคล่องของพาหะบริเวณรอยสัมผัสของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณแชนแนล (channel) ของมอสเฟต สภาพคล่องของพาหะเนื่องจากการชนกับพาหะ และการลดลงของสภาพคล่องของพาหะในขณะที่มีสนามไฟฟ้าสูง โมเดลที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็กเป็นต้น โดยในการจำลองแบบสำหรับใช้ในการจำลองแบบสภาพคล่องของพาหะ เราจะทำการจำลองแบบที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและความเข้มข้นพาหะที่มีผลต่อสภาพคล่องของพาหะ โดยเราจะใช้คำสั่ง Mobility(DopingDependence)^[30] โดยคำสั่งนี้จะมีสมการที่ใช้ในการจำลองแบบดังนี้

$$\mu_{dop} = \mu_{min1} \exp\left(-\frac{P_c}{N_{tot}}\right) + \frac{\mu_{const} - \mu_{min2}}{1 + (N_{tot}/C_r)^\alpha} - \frac{\mu_1}{1 + (C_s/N_{tot})^\beta} \quad (3.1)$$

$$\text{โดย } \mu_{const} = \mu_L \left(\frac{T}{300K}\right)^{-\zeta} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ในโมเดลที่เกี่ยวข้องกับสภาพคล่องของพาหะ

Symbol	Electrons	Holes	Unit
μ_L	1417	470.5	cm^2/Vs
ζ	2.5	2.2	1
μ_{min1}	52.2	44.9	cm^2/Vs
μ_{min2}	52.2	0	cm^2/Vs
μ_1	43.4	29.0	cm^2/Vs
P_c	0	9.23×10^{16}	cm^{-3}
C_r	9.68×10^{16}	2.23×10^{17}	cm^{-3}
C_s	3.34×10^{20}	6.10×10^{20}	cm^{-3}
α	0.68	0.719	1
β	2.0	2.0	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์โดยการจำลองแบบ TCAD

จากที่เรากล่าวก่อนหน้านี้นี้ว่าปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์สามารถเพิ่มอย่างมีระยะสำคัญเมื่ออยู่ในเงื่อนไขที่เหมาะสม ดังนั้นในส่วนนี้เราจึงนำพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือและอุณหภูมิจัด โดยในการจำลองแบบเราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน (Silicon) และแกเลียมอาเซไนด์ (Gallium arsenide) ทำการโด๊ปด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทดลองที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน โดยทำการจำลองแบบพารามิเตอร์กับทั้ง 3 โครงสร้างคือ โครงสร้างฮอลล์เพลท, การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช่วงแหวนอูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท โดยในการจำลองแบบที่เกี่ยวกับชนิดของฐานรองและความเข้มข้นอะตอมสารเจือเราสามารถจำลองในส่วนของ Sentaurus Structure Editor ส่วนในการจำลองการทำงานในส่วนของอุณหภูมิจัด เราสามารถจำลองในส่วนของ Sentaurus Device ซึ่งในส่วนโปรแกรมการจำลองแบบจะแสดงในส่วนภาคผนวกของวิทยานิพนธ์

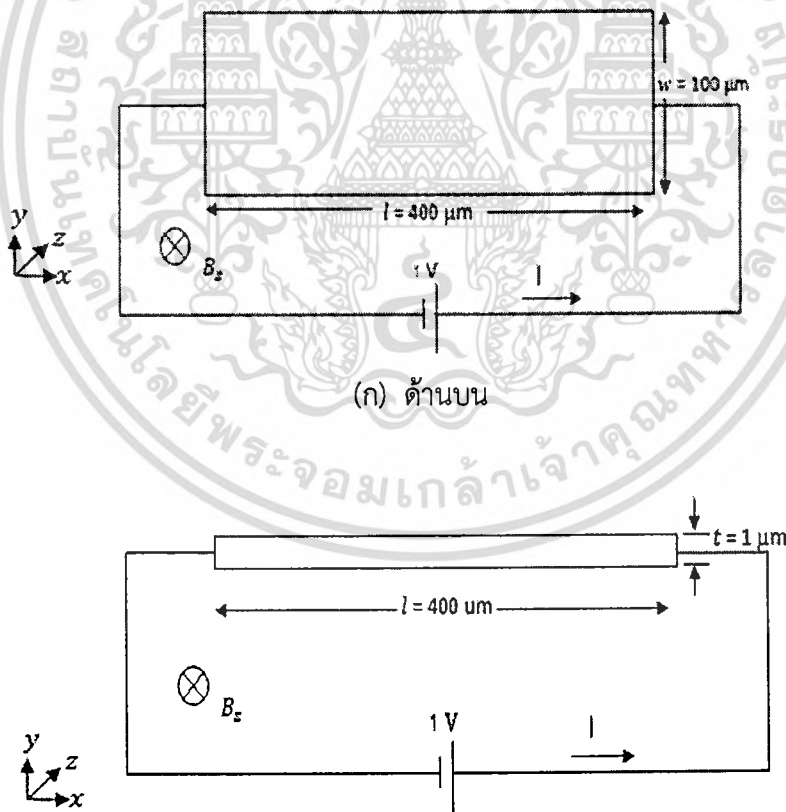


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองการจำลองการทำงานปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ ได้แก่ ชนิดของวัสดุ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา (Tesla) การจำลองการทำงานใช้โครงสร้างฮอลล์เพลทชนิดเอ็นมีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร มีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสและระนาบของฮอลล์เพลทในทิศทาง z โดยในการจำลองการทำงานเราใช้แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ ซึ่งโครงสร้างสำหรับการทดลองเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์แสดงดังรูปที่ 4.1



(ก) ด้านบน

(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.1 โครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการจำลองแบบ เราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิดได้แก่ ซิลิคอน(Silicon) และแกเลียมอาเซไนด์ (Gallium arsenide) ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์หาได้จากสมการที่ 4.1

$$\%MR(H) = \% \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(H=0)}{R(H=0)} \times 100\% \quad (4.1)$$

โดย $R(H)$ คือ ความต้านทานที่ขั้วไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ (V/I) ที่สนามแม่เหล็ก H

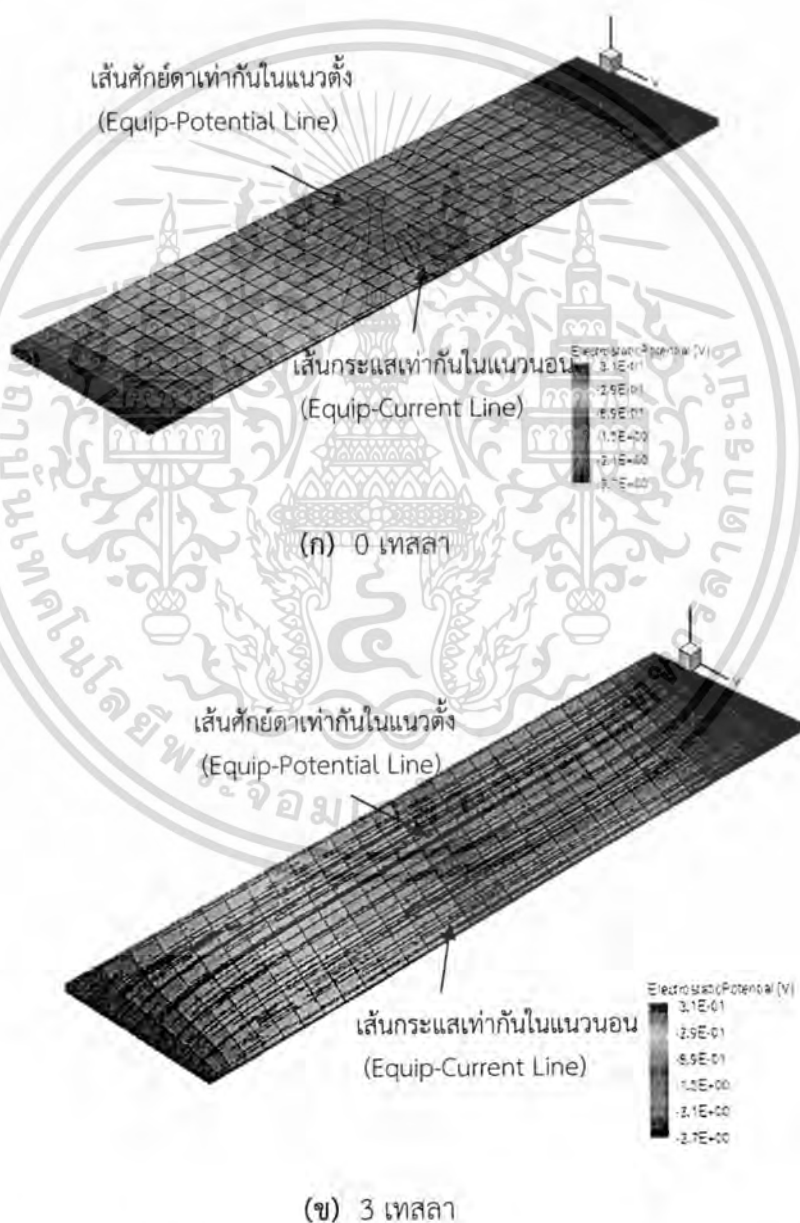
หลังจากที่ได้ศึกษาการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท และพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์แล้วในส่วนต่อไปจะทำการจำลองแบบเพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยการออกแบบให้เกิดการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทซึ่งโครงสร้างนี้จะสามารถเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์ได้แต่มีข้อเสียเปรียบในเรื่องของระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมซึ่งทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์เกิดขึ้นไม่เต็มที่ถ้าระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมห่างกันมากพอที่จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นอีกทั้งยังเป็นการออกแบบโครงสร้างที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน จากข้อเสียเปรียบของโครงสร้างที่กล่าวมานี้ เราจึงนำไปสู่การศึกษาการจำลองแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยให้มีระยะห่างจากหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แก้ปัญหาเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมและยังเป็นโครงสร้างที่ไม่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้นหรือสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้พายุเกิดการเบี่ยงเบนได้เต็มที่ ต่อจากนั้นนำพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ศึกษานำมาช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์ในโครงสร้างทั้ง 2 แบบ คือการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อเป็นการยืนยันผลของพารามิเตอร์ที่สามารถนำมาสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์ได้อีกด้วย

4.1 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท

ในขั้นตอนแรกเราศึกษาผลของแมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยเราจะทำการวัดค่ากระแสและแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันจาก 0 – 3 เทสลา โครงสร้างของฮอลล์เพลทที่เราใช้ในการจำลองการทำงานมีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร โดยเราจะทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อให้เป็นสารชนิดเอ็น ทำการจำลองแบบที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ โดยโครงสร้างฮอลล์เพลทที่เราใช้ศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์จะใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และแกเลียมอาเซไนด์

4.1.1 ซิลิคอนฮอลล์เฟลท

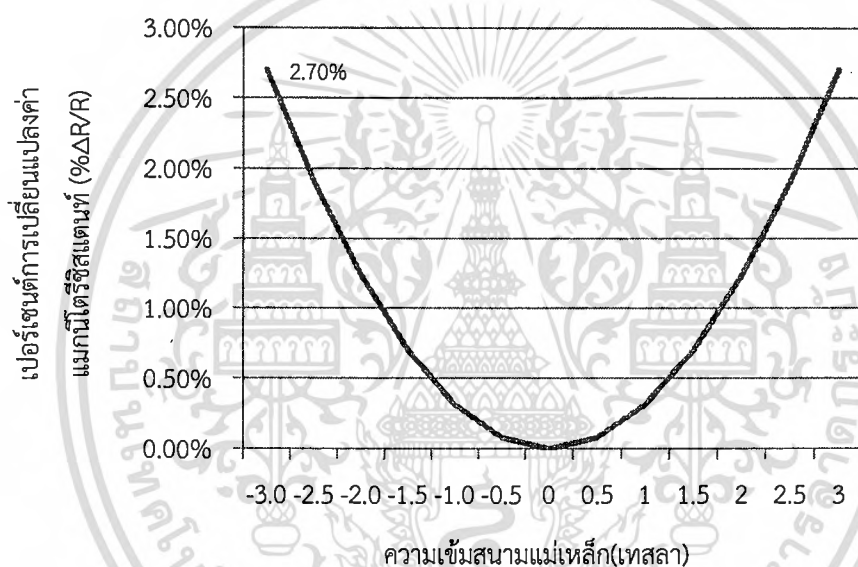
จากรูปที่ 4.2 แสดงเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอน (เส้นตรงมีหัวลูกศร) และเส้นศักย์ที่เท่ากันในแนวตั้ง(เส้นตรงไม่มีหัวลูกศร)ของการจำลองการทำงานด้วย TCAD ของซิลิคอนฮอลล์เฟลทที่สนามแม่เหล็ก 0 เทสลา และ 3 เทสลาที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน รูปที่ 4.2(ก) ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 4.21 ไมโครแอมป์ และความต้านทาน 235.36 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้น ส่วนเส้นที่มีศักย์ที่เท่ากันในแนวตั้งจะเป็นเส้นตรงซึ่งหมายความว่าไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เฟลทเกิดขึ้น



รูปที่ 4.2 แสดงเส้นทางกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักย์ที่เท่ากันในแนวตั้งที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของซิลิคอนฮอลล์เฟลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการคัดลอกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในรูปที่ 4.2(ข) เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามแม่เหล็ก 3 เทสลาที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 4.10 ไมโครแอมป์ และความต้านทาน 241.72 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนมีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้าเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสเอทพุทที่ได้มีค่าน้อยลงกว่ากรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กขึ้น ส่วนบริเวณกลางของซิลิคอนฮอลล์เพลท การเคลื่อนที่ของพาหะจะไม่มีเบี่ยงเบน เนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์บริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ซึ่งเราจะเห็นได้จากเส้นศักดาไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งจะมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของซิลิคอนฮอลล์เพลทแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์อยู่ที่ 2.70%

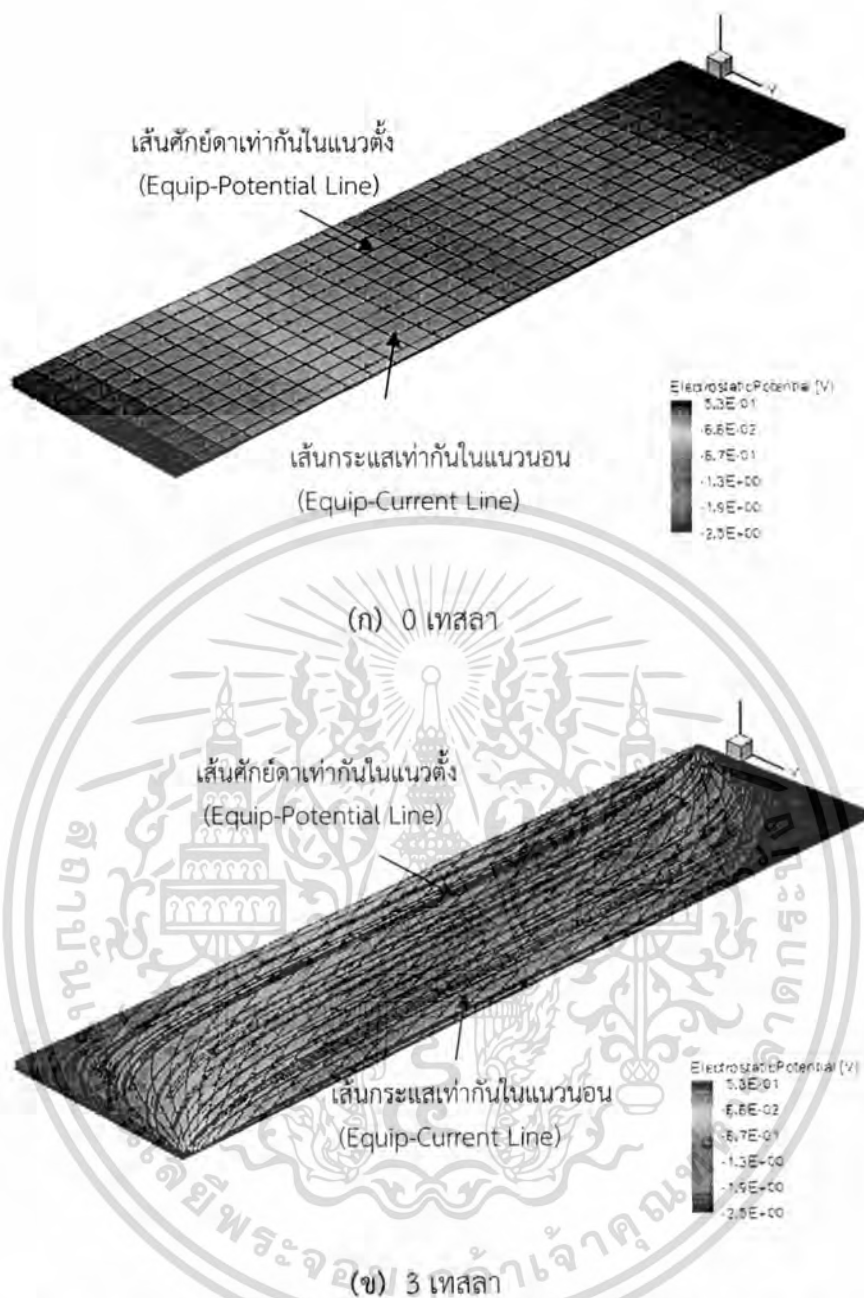


รูปที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

4.1.2 แกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 4.4 แสดงเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดาไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งของการจำลองการทำงานด้วย TCAD ของโครงสร้างแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลทที่สนามแม่เหล็ก 0 เทสลา และ 3 เทสลา ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน รูปที่ 4.4 (ก) ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 24.96 ไมโครแอมป์ และ ความต้านทาน 39.66 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนไม่มีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นเช่นเดียวกับซิลิคอนฮอลล์เพลท ส่วนเส้นที่มีศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งจะเป็นเส้นตรงซึ่งหมายความว่าไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท

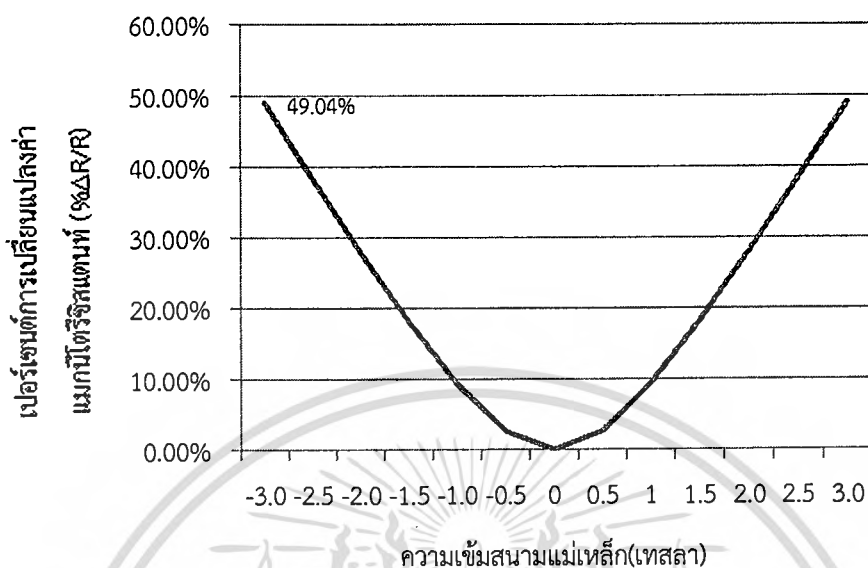
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักย์ที่เท่ากันในแนวตั้งที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท

ส่วนในรูปที่ 4.4(ข) เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 16.75 ไมโครแอมป์ และความต้านทาน 59.11 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนบริเวณใกล้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้ามีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสเออร์ทพุทที่ได้มีค่าน้อยลงกว่ากรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้น ยกเว้นบริเวณตรงกลางของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท ซึ่งการเคลื่อนที่ของพาหะจะไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้น เนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์บริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ซึ่งเราสังเกตได้จากเส้นศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งจะมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นซึ่งเกิดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลทอยู่ที่ 49.04% แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

จากรูปที่ 4.3 และ 4.5 แสดงให้เห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่มากกว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอน ซึ่งจากรูป 4.2(ข) และ 4.4(ข) เราพบว่าที่สนามแม่เหล็ก 3 เทสลา การเบี่ยงเบนของพาหะบริเวณใกล้กับหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์มีการเบี่ยงเบนที่มากกว่าซิลิคอนซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในโครงสร้างฮอลล์เพลทผลของปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าฮอลล์บริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ดังนั้นเพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท เราจึงศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ เช่น ชนิดของวัสดุ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา โดยใช้โปรแกรม TCAD ในการจำลองการทำงาน

4.2 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท

ในโครงสร้างฮอลล์เพลทผลของปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก เนื่องจากแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไม่เต็มที่จึงทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามเราพบว่า การเบี่ยงเบนของพาหะจะขึ้นอยู่กับแรงลอเรนซ์ ซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าโมบิลิตีของพาหะ ดังนั้นเพื่อให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีการเบี่ยงเบนมากขึ้น เราจะต้องทำให้ค่าสภาพคล่องของพาหะมีค่าสูง ดังนั้น ในการจำลองแบบเราจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนค่า

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

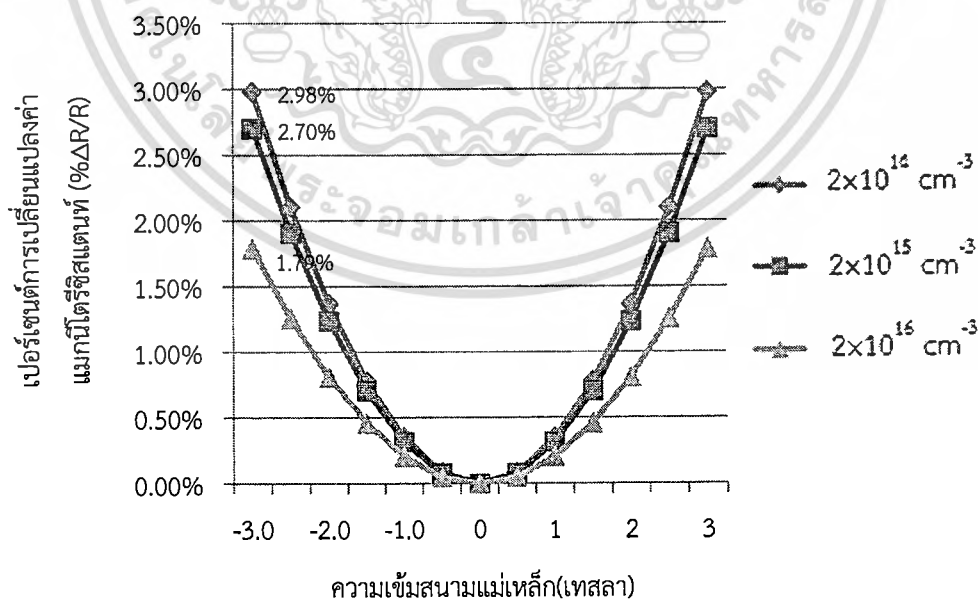
ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนทีในโครงสร้างของฮอลล์เพลท ได้แก่ ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็นฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 -3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ โดยในการจำลองแบบ เราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน (silicon) และแกเลียมอาเซไนด์ (gallium arsenide) ทำการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตรีซิสแดนทีที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน

4.2.1 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration)

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนทีของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกเลียมอาเซไนด์ โดยทดลองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

4.2.1.1 ซิลิคอน

จากรูปที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนทีของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนทีเป็น 2.98%, 2.70% และ 1.79% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ

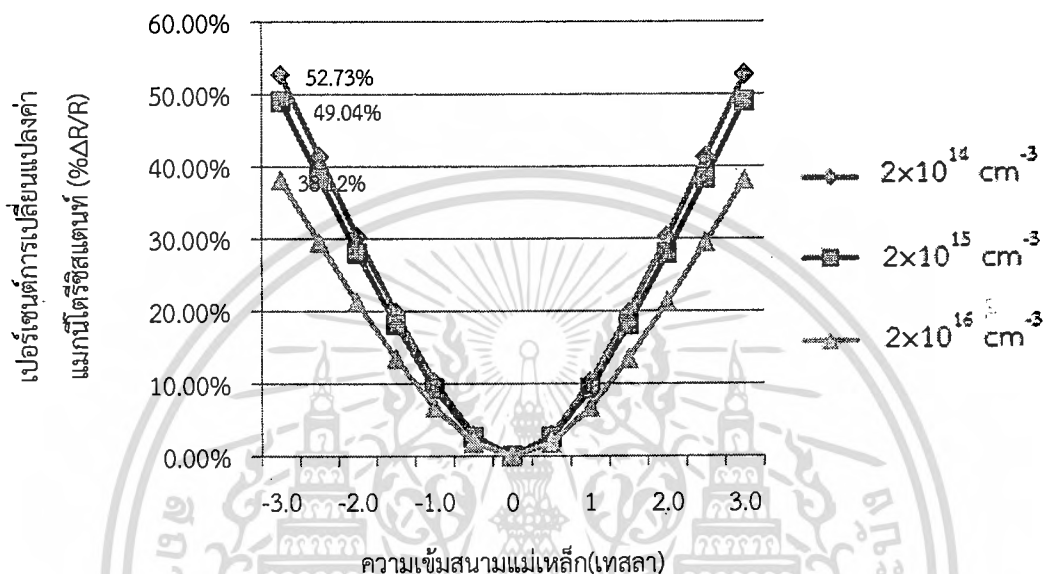


รูปที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนทีกับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของซิลิคอนฮอลล์เพลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.2 แกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 52.73%, 49.04% และ 38.12% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



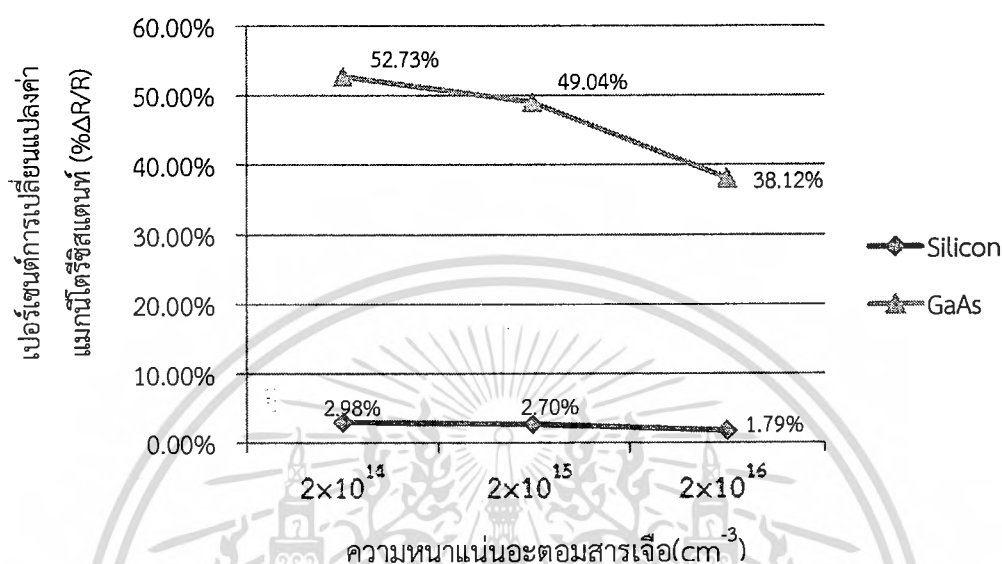
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ฮอลล์เพลทที่สร้างมาจากซิลิคอนจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 2.98%, 2.70% และ 1.79% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 4.7 ฮอลล์เพลทที่สร้างมาจากแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 52.73%, 49.04% และ 38.12% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างมาจากซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์มีค่าสูงขึ้น

4.2.2 ชนิดของวัสดุ (Material type)

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ในส่วนนี้ เราจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนด์ โดยทดลองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่สนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ซึ่งจากรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะเห็นว่าแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่มากกว่า

ซิลิคอน ซึ่งแกลเลียมอาเซไนด์ฮออลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 52.73%, 49.04% และ 38.12% และซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 2.98%, 2.70% และ 1.79% ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ ตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์

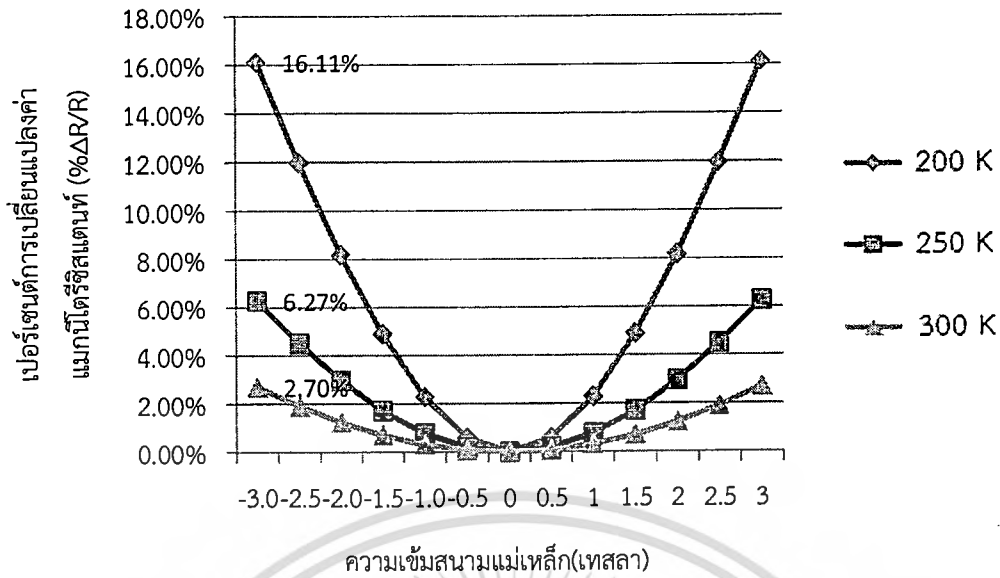
4.2.3 อุณหภูมิ

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ โดยทดลองที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

4.2.3.1 ซิลิคอน

จากรูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของซิลิคอนฮออลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ จะเห็นว่าฮออลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 16.11%, 6.27% และ 2.70% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ โดยจากการทดลองเราพบว่าซิลิคอนฮออลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200 เคลวิน จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์มากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300 เคลวิน ตามลำดับ

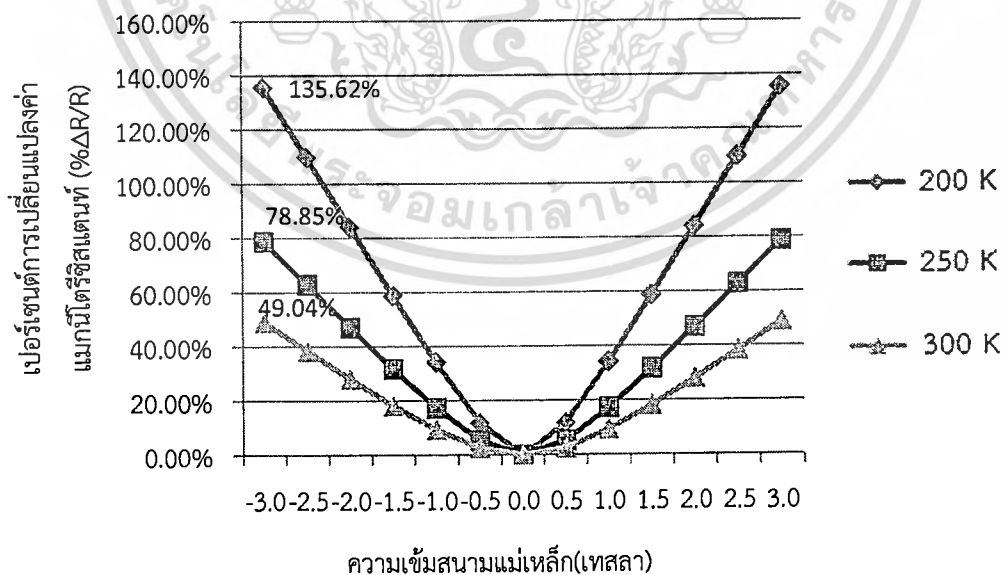
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

4.2.3.2 แกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของแกลเลียมอาเซไนด์ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์ จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 135.62%, 78.85% และ 49.04% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 ซึ่งเป็นรูปที่แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของวัสดุทั้ง 2 ชนิดคือ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนด์ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน จะเห็นว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิด ที่อุณหภูมิ 200 เคลวิน จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์มากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300 เคลวิน ตามลำดับ และจากการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท เราสามารถที่จะสรุปผลแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ได้ทั้งหมดดังตารางที่ 4.1 ของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ดังนี้

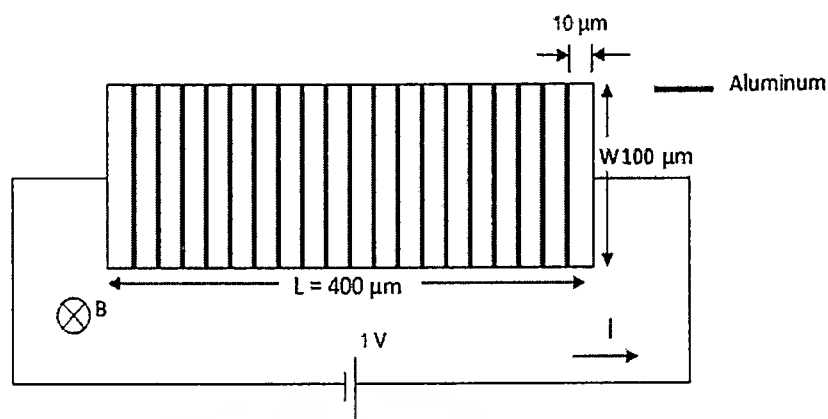
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน บนโครงสร้างฮอลล์เพลท

วัสดุ	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ		
		$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
ซิลิคอน	200	17.54 %	16.11 %	11.22 %
	250	6.89 %	6.27 %	4.20 %
	300	2.98 %	2.70 %	1.79 %
แกลเลียมอาเซไนด์	200	158.60 %	135.62 %	82.59 %
	250	87.32 %	78.85 %	55.81 %
	300	52.73 %	49.04 %	38.12 %

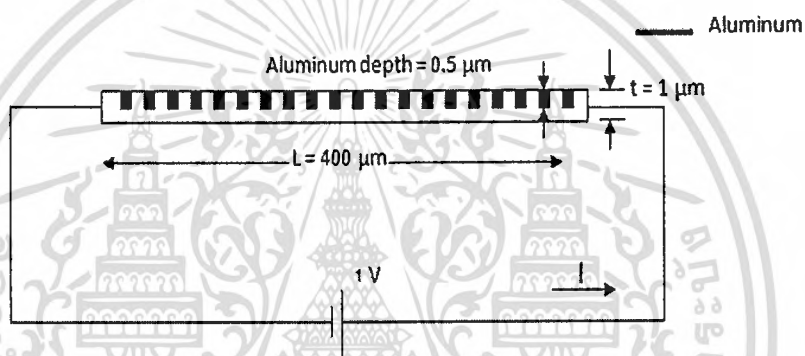
4.3 การอนุกรมค่าความต้านทานบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองการจำลองการทำงานปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยการอนุกรมค่าความต้านทานรวม จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ ได้แก่ ชนิดของวัสดุ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา การจำลองการทำงานใช้โครงสร้างฮอลล์เพลทชนิดเอ็นที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร โดยให้มีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร ซึ่งอลูมิเนียมมีความยาว 0.5 ไมโครเมตร ความกว้างเท่ากับความกว้างของแผ่นฮอลล์เพลท 100 ไมโครเมตร ความหนา 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งโครงสร้างสำหรับใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสในทิศทาง z ในการจำลองการทำงานเราใช้แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.11 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท

ซึ่งจากโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทในรูปที่ 4.11 เราจะทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม TCAD ในการศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์รวมถึงลักษณะการเบี่ยงเบนของพาหะ ดังรูปที่ 4.12 แสดงเส้นทางเดินกระแสของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่สนามแม่เหล็ก 0 เทสลาและ 3 เทสลาที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน รูปที่ 4.12(ก) ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ที่แรงดัน 1 โวลต์จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้า 4.41 ไมโครแอมป์ และความต้านทานไฟฟ้า 224.34 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนไม่มีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.12(ข) เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามแม่เหล็ก 3 เทสลาที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้า 3.68 ไมโครแอมป์ และความต้านทานไฟฟ้า 269.24 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสเอ้าท์พุทที่ได้มีค่าน้อยลงกว่ากรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กขึ้น ส่วนเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักดาไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งจะไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นซึ่งแสดงว่าไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท



(ข) 3 เทสลา

รูปที่ 4.12 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนซิลิคอนฮอลล์เพลท

แต่อย่างไรก็ตามมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเล็กน้อยบริเวณด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทซึ่งเกิดจากมีพาหะบางส่วนเกิดการเบี่ยงเบนไปทางด้านข้างของแผ่นจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นจึงส่งผลทำให้ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนท์เกิดขึ้นไม่เต็มที่ดังนั้นการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน

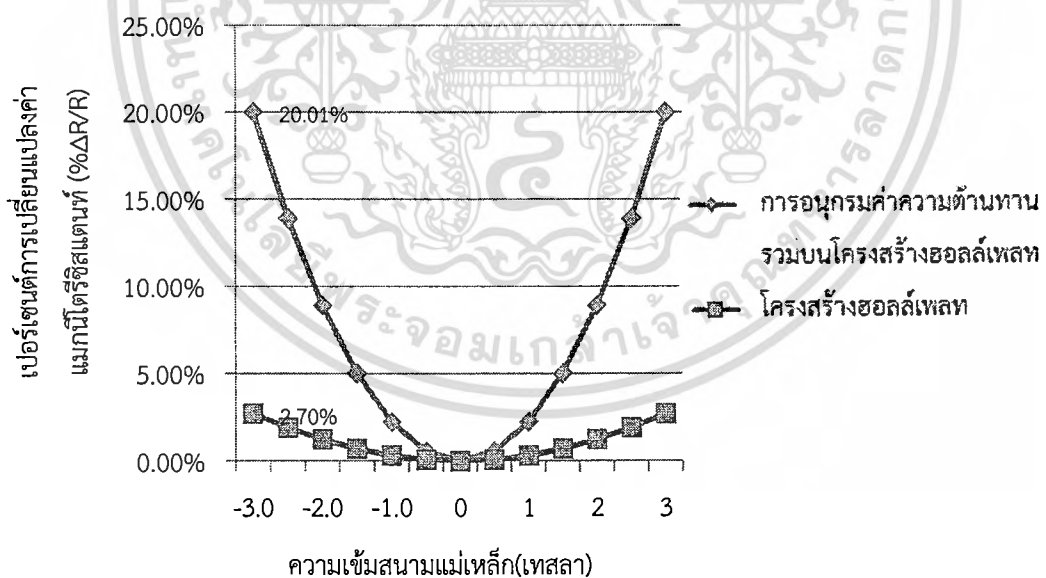
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างฮอลล์เพลทสามารถให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ต่ำกว่าโครงสร้างฮอลล์เพลทเนื่องจากสามารถลดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทได้บางส่วน

ในขั้นตอนต่อไปเราศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยเราจะทำการวัดค่ากระแสและแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันจาก 0 – 3 เทสลา โดยโครงสร้างทั้ง 2 แบบเราจะทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อให้เป็นสารชนิดเอ็นทำการจำลองแบบที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ โดยโครงสร้างฮอลล์เพลทที่เราใช้ศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนที่จะใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนด์

4.3.1 ซิลิคอน

จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ของฮอลล์เพลทกับการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมซิลิคอนฮอลล์เพลท ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มากกว่าซิลิคอนฮอลล์เพลทอยู่ 17.31%

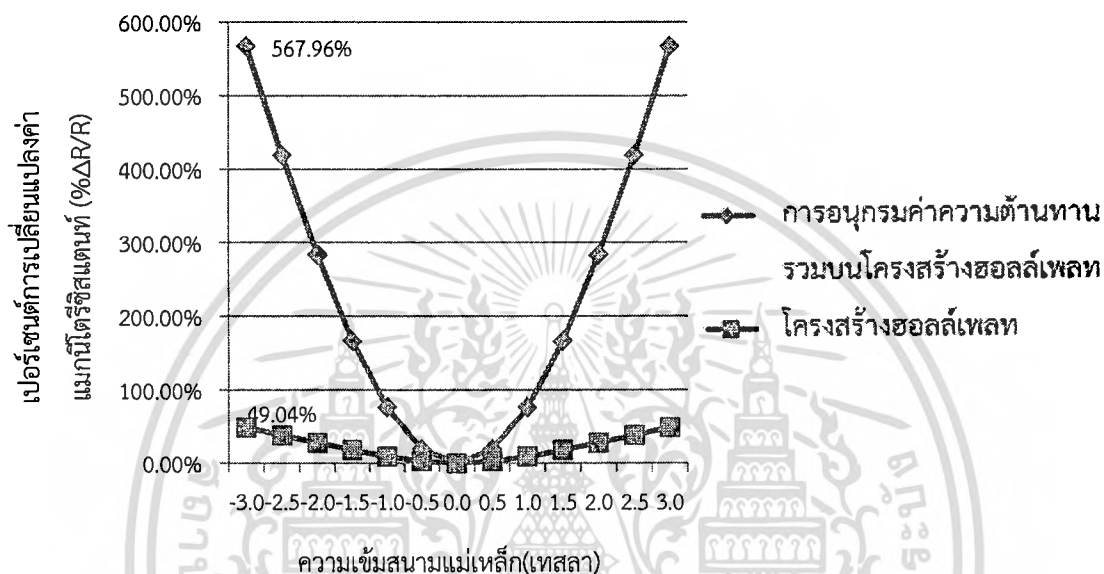


รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ของฮอลล์เพลท และ การออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโดริซิสแดนซ์ของฮอลล์เพลทและการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลท ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่า การออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลทมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโดริซิสแดนซ์ที่มากกว่าแกลเลียมอาเซไนด์ฮอลล์เพลทอยู่ 518.92%



รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโดริซิสแดนซ์ของฮอลล์เพลท และ การออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นว่าการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโดริซิสแดนซ์ที่ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโดริซิสแดนซ์อยู่ที่ 17.31% และแกลเลียมอาเซไนด์อยู่ 518.92% ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวินและสนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ดังนั้นจากโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท เราสามารถที่จะใช้พารามิเตอร์ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้นี้มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโดริซิสแดนซ์โดยพารามิเตอร์ต่างๆเราจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

4.4 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโดริซิสแดนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากก่อนหน้าเราได้นำพารามิเตอร์ต่างๆมาช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโดริซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งในส่วนนี้เราจึงนำพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้เพื่อช่วย

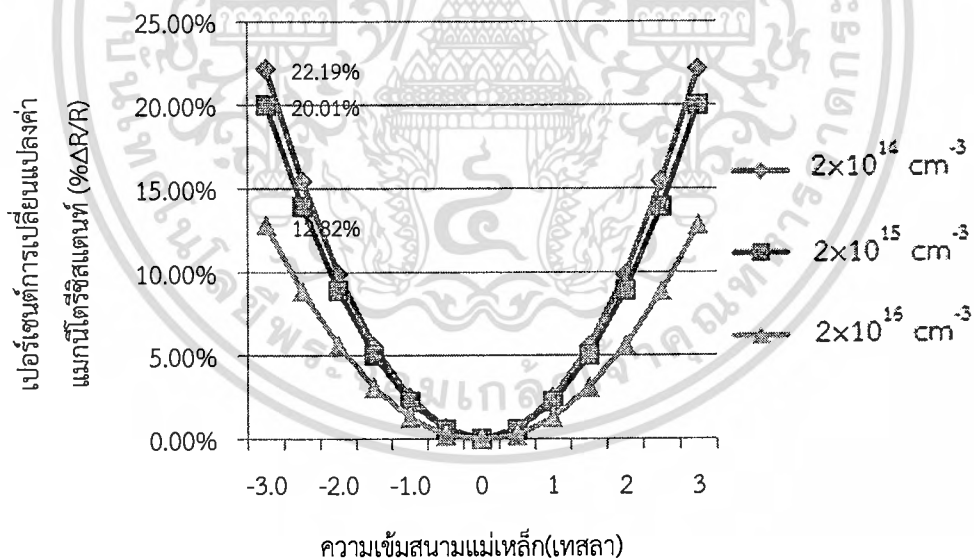
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ โดยจำลองแบบสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 -3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ โดยในการจำลองแบบ เราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ ทำการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ซึ่งผลที่ได้จะนำเสนอในส่วนตัวไป

4.4.1 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ (Doping concentration)

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยได้ทำการทดลองกับวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์ ทำการทดลองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

4.4.1.1 ซิลิคอน



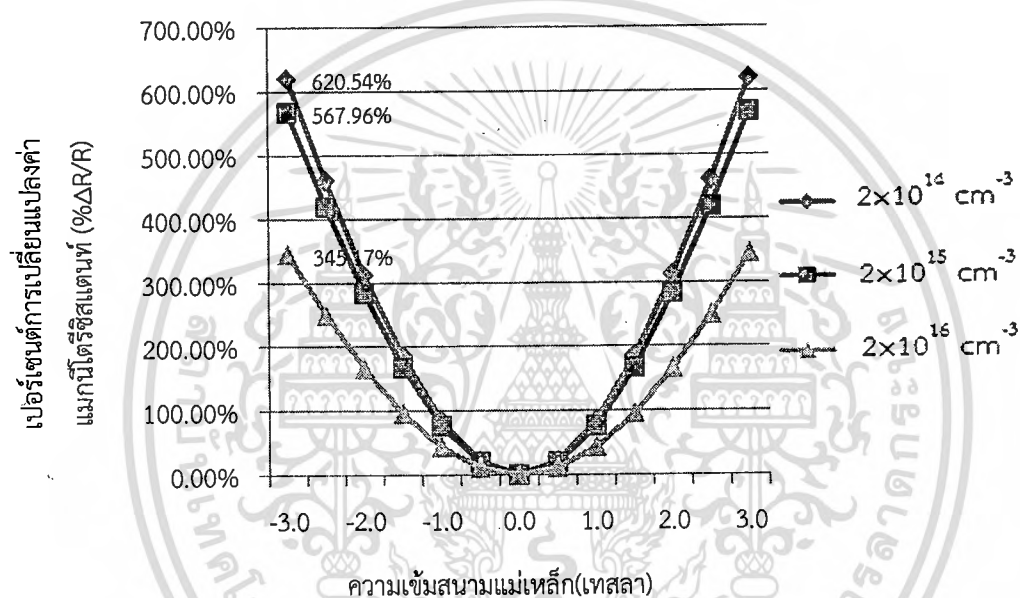
รูปที่ 4.15 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน บนฐานรองซิลิคอน

จากรูปที่ 4.15 แสดงเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทของฐานรองซิลิคอนที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งมีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์

แดนที่ เป็น 22.19%, 20.01% และ 12.82% ตามลำดับ ที่ 3 เทสลา อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนน้อยจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่มากที่สุด

4.4.1.2 แกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่เป็น 620.54%, 567.96% และ 345.17% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



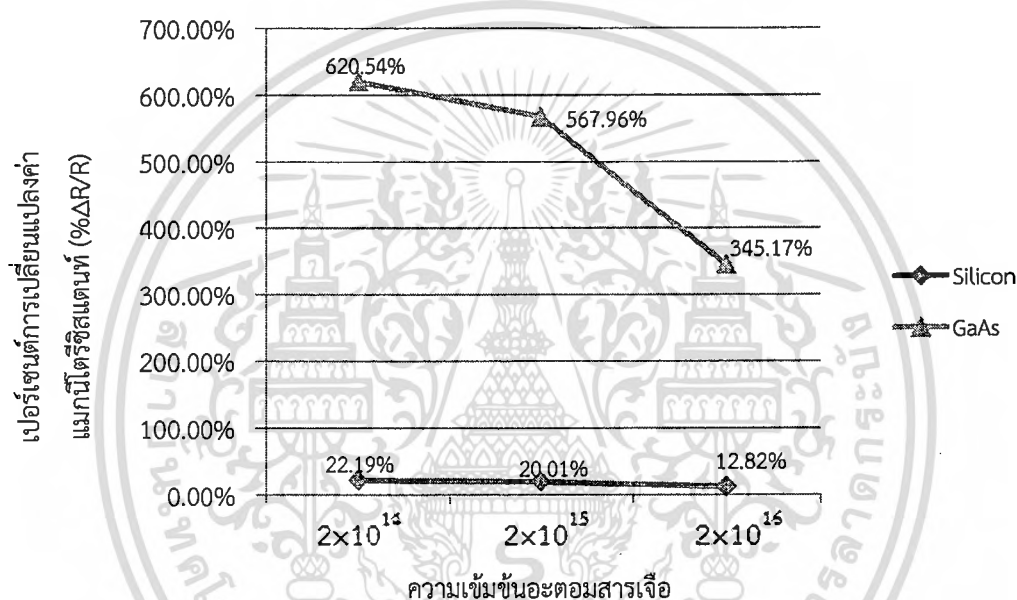
รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน บนฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน คือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่มากกว่า $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ

4.4.2 ชนิดของวัสดุ (Material type)

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทในส่วนนี้ เราจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนที่ของวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ โดยทดลองที่ความเอกซาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่สนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ซึ่งจากรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะเห็นว่า แกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่มากที่สุดคือ 620.54%, 567.96% และ 345.17% รองลงมา คือซิลิคอนซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 22.19%, 20.01% และ 12.82% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยในโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่มากกว่าโครงสร้างฮอลล์เพลทของซิลิคอนอยู่ 7.44 เท่า, 7.41 เท่า และ 7.17 เท่า ของแกลเลียมอาเซไนด์อยู่ 11.77 เท่า, 11.58 เท่า และ 9.05 เท่า ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์

4.4.3 อุณหภูมิ

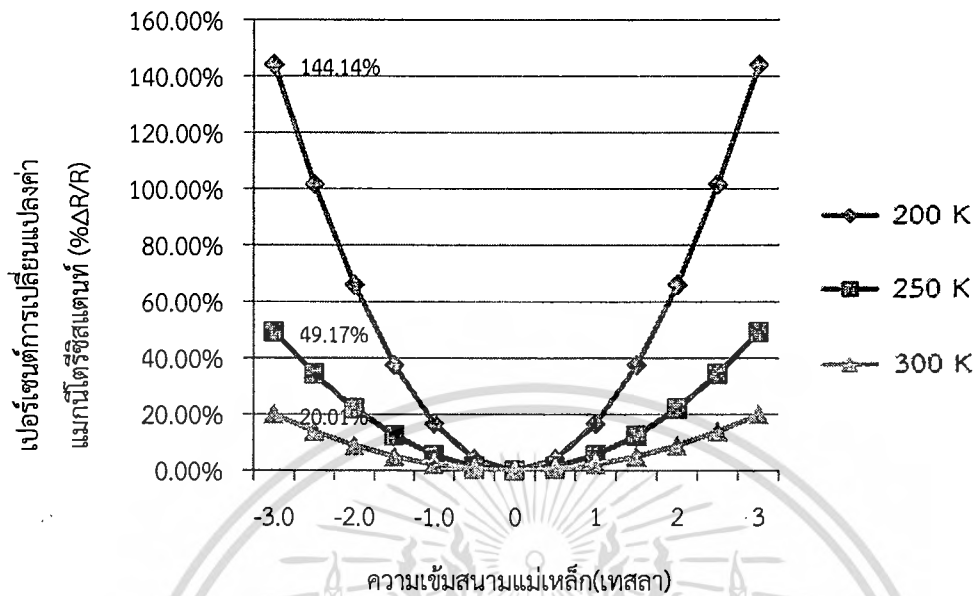
ในส่วนนี้เราจะทำการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

4.4.3.1 ซิลิคอน

จากรูปที่ 4.18 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนซิลิคอนฮอลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้น

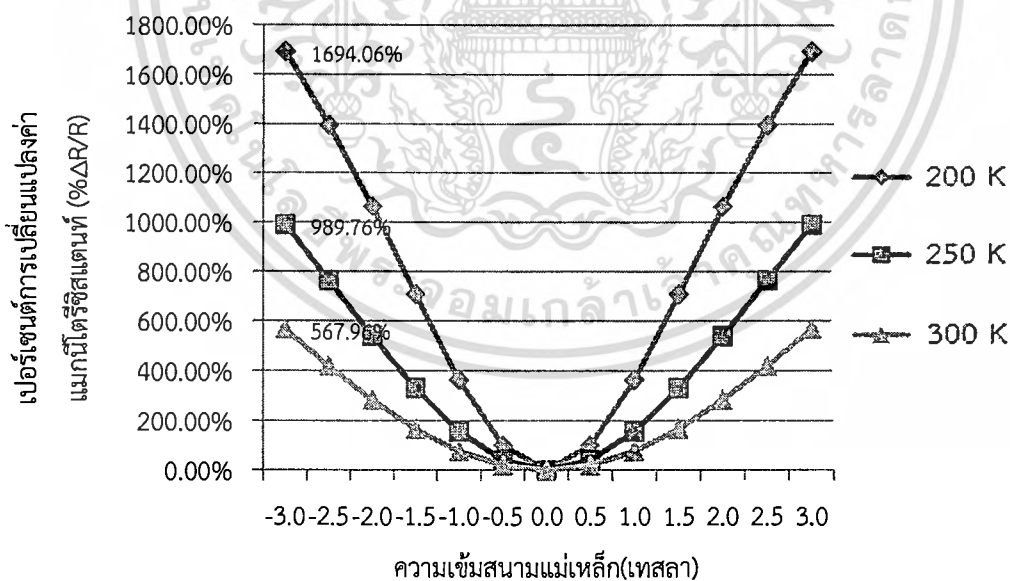
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 144.14%, 49.17% และ 20.01% ที่ 3 เทสลา



รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวม โครงสร้างฮอลล์เพลทกับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองซิลิคอน

4.4.3.2 แกลเลียมอาเซไนต์



รูปที่ 4.19 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์กับอุณหภูมิที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนต์

จากรูปที่ 4.19 แสดงเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนแกลเลียมอาเซไนต์ฮอลล์เพลทที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนต์จะมีเปอร์เซนต์การไม่วอร์มใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

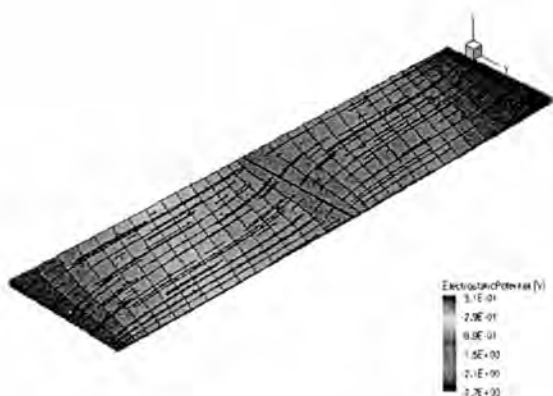
เปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์เป็น 1694.06%, 989.76% และ 567.96% ที่ 3 เทสลา ตามลำดับ จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 200 จะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 250 และ 300 เคลวิน และจากการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ในโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม เราสามารถที่จะสรุปผลเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ได้ทั้งหมดดังตารางที่ 4.2 ของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ดังนี้

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

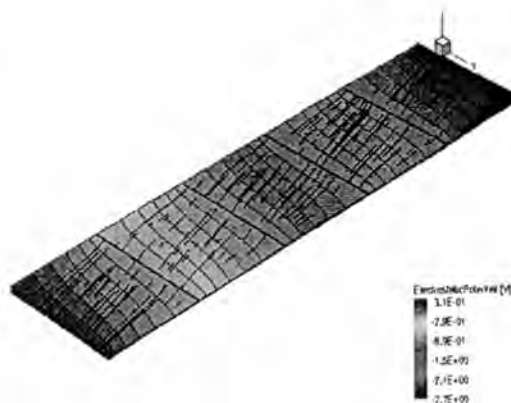
วัสดุ	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ		
		$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
ซิลิคอน	200	160.04 %	144.14 %	91.96%
	250	54.55%	49.17%	31.81%
	300	22.19%	20.01%	12.82%
แกลเลียมอาเซไนด์	200	1977.46 %	1694.06 %	1040.03%
	250	1109.93%	989.76%	663.52%
	300	620.54%	567.96%	345.17%

อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่องของระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมซึ่งจะมีผลต่อปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ที่แสดงในรูป 4.20 ซึ่งแสดงการจำลองการทำงานของระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมของโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทชนิดเอ็นที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตรที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน มีสนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ตั้งฉากกับกระแสโดยทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ โดยแสดงเส้นทางเดินกระแสและสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทโดยทำการเปรียบเทียบระยะห่างของอะลูมิเนียมที่แตกต่างกันคือ 200, 80, 40, 20, 10, 8 และ 5 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.20 แสดงระยะห่างของช่องว่างอลูมิเนียมที่ได้จากการจำลองการทำงานจะเห็นว่าถ้าระยะห่างของอลูมิเนียมห่างกันมากจะเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทขึ้น ซึ่งส่งผลกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่มีค่าลดลงได้ โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง โดยตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์กับระยะห่างระหว่างช่องว่างอลูมิเนียมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



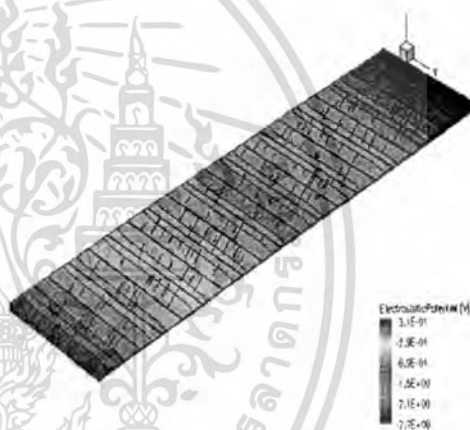
(ก) 200 ไมโครเมตร



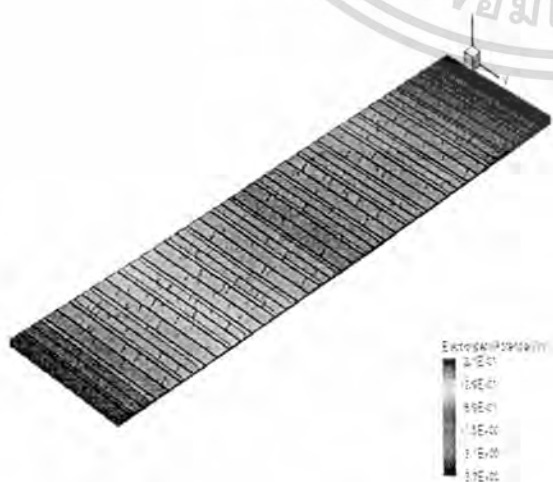
(ข) 80 ไมโครเมตร



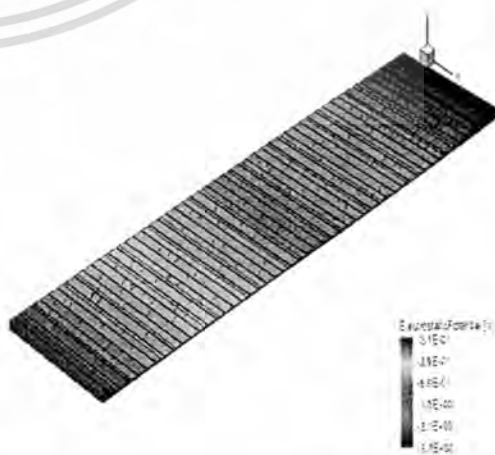
(ค) 40 ไมโครเมตร



(ง) 20 ไมโครเมตร

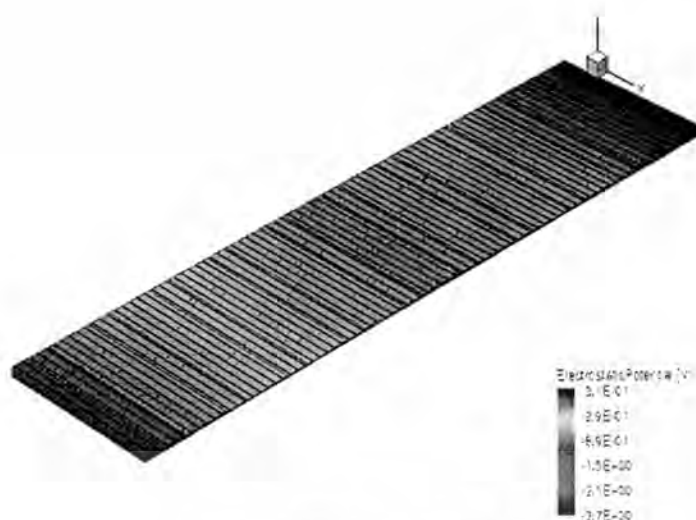


(จ) 10 ไมโครเมตร



(ฉ) 8 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ราชบุรี ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอ (ฉ) 8 ไมโครเมตร ระเบียบด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) 5 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างของอะลูมิเนียมของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างซิลิคอนฮอลล์เฟลท

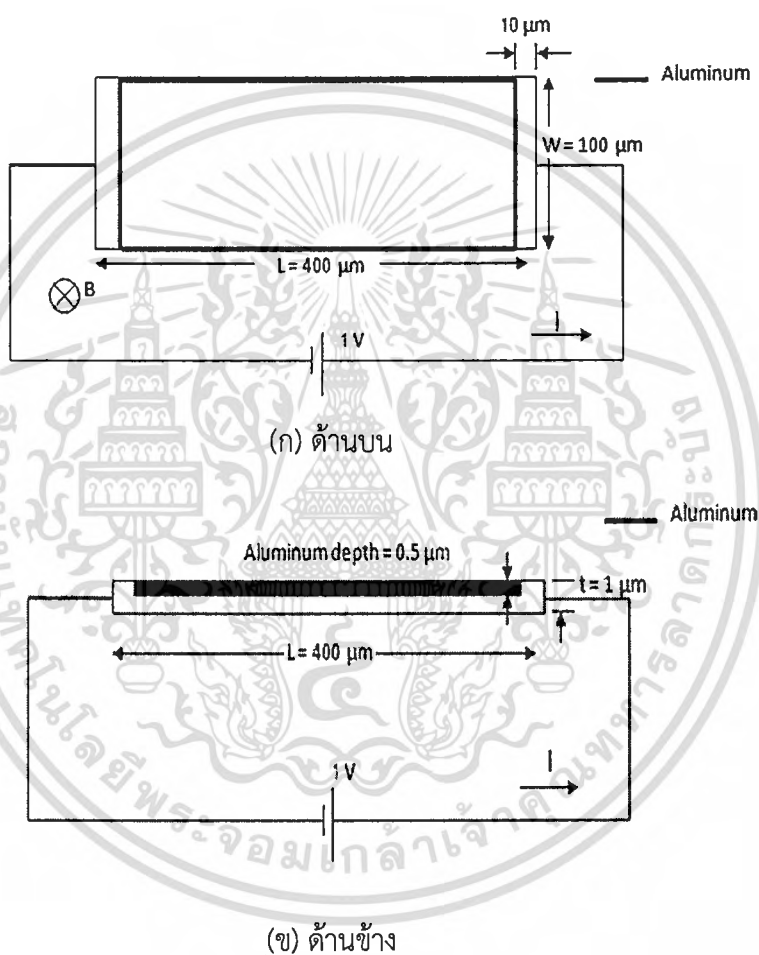
ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่กับระยะห่างของอะลูมิเนียม

ช่องว่างอะลูมิเนียม	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง MR
200 μm	5.39%
80 μm	11.77%
40 μm	16.15%
20 μm	18.69%
10 μm	20.01%
8 μm	20.11%
5 μm	20.18%

จากตารางที่ 4.3 เราจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างอะลูมิเนียมมีค่ามากขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์จะเข้าสู่ค่าอิมิตัวเมื่อระยะห่างระหว่างช่องว่างอะลูมิเนียมมีขนาดห่างกันตั้งแต่ 10 ไมโครเมตรลงไป ดังนั้นในการทดลองการจำลองการทำงานเราจึงอ้างอิงกับระยะห่างที่ 10 ไมโครเมตรจากหน้าสัมผัสไฟฟ้า ในการจำลองการทำงานของโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอะลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

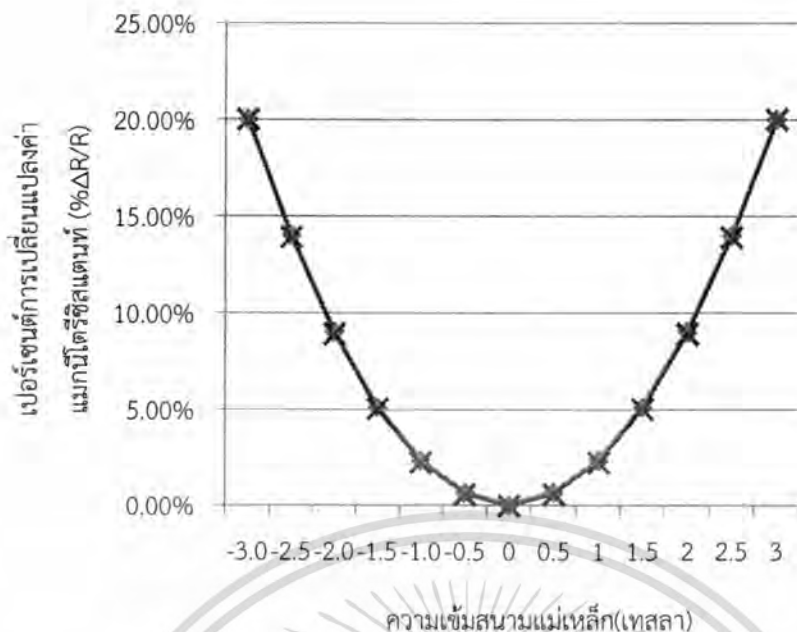
เพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับระยะห่างของช่องว่างของอลูมิเนียมเราจึงทำการออกแบบโครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยมีระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตร โดยวงแหวนอลูมิเนียมมีความหนา 0.5 ไมโครเมตร และกว้าง 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งการออกแบบนี้จะทำให้ไม่เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทขึ้น ซึ่งจะช่วยให้พหุเกิดการเบี่ยงเบนอย่างเต็มที่ตามแรงจากสนามไฟฟ้า โดยโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 โครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

ซึ่งโครงสร้างนี้จะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการออกแบบค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทคือประมาณ 20.0% ดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดยเราจะทำการจำลองกับซิลิคอนฮอลล์เพลทที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



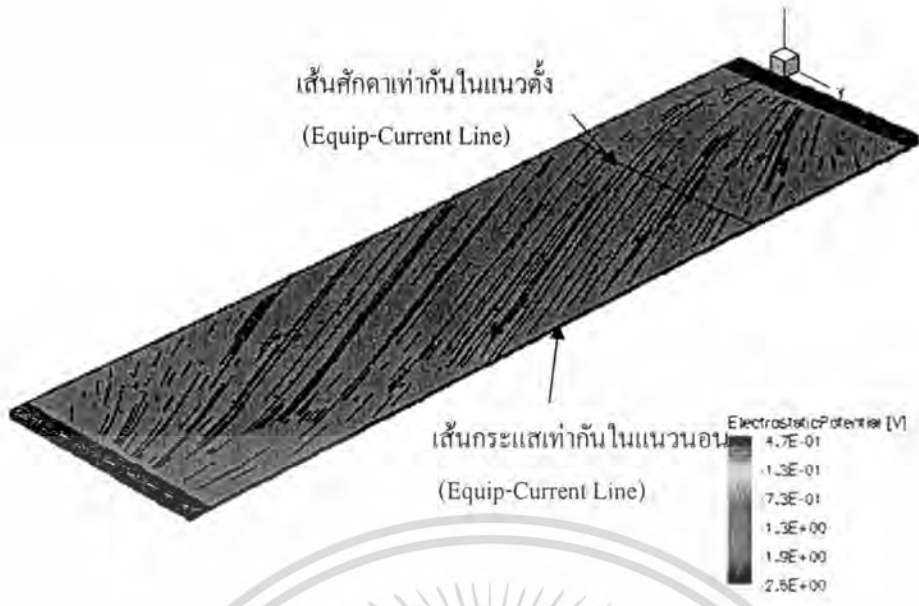
รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าแมกนีโตริซิสแตนซ์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวม โครงสร้างฮอลล์เพลทและโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน

รูปที่ 4.23 แสดงเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและตัดฉากที่เท่ากันในแนวตั้งของการจำลองการทำงานด้วย TCAD ของโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทที่สนามแม่เหล็ก 0 เทสลา และ 3 เทสลาที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน



(ก) 0 เทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) 3 เทสลา

รูปที่ 4.23 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน

รูปที่ 4.23(ก) ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 85.77 ไมโครแอมป์ และความต้านทาน 11.54 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนไม่มีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นนอกจากบริเวณใกล้กับวงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมซึ่งจะมีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้น ส่วนเส้นศักดาไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงว่าไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นหรือสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็นศูนย์ส่วนในรูปที่ 4.23(ข) เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 71.46 ไมโครแอมป์ และความต้านทาน 13.86 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอเรนซ์ซึ่งการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสเอาท์พุทที่ได้มีค่าน้อยลงจึงทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก ส่วนเส้นศักดาไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งจะไม่มี การเบี่ยงเบนเกิดขึ้นซึ่งแสดงว่าไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทหรือแรงดันฮอลล์ในวงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมเป็นศูนย์ซึ่งจะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นเต็มที่

4.6 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

จากโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท เราสามารถที่จะนำพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ โดยในการจำลองแบบเราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และแกลเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

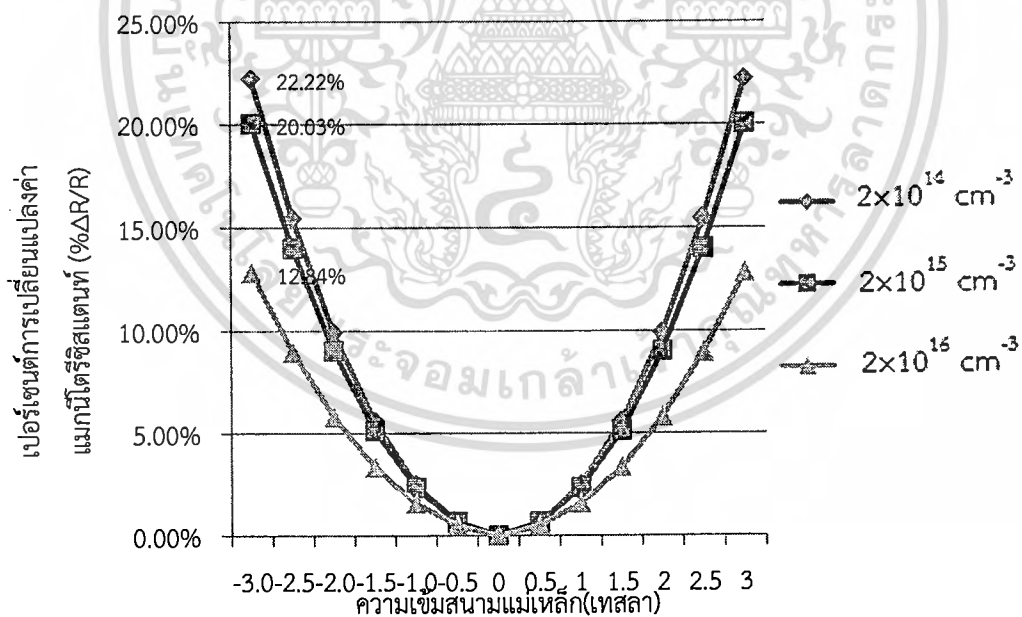
อาเซไนต์ โดยทำการได้ปด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตรีซิสแดนท์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน

4.6.1 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่มีผลต่อโครงสร้างที่ใช้วงแหวนลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท โดยจำลองการทำงานกับวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนต์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

4.6.1.1 ซิลิคอน

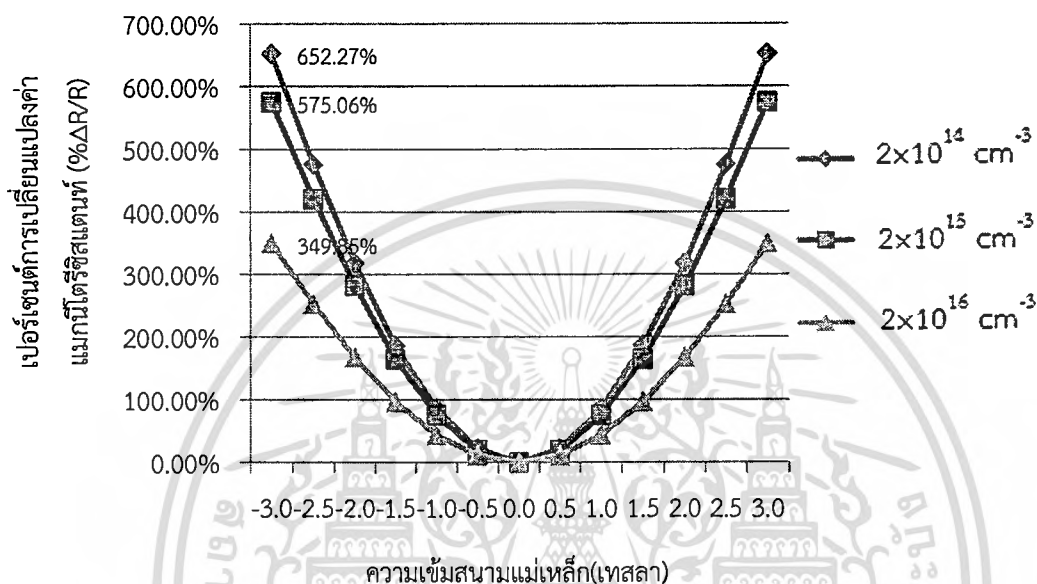
จากรูปที่ 4.24 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนท์ของฐานรองซิลิคอนที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนท์เป็น 22.22%, 20.03% และ 12.84% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



รูปที่ 4.24 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองซิลิคอน

4.6.1.2 แกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.25 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าฮอลล์เฟลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 652.27%, 575.06% และ 349.85% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



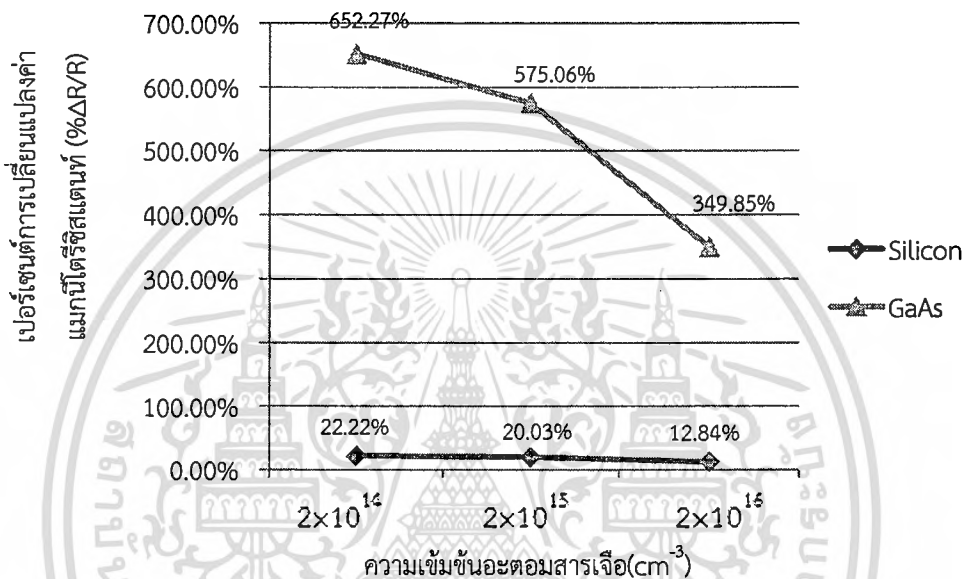
รูปที่ 4.25 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ฮอลล์เฟลทที่สร้างมาจากซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 22.22%, 20.03% และ 12.84% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 4.25 ฮอลล์เฟลทที่สร้างมาจากแกลเลียมอาเซไนด์ จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 652.27%, 575.06% และ 349.85% ที่ 3 เทสลา ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฮอลล์เฟลทที่สร้างมาจากซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยจะทำให้ค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์มีค่าสูงขึ้น

4.6.2 ชนิดของวัสดุ

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ในส่วนนี้ เราจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ โดยทดลองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่สนามแม่เหล็ก 3 เทสลา ซึ่งจากรูปที่ 4.24 และ 4.25 จะเห็นว่าแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่มากที่สุด

คือ 652.27%, 575.06% และ 349.85% รองลงมาคือซิลิคอนซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 22.22%, 20.03% และ 12.84% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.26 โดยในโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช้วงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทของซิลิคอนอยู่ 1.0 เท่า, 1.0 เท่า และ 1.0 เท่า ของแกลเลียมอาเซไนด์อยู่ 1.05 เท่า, 1.01 เท่า และ 1.01 เท่า ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



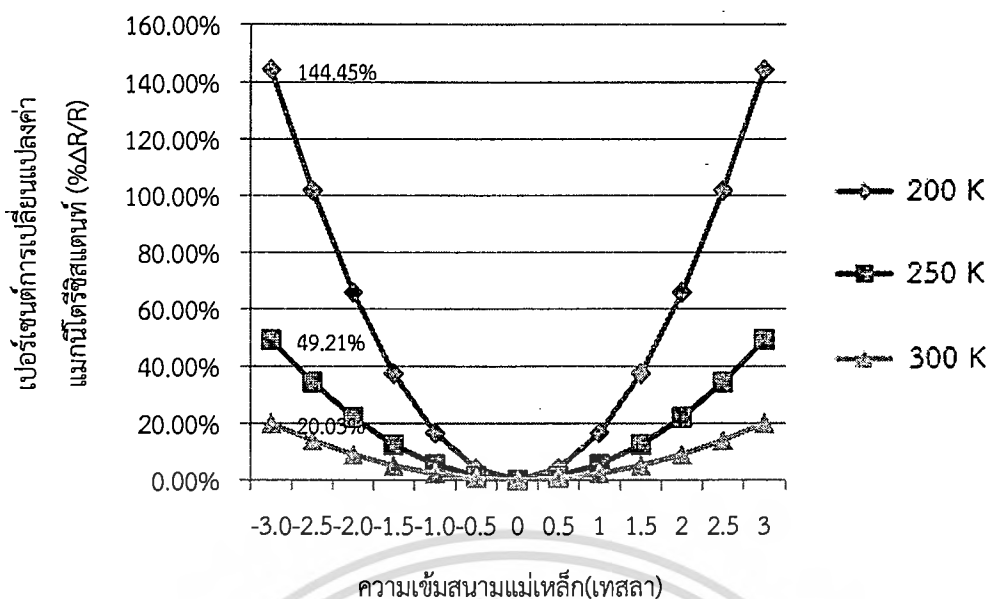
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของวัสดุ 2 ชนิด

4.6.3 อุณหภูมิ

ในการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ โดยทดลองที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

4.6.3.1 ซิลิคอน

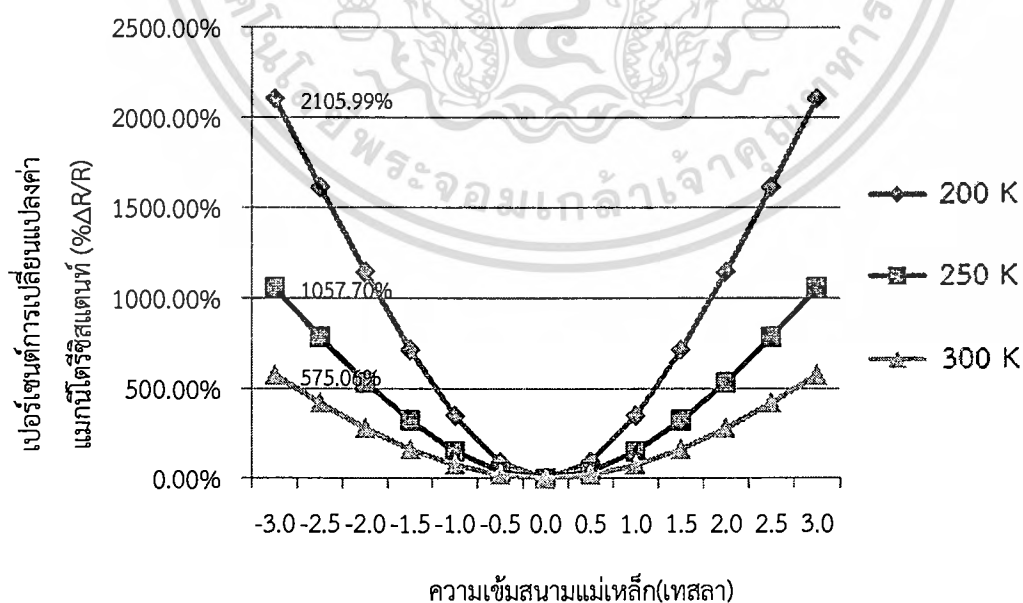
จากรูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของฐานรองซิลิคอนที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอนจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 144.45%, 49.21% และ 20.03% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



รูปที่ 4.27 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองซิลิคอน

4.6.3.2 แกลเลียมอาเซไนด์

จากรูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์ของแกลเลียมอาเซไนด์ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์จะมีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์เป็น 2105.99%, 1057.70% และ 575.06% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



รูปที่ 4.28 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองแกลเลียมอาเซไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 200 เคลวิน จะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์มีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิ 250, 300 เคลวิน ตามลำดับ และจากการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท เราสามารถที่จะสรุปผลเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ได้ทั้งหมดดังตารางที่ 4.4 ของวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ที่ความเข้มข้น $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ดังนี้

ตารางที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ของโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

วัสดุ	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ		
		$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
ซิลิคอน	200	161.17 %	144.45 %	92.00%
	250	54.66%	49.21%	31.84%
	300	22.22%	20.03%	12.84%
แกลเลียมอาเซไนด์	200	2883.72%	2105.99 %	1274.55%
	250	1253.09%	1057.70%	695.57%
	300	652.27%	575.06%	349.85%

4.7 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบ

ในส่วนนี้เราทำการเปรียบเทียบผลปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ระหว่างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร และโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยให้มีระยะห่างระหว่างหน้าสัมผัสไฟฟ้า 10 ไมโครเมตร กับวัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และแกลเลียมอาเซไนด์ ทำการได้บด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 -3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ โดยการเปรียบเทียบผลปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์เราจะพบว่าโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทสามารถเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ได้เช่นเดียวกับการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทแต่จากผลการทดลองเราพบว่าโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทสามารถให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ได้ดีกว่า เมื่อฮอลล์เพลทอยู่ในสภาวะเงื่อนไขที่พาหะมีค่าสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล่องตัวสูง ซึ่งเราสามารถสรุปค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ระหว่างโครงสร้างทั้ง 2 แบบของวัสดุ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน

วัสดุ	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ		
		$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
ซิลิคอน	200	1.13%	0.31%	0.04%
	250	0.11%	0.04%	0.03%
	300	0.02%	0.02%	0.02%
แกลเลียมอาร์เซไนด์	200	906.27%	411.93%	234.52%
	250	143.16%	67.94%	32.05%
	300	31.73%	7.11%	4.68%

จากตารางที่ 4.5 เราพบว่าโครงสร้างแบบใหม่ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทสามารถให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ได้มากกว่าในทุกกรณีเมื่อเปรียบเทียบกับการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยผลที่ได้เราพบว่ากรณีที่ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยสุด เมื่อสร้างจากวัสดุซิลิคอน, ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และอุณหภูมิ 300 เคลวิน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 0.02% และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เมื่อสร้างจากวัสดุแกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และอุณหภูมิ 200 เคลวิน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มากถึง 906.27%

การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแทนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานจะประกอบด้วย กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxidation process), การฉายแสง (Photolithography), การแพร่สารเจือ (Diffusion), การสร้างชั้นโลหะ (Metallization) เป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบมาสก์ (Mask Designs) เพื่อใช้ในขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแทนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งในการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำขั้นมาขั้นหนึ่งนั้น อาจจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตแบบเดิมซ้ำกันไปมาหลายๆ รอบก่อนที่จะสร้างอุปกรณ์สำเร็จได้ ในส่วนของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแทนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทก็เช่นเดียวกัน จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตจากหลายส่วนและมีการวนลูบในบางกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับรายละเอียดของกระบวนการสร้างอุปกรณ์จะได้กล่าวถึงในข้อหัวของกระบวนการสร้างต่อไป

5.1 ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer cleaning)

ก่อนที่จะเริ่มต้นขั้นตอนกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการผลิตอื่นๆ จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ออกไป ต่อจากนั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่าน้ำดีไอ (DI, deionized) เพื่อล้างทำความสะอาดแผ่นให้สะอาด และขั้นตอนสุดท้ายนำไปเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

5.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

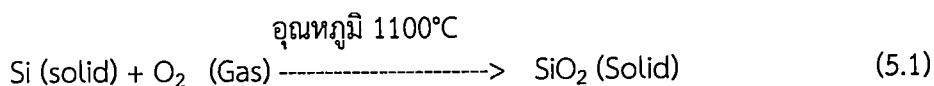
แผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้วจะเข้ากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นป้องกันการแพร่สารเจือ ชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สร้างจากการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีด้วยกัน 2 วิธี

5.2.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

การออกซิเดชันแบบแห้งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์กับซิลิคอนในอุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100° C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 5.1 วิธีนี้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีคุณภาพดีสำหรับการเป็นฉนวน แต่อัตราการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ช้ามาก



5.2.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)

การออกซิเดชันแบบชื้นใช้อะตอมออกซิเจนที่ได้จากการแตกตัวของไอน้ำในการทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่อุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 5.2



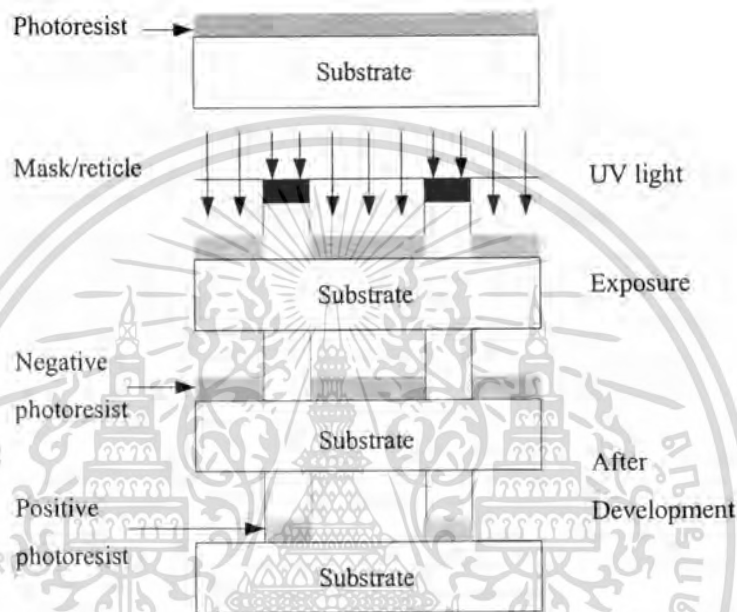
การสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นนี้จะทำให้เกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้งเนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่าอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส ทำให้การเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันแบบชื้นนี้คือ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เร็วกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น และการออกซิเดชันแบบชื้นนี้จะได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีสภาพผลึกไม่สมบูรณ์ คือเกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) หรือเกิดรูพรุนขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีอัตราการเกิดออกไซด์สูงกว่าแบบแห้งมาก

โดยการทดลองในครั้งนี้ใช้การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบ Dry-Wet-Dry ที่ 2.0-2.0-2.0 ชั่วโมง ในการออกซิเดชันแบบแห้งใช้อุณหภูมิ 1000°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 1200 mL/min ส่วนการออกซิเดชันแบบชื้นใช้อุณหภูมิ 1000°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนในการนำพาไอน้ำ 1000 mL/min เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 6000 อังสตรอม

5.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายแบบตัวอย่างจากกระจกมาส์คไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อฉายแสงจะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ กระบวนการนี้ต้องทำในห้องที่มีความสะอาดเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ โดยเริ่มต้นด้วยการนำแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์มาทำการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่จับอยู่ที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก จากนั้นเคลือบพื้นแผ่นผิวฐานรองด้วยน้ำยาไวแสงโดยน้ำยาไวแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

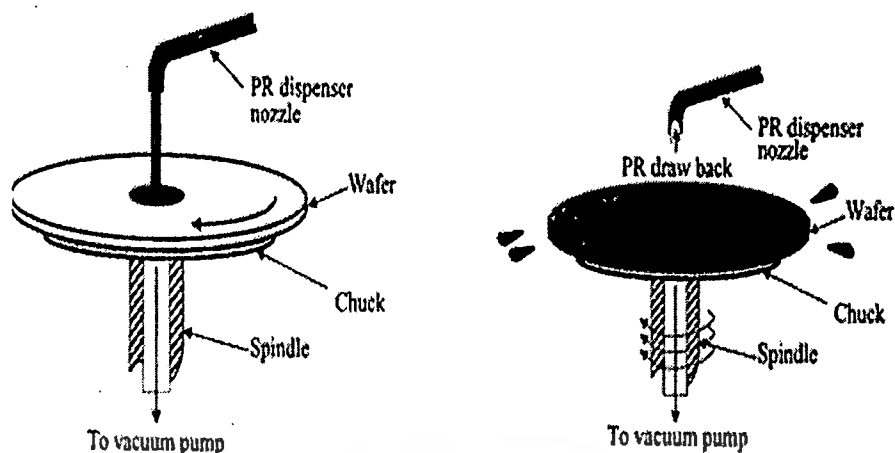
คุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสง คือ 1.Negative photoresist น้ำยาไวแสงชนิดนี้ หลังจากกระบวนการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายตรงกันข้ามกับต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกกัดออก เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ถูกแสงเท่านั้น และ 2.Positive photoresist เป็นน้ำยาไวแสงที่หลังจากการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายแบบเดียวกันกับมาส์คต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ได้รับแสงจะถูกกัดออก ในขณะที่ส่วนที่ไม่ได้รับแสงจะคงเหลืออยู่ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงคุณสมบัติที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงทั้งสองชนิด



รูปที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

ซึ่งในการทดลองเราใช้น้ำยาไวแสงชนิด positive จากนั้นจะทำการหมุน(spinning) แผ่นเพื่อต้องการให้พื้นผิวของน้ำยาไวแสงเรียบเป็นแบบฟิล์มบางและมีความหนาของน้ำยาไวแสงที่เท่ากันทุกๆจุด การหมุนแผ่นจึงต้องทำด้วยกันสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่หยดไว้บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์กระจายตัวไปทั่วๆแผ่นฐานรอง และขั้นตอนที่สองใช้ความเร็วรอบ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่เป็นส่วนเกินที่กระจายตัวอยู่บนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์นั้นถูกเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบที่สูงจนทำให้น้ำยาไวแสงที่เป็นส่วนเกินกระเด็นหลุดออกไปและส่วนที่เหลือจะกระจายตัวออกไปโดยรอบเป็นฟิล์มบางและเรียบสม่ำเสมอตามที่ต้องการ ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำยาไวแสงด้วย รูปที่ 5.2 แสดงถึงการสปรินนิง โดยขั้นตอนระหว่างการเคลือบน้ำยาไวแสงนี้ต้องระวังฝุ่นละอองอย่างมากจึงต้องทำในห้องที่สะอาดหรือ Clean Room และเมื่อเคลือบน้ำยาไวแสงเสร็จแล้วต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อต้องการให้น้ำยาไวแสงที่เกาะอยู่บนแผ่นฐานรองแห้งสนิทและยึดเกาะกับแผ่นฐานรองได้ดี ขั้นตอนนี้เรียกว่า Prebake

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนพื้นผิวฐานรองด้วยการหมุน

จากนั้นทำการถ่ายแบบลงบนฟิล์มน้ำยาไวแสงด้วยการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต (UV) ผ่านกระจกต้นแบบหรือกระจกมาสก์ (Photo mask) ที่ออกแบบไว้แล้ว โดยมีการจัดมาสก์ให้ตรงกับบริเวณที่ต้องการจะถ่ายแบบขั้นตอนนี้เรียกว่า Mask Alignment แสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบจะทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายจะไม่ทะลุผ่าน ดังนั้นส่วนที่แสงทะลุผ่านไปได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสง คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงจะเปลี่ยนไป จากนั้นนำแผ่นที่ฉายแสงแล้วมาทำการ Development คือการสร้างลวดลายด้วยน้ำยา Developer น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อทำการ develop แล้ว น้ำยาไวแสงส่วนที่ถูกแสงจะถูกละลายไป ส่วนที่ไม่ถูกแสงจะยังคงอยู่ จากนั้นทำการ Post bake คือการอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ส่วนที่เป็นชั้นฟิล์มแห้งและยึดเกาะติดกับแผ่นฐานรองแน่นยิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะส่งต่อไปยังขั้นตอนของการกัดและกระบวนการแพร่สารเจือต่อไป

5.4 การกัด (Etching)

การกัดหรือการเอตซิง (Etching) เป็นกระบวนการในการกำจัดสารออกจากผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เช่น การกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ หรือการเปิดช่องเพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียมจากแผ่นผลึกที่ทำกรถ่ายแบบ (expose) และการ develop แล้ว ถ้าหากขั้นตอน develop ทำไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดมีชั้นฟิล์มบางๆ เหลือติดอยู่ป้องกันการ etching เรียกว่าถูก blocking สิ่งที่สำคัญในการควบคุมการ etching คือ เวลา อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเคมีสารเจือต่อไป

5.5 การลอกชั้นไวแสงออกจากแผ่นผลึก

การลอกชั้นสารไวแสงนี้เป็นขั้นตอนต่อจากการ etching โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงในน้ำยาลอกฟิล์ม โดยอาจเป็นสารเคมี เช่น อะซิโตน (acetone) หรือใช้พลาสมา (ออกซิเจนพลาสมา) เพื่อทำให้

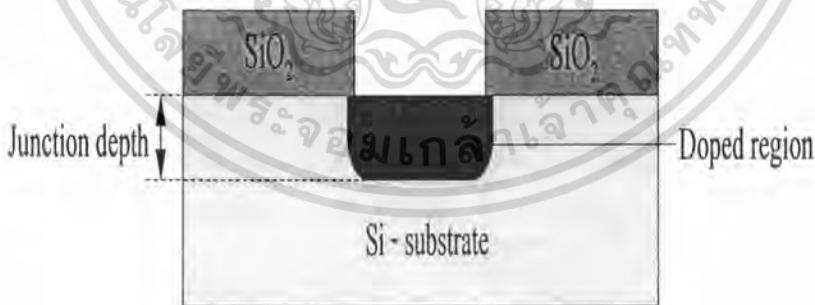
ผิวของแผ่นผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพร่สารเจือได้ ซึ่งถ้าผิวหน้าของแผ่นผลึกสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร่สารเจือ

เมื่อลอกชั้นสารไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscope) เพื่อดูว่าเกิดการกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่านั้น ซึ่งเป็นผลจากชั้นฟิล์มไม่ติดแน่นสนิทหรือเกิดการกัดมากเกินไป (over etching) ถ้าเสียหายมากอาจต้องกลับไปเริ่มต้นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีใหม่ ต่อจากนั้นนำไปแพร่สารเจือ สร้างชั้นออกไซด์ แล้วจึงกลับมาทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีอีกครั้งเพื่อสร้างชั้นตอนการถ่ายแบบถัดไป

5.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การแพร่ของสารเป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่สารจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่ทุกขณะ เช่น การแพร่ของสารเคมีในอากาศ การแพร่ของน้ำหมึกเข้าไปในของเหลวอย่างน้ำ เป็นต้น

สำหรับเทคนิคของการเติมสารเจือด้วยวิธีการแพร่สาร (Diffusion) เป็นวิธีการเจือสารซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับงานทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก ง่ายต่อการควบคุมใช้งาน สามารถทำได้ด้วยเตาความร้อนสูง (Furnace) ทั่วไป และสามารถแพร่สารเจือพร้อมกันได้คราวละมาก ๆ ที่สำคัญคือเป็นวิธีที่ประหยัด กระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของการแพร่สารเจือคือ การแพร่สารเจือชนิดพี และการแพร่สารเจือชนิดเอ็น โดยหลังจากที่ทำการแพร่สารเจือเรียบร้อยแล้วนั้น จะทำให้ได้สารเจือตรงบริเวณที่เป็นช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ

5.6.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี (p-type) ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลียม (Gallium), อลูมิเนียม (Aluminium), โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) ซึ่งในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุที่ใช้เป็นสารเจืออย่างการคำนวณว่ากรรมใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิสิกส์มันไม่ใช่สามารถใช้ได้ทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ใช่ธาตุแกลเลียมเป็นสารเจือชนิดพีเนื่องจาก แกลเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือแกลเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ที่สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นออกไซด์ป้องกันผิวของซิลิคอนใช้ไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้ธาตุใดเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆด้วยอย่างเช่น อะตอมของโบรอนจะทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01 อิเล็กตรอนโวลต์(eV) ขณะที่ของอินเดียมอยู่ที่ระดับ 0.16 อิเล็กตรอนโวลต์(eV) ส่วนอะลูมิเนียมมีข้อเสียคือ สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีทำให้กลายเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ง่าย จากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมานี้ จึงทำให้โบรอนเป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพีมากที่สุด โดยโบรอนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่อยู่ที่ประมาณ $10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ 1150°C ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวก

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจสามารถทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถสังเคราะห์มาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบไรด์ (BBr_3) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (BCl_3) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมโบรอนออกมาจาก B_2O_3 ที่ผิวของซิลิคอน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไนไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1100°C (ในสถานะของก๊าซไนโตรเจน)

5.6.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณีสารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดีในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

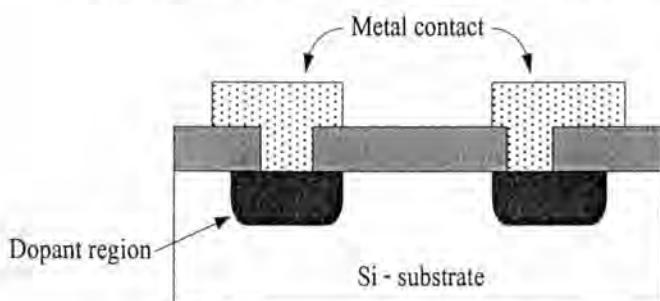
และสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นฝัง (n^+ buried layer) ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดเอ็น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัสอาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสอ็อกซีคลอไรด์ ($POCl_3$) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟิน (PH_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษและอาจระเบิดได้ ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ $POCl_3$ เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว $1200^\circ C$ ในช่วงเวลาตามต้องการในสภาวะของก๊าซไนโตรเจน

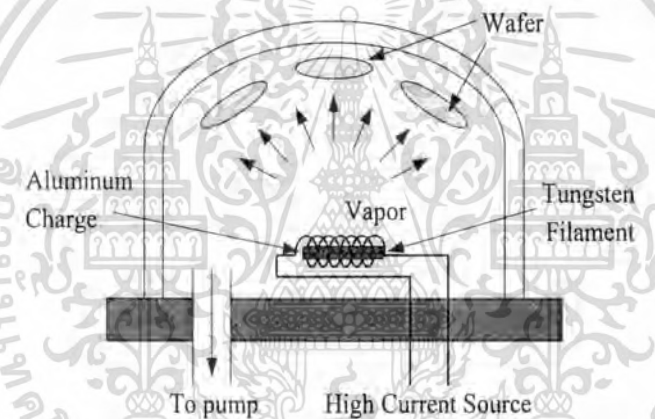
5.7 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization)

การสร้างชั้นโลหะหรือการเมทัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อขั้วอุปกรณ์เข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก โดยโลหะที่ถูกนำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium), ทองแดง (Copper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่างเช่น ไททาเนียมซิลิไซด์ ($TiSi_2$) ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับการทำเป็นขั้วโลหะนั้น แล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 5.4 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 กระบวนการเคลือบอลูมิเนียมโดยทำให้อลูมิเนียมกลายเป็นไอด้วยความร้อน และทำให้ไอระเหยไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของแผ่นเรียกว่ากระบวนการระเหยในสุญญากาศ(evaporation) ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมทัลไลเซชันในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ การเปลี่ยนอลูมิเนียมให้กลายเป็นไอภายใต้ความดันต่ำโดยระบบต้องการความดันประมาณ 10^{-6} ทอร์(Torr) เป็นการทำให้ไอออกซิเจนและความชื้นเหลือน้อยที่สุด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลให้อลูมิเนียมมีความต้านทานสูงได้ สำหรับกระบวนการระเหยในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 5.5 โดยเส้นลวดถูกทำให้ร้อนขณะที่ระบบอยู่ภายใต้ความดันต่ำ หลังจากนั้นที่อุณหภูมิคงที่อลูมิเนียมจะระเหยแพร่ไปเคลือบบนแผ่นผลึก ทำให้มีชั้นอลูมิเนียมบางๆเคลือบบนแผ่นผลึก การควบคุมความหนาของโลหะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าทำให้อัตราการเคลือบแผ่น (Deposition rate) สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.5 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation)

แต่สิ่งสำคัญของระบบการผลิตนี้คือการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช่กระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) มอสเฟตสูงชันและทำให้วงจรรวมถูกลดความน่าเชื่อถือโดยระบบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมากอยู่ที่ประมาณ 10 แอมป์ (Amp) ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยโลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าความต้านทาน (Contact resistance) มีค่าต่ำหรือเป็นคอนแทคที่ดีและมีสภาพเป็นโอห์มมิกคอนแทค (Ohmic contact)
- ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เช่น ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่

เปลี่ยนแปลงนั้นคือโลหะมีอายุการใช้งานนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้องสามารถทำการสกัด (Photo etching) ได้ และได้ลวดลายที่คมชัดและละเอียด
- ต้องยึดติดกับผิวของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมกับลวดโลหะจากภายนอกได้ดี
- มีราคาถูก และสามารถสร้างได้โดยง่าย

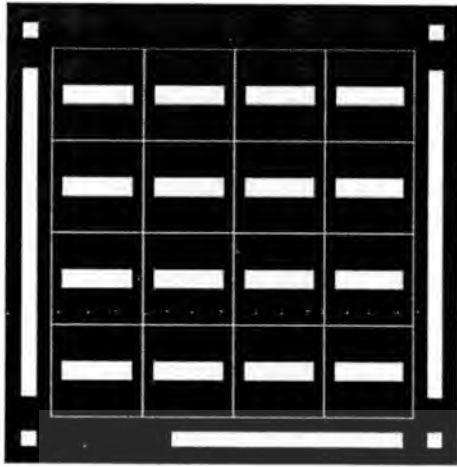
5.8 กระบวนการสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท (Series Magnetoresistance effect on Hall plate fabrication process)

ในกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท เราจะทำการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้เกิดการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยในการจำลองแบบการสร้างเราสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ คือ 1. ขั้นตอนการออกแบบมาสก์ (Mask) เพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนของการถ่ายแบบลงบนชิ้นงาน และ 2. ขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยรายละเอียดของกระบวนการสร้างสามารถอธิบายได้ดังนี้

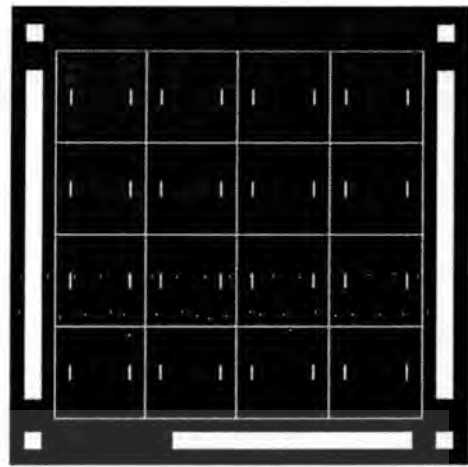
5.8.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

ในการออกแบบมาสก์ต้นแบบสำหรับใช้ในขั้นตอนการถ่ายแบบลงบนชิ้นงานสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในกระบวนการสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมโดยจะมีมาสก์ต้นแบบอยู่ทั้งหมด 4 มาสก์ ดังต่อไปนี้คือ

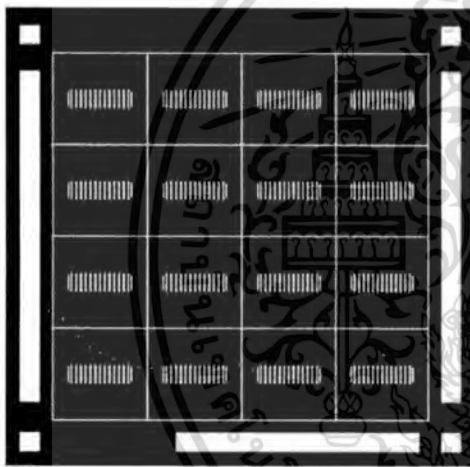
- มาสก์ 1: n-well มาสก์ (Mask # 1 n-well) แสดงดังรูปที่ 5.6(ก) เป็นมาสก์ต้นแบบที่ใช้สำหรับการสร้างบ่อ n-well ขึ้นจากแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัส
- มาสก์ 2: n^+ มาสก์ (Mask # 2 n^+) ดังรูปที่ 5.6(ข) เป็นมาสก์ต้นแบบสำหรับการสร้างชั้นสารเจือชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นมากๆ จากการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัส
- มาสก์ 3: มาสก์เปิดช่อง (Mask #3 Window) เป็นมาสก์สำหรับใช้ในการเปิดช่องเพื่อทำการเชื่อมต่อกับชั้นโลหะและเพื่อให้เกิดลวดลายอลูมิเนียมตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ แสดงดังในรูปที่ 5.6(ค) ซึ่งหลังจากเปิดช่องแล้ว เราจะทำการสร้างชั้นโลหะจากกระบวนการสร้างเมทัลไลเซชัน (Metallization)
- มาสก์ 4: อลูมิเนียมมาสก์ (Mask # 4 Aluminum) ซึ่งมาสก์ต้นแบบนี้จะใช้สำหรับกัดชั้นอลูมิเนียมที่เหลือในส่วนที่ใช้สำหรับเป็นจุดเชื่อมต่อกับแหล่งไฟฟ้าจากภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ ดังรูปที่ 5.6 (ง)



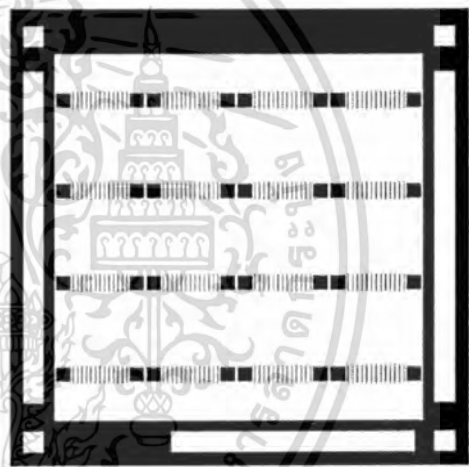
(ก) มาส์ค 1 (Mask#1 n-well)



(ข) มาส์ค 2 (Mask#2 n+)



(ค) มาส์ค 3 (Mask#3 Window)



(ง) มาส์ค 4 (Mask#4 Aluminum)

รูปที่ 5.6 มาส์คต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวม

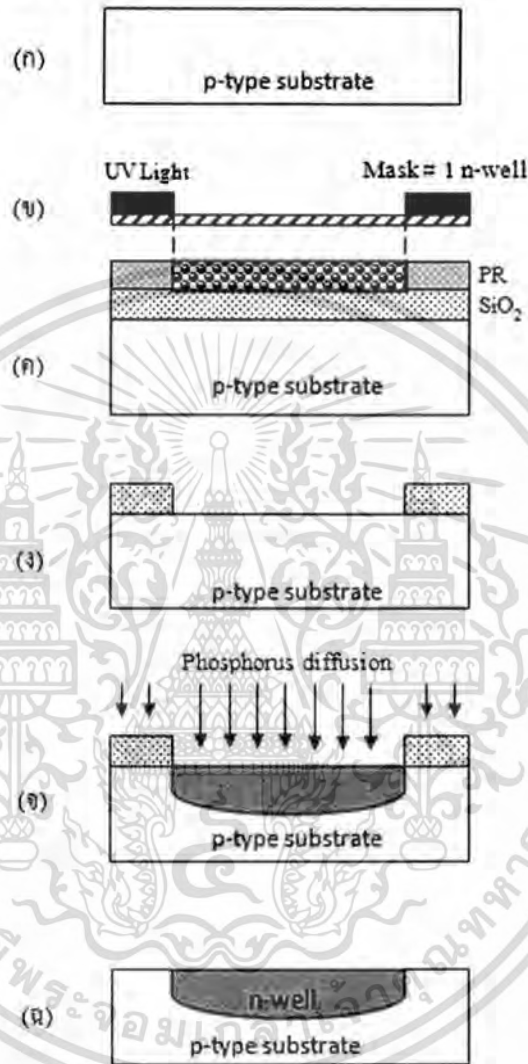
5.8.2 การสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

ขั้นตอนกระบวนการสร้างเราจะทำการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้เกิดการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งขั้นตอนการสร้างต่างๆจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆด้วยกันคือ 1. ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well 2. ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+) 3. ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียมกับขั้วโลหะ และ 4. ขั้นตอนการกัดชั้นอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับการเชื่อมอุปกรณ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยขั้นตอนต่างๆสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

เขาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแรกสำหรับการสร้างเมกนีตรีกิซิสแตนท์บนโครงสร้างเพื่อให้เกิดการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท คือ ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ดังนี้



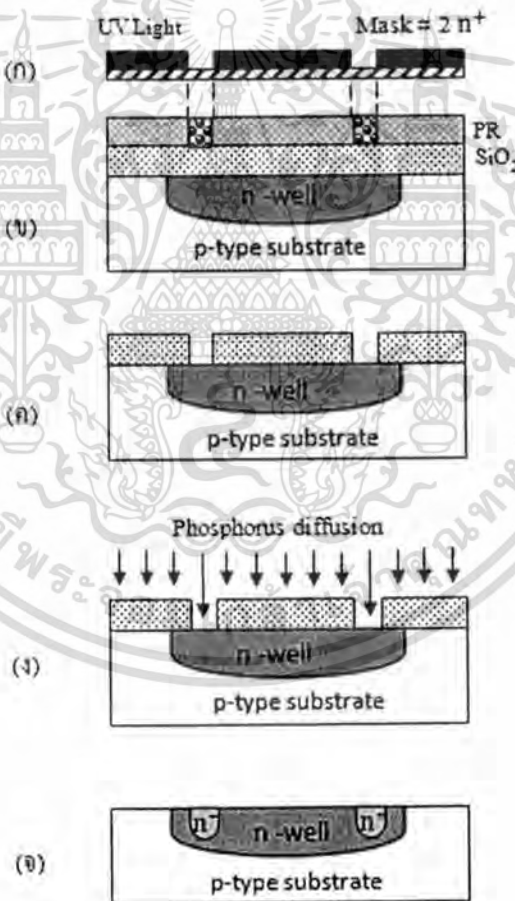
รูปที่ 5.7 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างบ่อ n-well

1. เริ่มต้นจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 ความต้านทานแผ่น 14 - 16 โอห์ม/ซม. ทำความสะอาดผิวหน้าเพื่อเป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมและคราบไขมันออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 5.7(ก)
2. ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ดังรูปที่ 5.7(ค)
3. ใช้กระบวนการสร้างลวดลาย (Photolithography) ของมาสก์ที่ 1 เพื่อสำหรับการสร้างบ่อ n-well ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ 1. เคลือบน้ำยาไวแสง (PR) 2. ทำการฉายแสงด้วยแสง UV 3. ทำการล้างฟิล์ม PR ที่ไม่ต้องการทิ้งไป การล้างฟิล์มที่ไม่ต้องการทิ้งไปนี้ นอกจากจะทำให้ได้ลวดลายที่ต้องการแล้ว ยังต้องล้างฟิล์มที่เหลือทิ้งไปให้หมดอีกด้วย

- (UV Exposure) โดยผ่านทางกระจกต้นแบบ (Mask#1 n-well) ดังรูปที่ 5.7(ข) และ 3. ทำการสร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการสร้างบ่อ n-well ต่อไป
4. กระบวนการ etching ขึ้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสดังรูปที่ 5.7(ง) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
 5. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1e16$ อะตอม/ลบ. ซม. เป็นบ่อ n-well ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังรูปที่ 5.7(จ)
 6. หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจะได้เป็นบ่อ n-well ดังรูปที่ 5.7(ฉ)

5.8.2.2 ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+)

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+) จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสเพื่อใช้ในการสร้างหน้าสัมผัสไฟฟ้าต่อไป โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



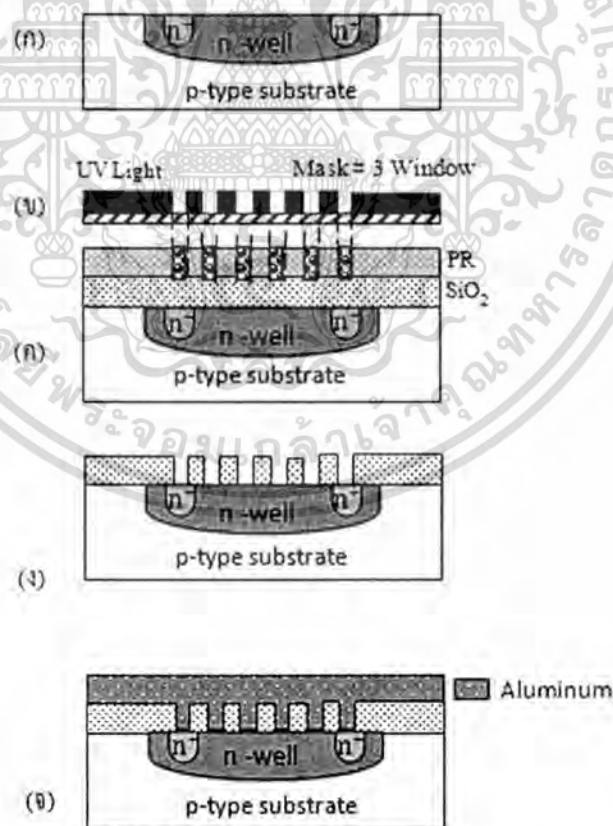
รูปที่ 5.8 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น n^+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนก่อนกระบวนการสร้างลวดลายสำหรับการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้ลวดลายชั้น n^+ โดยใช้กระจกโฟโตมาสก์สอง (Mask # 2 n^+) ดังแสดงในรูปที่ 5.8(ก) และ 5.8 (ข) สร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการสร้างชั้น n^+ ต่อไป
3. กระบวนการ etching ชั้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ดังรูปที่ 5.8 (ค) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
4. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1e19$ อะตอม/ลบ. ซม. เป็นชั้น n^+ ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นสูงดังรูปที่ 5.8(ง)
5. หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจะได้เป็นชั้น n^+ ดังรูปที่ 5.8(จ)

5.8.2.3 ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม

ขั้นตอนก่อนถึงขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทคือ การเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



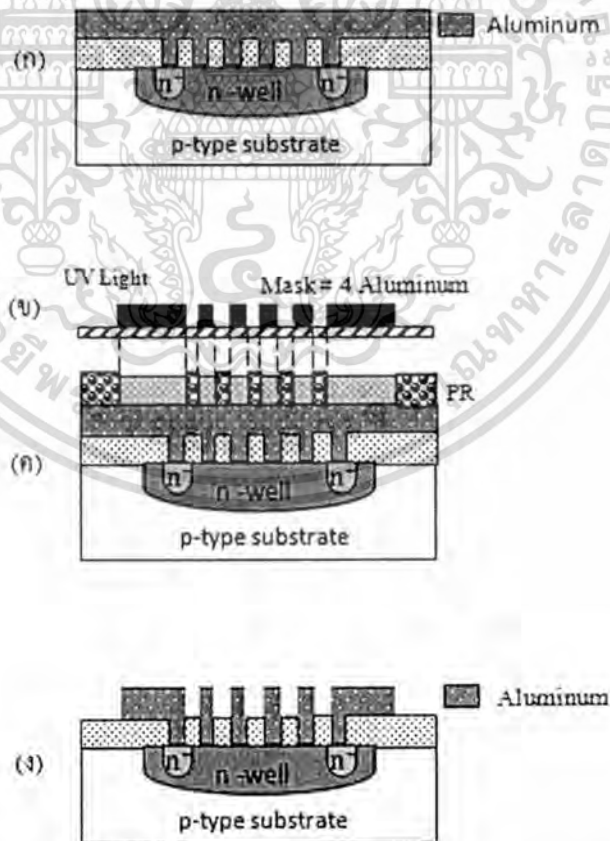
รูปที่ 5.9 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกและลวดลายที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนหลังจากการสร้างชั้น n^+ ที่มีความเข้มข้น ก่อนกระบวนการเปิดช่องสำหรับนำไปใช้งานและสร้างลวดลายดังรูปที่ 5.9(ก)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียมตามที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้กระจกโฟโตมาสก์สาม (Mask # 3 Window) ดังแสดงในรูปที่ 5.9(ข) และ 5.9(ค) สร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการเปิดช่องเพื่อใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม
3. กระบวนการ etching ขึ้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียมดังรูปที่ 5.9(ง) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
4. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) ดังรูปที่ 5.9(จ)

5.8.2.4 ขั้นตอนการสร้างกัณฑ์โลหะ

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตริซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมคือ การกัณฑ์โลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.10 แสดงขั้นตอนกระบวนการกัณฑ์โลหะสำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.10(ก) เมื่อทำการเปิดช่องและทำการสร้างชั้นโลหะ aluminum ด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization)

1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์สี (Mask # 4 Aluminum) ดังรูปที่ 5.10(ข) และ 5.10(ค) เป็นการสร้างลวดลาย (Develop)
2. กระบวนการกัดชั้นโลหะ (Metal Etching) ส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ดังรูปที่ 5.10(ง) จากนั้นทำการลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออก

โดยหลังจากการกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์สีและทำการลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกจะทำให้ได้แผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

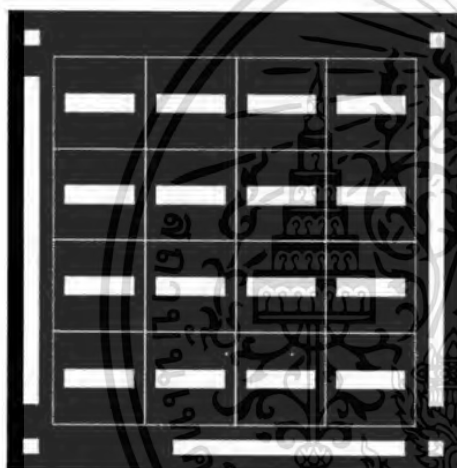
5.9 กระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบใหม่โครงสร้างฮอลล์เพลท (The new design of Magnetoresistance on Hall plate structure)

ในส่วนนี้เราจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบใหม่โครงสร้างฮอลล์เพลท โดยเราจะทำการออกแบบโดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทซึ่งโครงสร้างนี้จะไม่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างเกิดขึ้นจึงทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นเต็มที่ โดยการจำลองแบบโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท เราสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ คือ 1. ขั้นตอนการออกแบบมาสก์ (Mask) เพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนของการถ่ายแบบลงบนชิ้นงาน และ 2. ขั้นตอนกระบวนการสร้างตัวอุปกรณ์ด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ

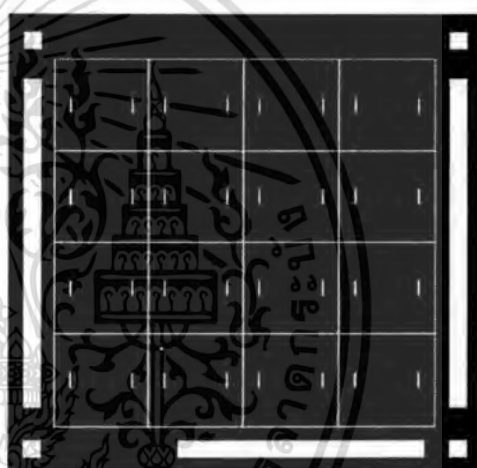
5.9.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

ในการออกแบบมาสก์ต้นแบบสำหรับใช้ในขั้นตอนการถ่ายแบบลงบนชิ้นงานสำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ในกระบวนการสร้างโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยจะมีมาสก์ต้นแบบอยู่ทั้งหมด 4 มาสก์ ดังต่อไปนี้คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

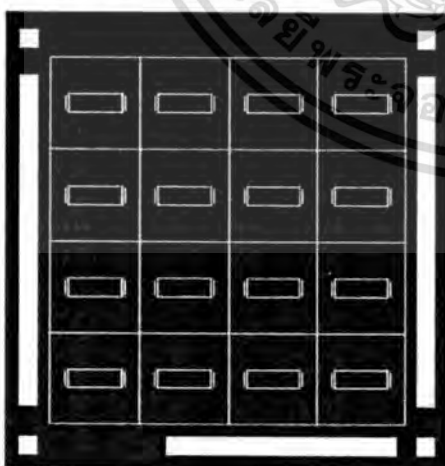
- มาส์ค 1: n-well มาส์ค (Mask # 1 n-well) แสดงดังรูปที่ 5.12(ก) เป็นมาส์คต้นแบบที่ใช้สำหรับการสร้างบ่อ n-well ขึ้นจากการแพร่สารเจือ (diffusion) ด้วยฟอสฟอรัส
- มาส์ค 2: n+มาส์ค (Mask # 2 n+) ดังรูปที่ 5.12(ข) เป็นมาส์คต้นแบบสำหรับการสร้างชั้นสารเจือชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นมากๆ จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัส
- มาส์ค 3: มาส์คเปิดช่อง (Mask #3 Window) เป็นมาส์คสำหรับใช้ในการเปิดช่องเพื่อทำการเชื่อมต่อกับชั้นโลหะและเพื่อให้เกิดลวดลายอลูมิเนียมตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ แสดงดังในรูปที่ 5.12(ค) ซึ่งหลังจากเปิดช่องแล้ว เราจะทำการสร้างชั้นโลหะด้วยกระบวนการสร้างเมทัลไลเซชัน (Metallization)
- มาส์ค 4: อลูมิเนียมมาส์ค (Mask # 4 Aluminum) ซึ่งมาส์คต้นแบบนี้จะใช้สำหรับกัดชั้นอลูมิเนียมให้เหลือในส่วนที่ใช้สำหรับเป็นจุดเชื่อมต่อกับแหล่งไฟฟ้าจากภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ ดังรูปที่ 5.12(ง)



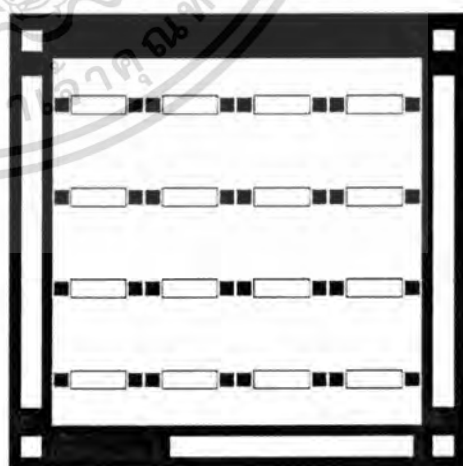
(ก) มาส์ค 1 (Mask#1 n-well)



(ข) มาส์ค 2 (Mask#2 n+)



(ค) มาส์ค 3 (Mask#3 Window)



(ง) มาส์ค 4 (Mask#4 Aluminum)

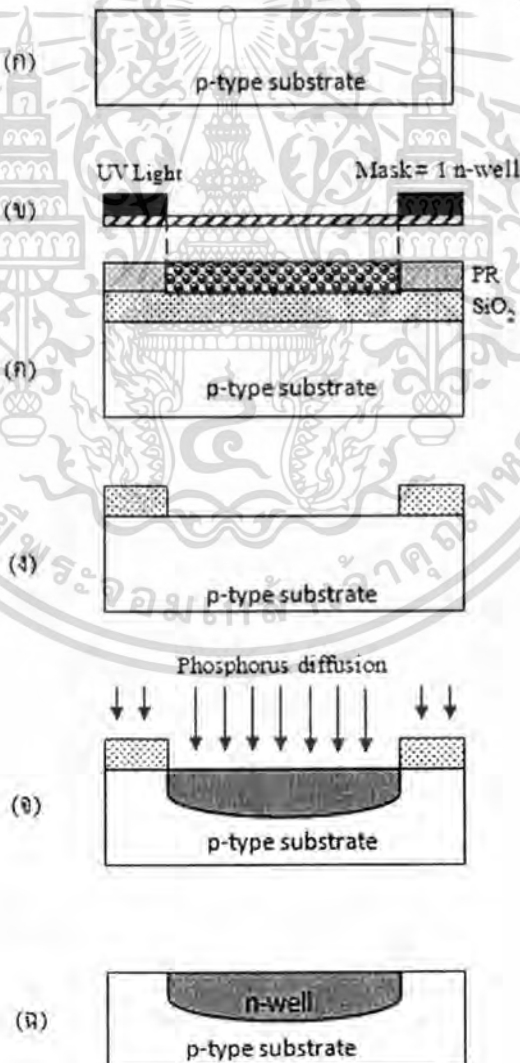
รูปที่ 5.12 มาส์คต้นแบบกระบวนการสร้างการใช้งานแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบบอล์แพลท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นงานด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9.2 การสร้างโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลท

ขั้นตอนกระบวนการออกแบบโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลทเพื่อทำสายสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เฟลท ซึ่งขั้นตอนการสร้างต่างๆจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ด้วยกันคือ 1. ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well 2. ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+) 3. ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียมกับขั้วโลหะ และ 4. ขั้นตอนการกัดชั้นอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับการเชื่อมอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยขั้นตอนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

5.9.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแรกสำหรับการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลท คือ ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.13 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างบ่อ n-well

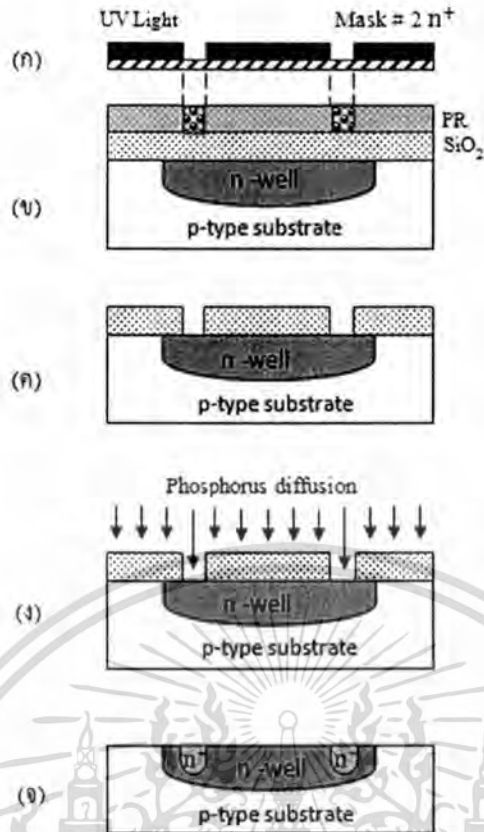
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เริ่มต้นจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 ความต้านทานแผ่น 14 - 16 โอห์ม/ซม. ทำความสะอาดผิวหน้าเพื่อเป็นการกำจัดสิ่งเจือปนและออกไซด์ต่างๆ ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 5.13(ก)
2. ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ดังรูปที่ 5.13(ค)
3. ใช้กระบวนการสร้างลวดลาย (Photolithography) ของมาสก์ที่ 1 เพื่อสำหรับการสร้างบ่อ n-well ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ 1. เคลือบน้ำยาไวแสง 2. ทำการฉายแสงด้วยแสง UV (UV Exposure) โดยผ่านทางกระจกต้นแบบ (Mask#1 n-well) ดังรูปที่ 5.13(ข) และ 3. ทำการสร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการสร้างบ่อ n-well ต่อไป
4. กระบวนการ etching ชั้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ดังรูปที่ 5.13(ง) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
5. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1e16$ อะตอม/ลบ.ซม. เป็นบ่อ n-well ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังรูปที่ 5.13(จ)
6. หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจะได้เป็นบ่อ n-well ดังรูปที่ 5.13(ฉ)

5.9.2.2 ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+)

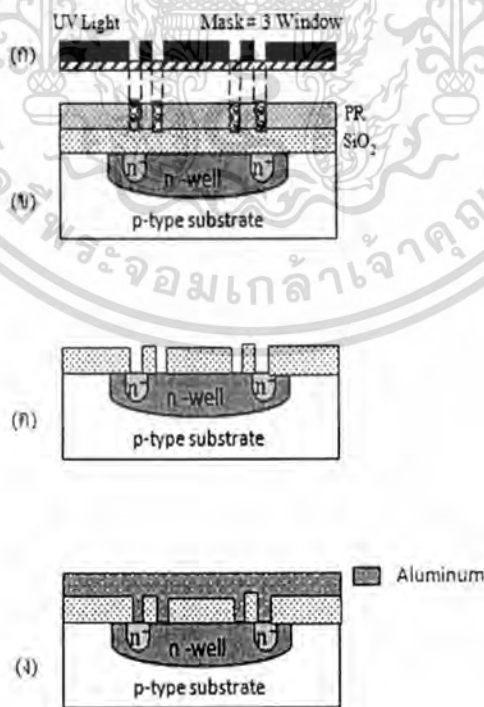
ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+) จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสเพื่อใช้ในการสร้างหน้าสัมผัสไฟฟ้าต่อไป โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนก่อนกระบวนการสร้างลวดลายสำหรับการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้ลวดลายชั้น n^+ โดยใช้กระจกโฟโตมาสก์สอง (Mask # 2 n^+) ดังแสดงในรูปที่ 5.14(ก) และ 5.14 (ข) สร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการสร้างชั้น n^+ ต่อไป
3. กระบวนการ etching ชั้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ดังรูปที่ 5.14(ค) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
4. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความเข้มข้นสารเจือเท่ากับ $1e19$ อะตอม/ลบ.ซม. เป็นชั้น n^+ ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นสูงดังรูปที่ 5.14 (ง)
5. หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจะได้เป็นชั้น n^+ ดังรูปที่ 5.14(จ)



รูปที่ 5.14 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น n⁺

5.9.2.3 ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม



รูปที่ 5.15 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก

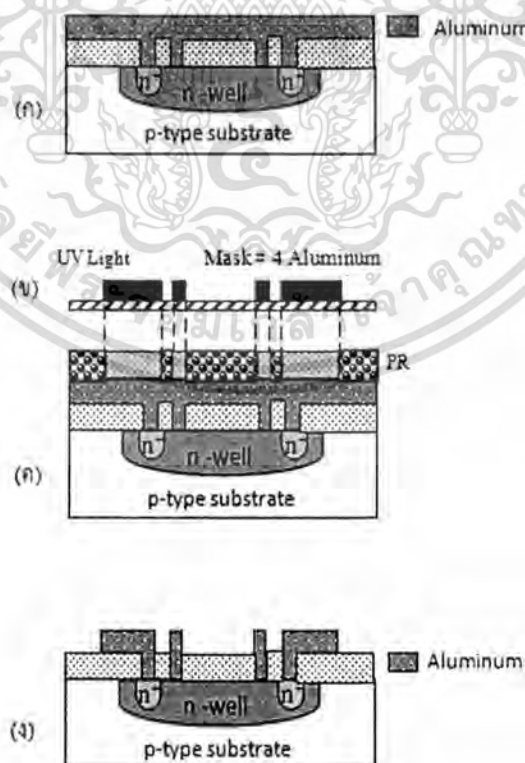
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนก่อนถึงขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทคือ การเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียมตามที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้กระจกโฟโตมาสค์สาม (Mask # 3 Window) ดังแสดงในรูปที่ 5.15(ก) และ 5.15(ข) สร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการเปิดช่องเพื่อใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม
2. กระบวนการ etching ขึ้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียมดังรูปที่ 5.15(ค) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
3. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) ดังรูปที่ 5.15(ง)

5.9.2.4 ขั้นตอนการสร้างกัณฑ์โลหะ

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยการใช้วงแหวนโลหะรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทคือ การกัณฑ์โลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.16 แสดงขั้นตอนกระบวนการกัณฑ์โลหะเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จากรูปที่ 5.16(ก) แสดงการเปิดช่องเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและทำการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์สี (Mask # 4 Aluminum) ดังรูปที่ 5.16(ข) และ 5.16(ค) เป็นการสร้างลวดลาย (Develop)
3. กระบวนการกัดชั้นโลหะ (Metal Etching) ส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ดังรูปที่ 5.16(ง) จากนั้นทำการลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออก

โดยหลังจากการกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์สีและทำการลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกจะทำให้ได้แผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลทดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เฟลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลองเกี่ยวกับโครงสร้างและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์ของโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเมื่อเปรียบเทียบกับการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท รวมถึงสรุปผลการามีเตอร์ต่างๆ เช่น ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือและอุณหภูมิ ที่ช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีไตรีซิสแตนซ์ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะทำให้สนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทมีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ภายในวงแหวนสี่เหลี่ยมมีแรงดันฮอลล์มีค่าลดลงเป็นศูนย์ เมื่อให้สนามแม่เหล็กจะทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนได้เต็มที่ตามแรงลอเรนซ์และยังเป็นโครงสร้างที่ออกแบบได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทเพราะไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างของอลูมิเนียมที่มีผลต่อปรากฏการณ์แมกนีไตรีซิสแตนซ์

(2) การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์ได้ แต่มีข้อเสียเปรียบในเรื่องของการออกแบบที่ยุ่งยากเพราะต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม โดยเมื่อระยะห่างของอลูมิเนียมมากพอจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างขึ้นซึ่งส่งผลกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์มีค่าลดลงได้ โดยจากการทดลองที่ระยะห่างของอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร จะแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์เป็น 20.01% แต่เมื่อระยะห่างของอลูมิเนียมมีค่า 40 ไมโครเมตร จะทำให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์มีค่าลดลงเป็น 16.15%

(3) โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะทำให้พื้นที่ภายในวงแหวนสี่เหลี่ยมมีแรงดันฮอลล์เป็นศูนย์จึงทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนได้เต็มที่และยังเป็นโครงสร้างที่ออกแบบได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทเพราะไม่ต้องคำนึงถึงระยะห่างของอลูมิเนียมที่มีผลต่อปรากฏการณ์แมกนีไตรีซิสแตนซ์ โดยจากการจำลองการทำงานที่เงื่อนไขเดียวกัน คือใช้วัสดุซิลิคอน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, อุณหภูมิ 300 เคลวิน โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีไตรีซิสแตนซ์เป็น 20.03% ซึ่งมากกว่า

การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทอยู่ที่ 0.02% ที่ระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร

(4) โครงสร้างแบบใหม่ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ดีกว่าแบบเดิม ทำให้แมกนีโตริซิสแดนท์โครงสร้างฮอลล์แบบใหม่ทดแทนแบบอนุกรมได้และยังสามารถให้ผลแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ดีกว่าโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมอีกด้วยเมื่อสร้างจากวัสดุที่มีค่าสภาพคล่องตัวของพาหะที่สูง ความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนน้อยและทำงานที่อุณหภูมิต่ำ โดยจากการทดลองเราพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์มีค่ามากที่สุดเมื่อสร้างจากวัสดุแคลเซียมอะไซด์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และอุณหภูมิ 200 เคลวิน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์เป็น 2883.72% ซึ่งมากกว่าการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทอยู่ที่ 906.27%

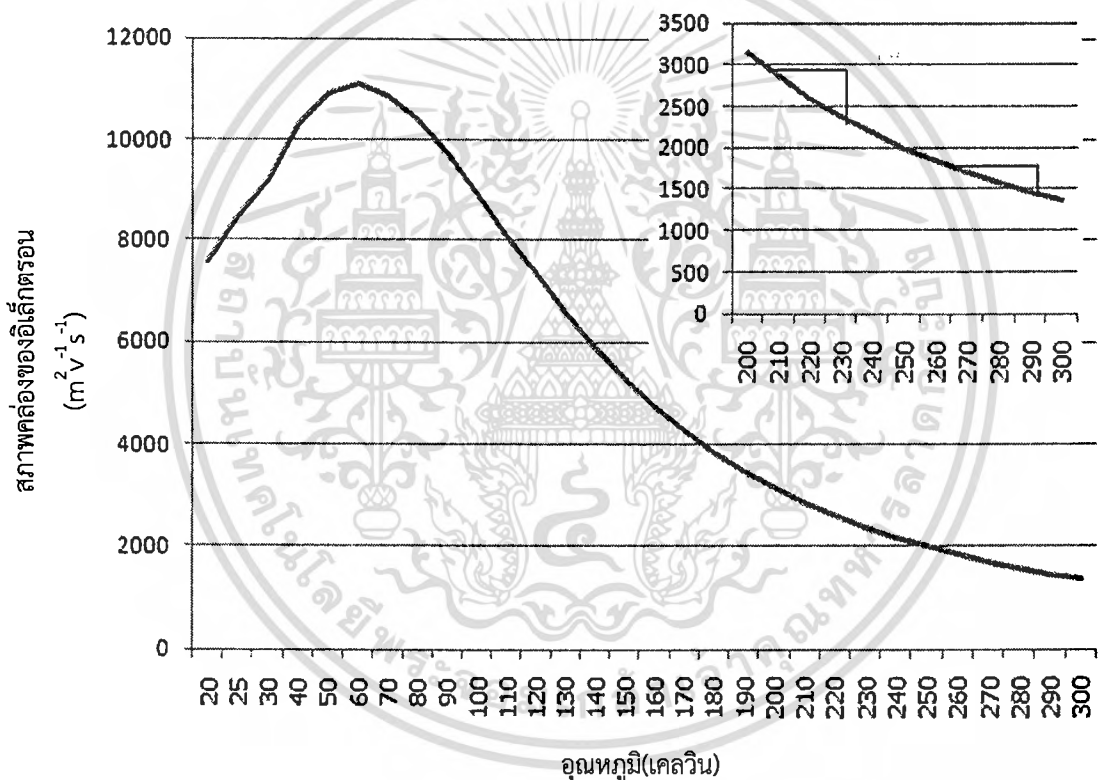
(5) เราสามารถพัฒนาและปรับปรุงผลของแมกนีโตริซิสแดนท์ได้เมื่อทำให้ค่าความคล่องตัวของพาหะมีค่ามากขึ้นซึ่งจะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีการเบี่ยงเบนที่มากจึงส่งผลโดยตรงกับค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่เกิดขึ้น ดังสมการ $F_L = -q(\vec{v}_d \times \vec{B}_z)$ โดย v คือความเร็วดริฟท์ของพาหะ ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับสภาพคล่องตัวของพาหะ

(6) จากพารามิเตอร์ที่ได้ทำการศึกษามาเราพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่สร้างจากวัสดุที่มีค่าสภาพคล่องตัวของพาหะที่สูง เช่น แคลเซียมอะไซด์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่ดีกว่าวัสดุที่มีค่าสภาพคล่องตัวของพาหะที่ต่ำ ทั้งนี้เพราะวัสดุที่มีค่าสภาพคล่องตัวที่สูงจะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยจากการทดลองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, อุณหภูมิ 300 เคลวิน ในโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์เป็น 575.06% และ 20.03% เมื่อสร้างจากแคลเซียมอะไซด์ และซิลิคอน ตามลำดับ

(7) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่สร้างจากวัสดุที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนน้อยจะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนท์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนน้อยการกระเจิงของพาหะ (Impurity scattering) มีค่าน้อยลงด้วย จึงส่งผลให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองด้วยวัสดุซิลิคอนที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์เป็น 22.22%, 20.03% และ 12.84% ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ จะเห็นว่าในช่วงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าน้อย สภาพคล่องของพาหะจะมีค่าเกือบคงที่ แต่เมื่อความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าสูงเช่นมากกว่า 10^{15} อะตอมต่อลบ.ซม. สภาพคล่องของพาหะจะลดลงขณะที่ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(8) จากการจำลองการทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ที่ดีกว่าเมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำพลังงานความร้อนมีค่าน้อยทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Thermal vibration) น้อยตามไปด้วย ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการกระเจิงจากแลตทิซ (Lattice scattering) จึงมีน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีการสั่นของอะตอมเกิดขึ้นมาก ทำให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองด้วยวัสดุซิลิคอนที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ โครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบซอลล์เพลทจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์เป็น 144.447%, 49.214% และ 20.028% ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ตามลำดับ จะเห็นว่าในช่วงที่อุณหภูมิมียุคค่าสูงสภาพคล่องของพาหะจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำเช่นน้อยกว่า 250 เคลวิน สภาพคล่องของพาหะจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 6.1 แสดงสภาพคล่องของพาหะเนื่องจากอุณหภูมิที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของฐานรองซิลิคอน จากโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

เอกสารอ้างอิง

- [1] R S Popovic Swiss “Series in Sensors Hall Effect Devices Second Edition” Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)
- [2] H.P. Baltès and R.S. Popovic (1986). “Integrated Semiconductor Magnetic Field sensors”. Proc. IEEE 74, pp. 1107-1132
- [3] C.L. Chien and C.R. Westgate (1980). “The Hall Effect and its Applications” Plenum Press, New York.
- [4] M. Epstein (1967). “Hall effect devices” IEEE Trans. Magn. 3, pp. 352-359
- [5] Newsome J P 1983 “Determination of the electrical characteristics of Hall plates” Proc. IEEE 110 pp. 653-659
- [6] G.S. Randhawa (1981). “Monolithic integrated Hall devices in silicon circuit”. Microelectronic J. 12-6, pp. 24-29
- [7] J.T. Maupin and M.L. Geske (1980). “The Hall effect in silicon circuits in The Hall Effect and its Applications” (eds C.L. Chien and C.R. Westgate Plenum Press, New York, pp. 421-445
- [8] Wieder H H 1971 “Hall Generators and Magnetoresistors” (London: Pion) pp 30-32
- [9] S. MIDDELHOEK and S.A. AUDET “Silicon Sensors” ACADEMIC PRESS Harcourt Brace Jovanovich, Publishers London San Diego New York Berkeley Boston Sydney Tokyo Toronto, pp 201-213
- [10] Popovic R S 1989 “Hall-effect devices” Sens. Actuators 17 pp. 39-53
- [11] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai “A Simulation of Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure” Siam physics congress 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] S. Kordic (1986). “Integrated silicon magnetic-field sensors” *Sensors and Actuators* 10, pp. 347-378.
- [13] Beer A C 1983 “Galvanomagnetic effects in semiconductors *Solid State*” *Phys. suppl.* 4, pp. 13-28
- [14] T. Phetchakul , P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai “The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure” *ECTI 2012*
- [15] ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, วิทวัส แยมวงษ์ และ อัมพร โพธิ์โย “ผลของแมกนีโตรีซิสแตนทีในโครงสร้างของฮอลล์เพลท” *ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34 (EECON-34) 30 พฤศจิกายน -2 ธันวาคม 2554 EL006* หน้า 845-848
- [16] M P Delmo, S Kasai, K Kobayashi, and T Ono “Space-charge effect induced magnetoresistance effect in silicon” *Journal of Physics: Conference Series* 193 (2009) 012001 doi:10.1088/1742-6596/193/1/012001
- [17] Michael P. Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi “Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect” *Vol 457*, 26 February 2009, doi:10.1038/nature07711
- [18] T. Phetchakul , P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai “Contributing Parameters for Magnetoresistance Effect of The New Design on Hall Plate Structure” *ECTI-CON 2013 (Pending)*
- [19] Popovic R S and Heidenreich W 1989 “Galvanomagnetic semiconductor sensors” In: *Sensors vol. 5 ed. R Boll and K I Oveshott Magnetic Sensors* (Weinheim: VCH) pp. 43-96
- [20] RS Popovic “Series in sensors Hall effect devices” second edition pp. 76-80
- [21] Lin J F, Li S S, Linares L C and Teng K W 1981 “Theoretical analysis of Hall factor and Hall mobility in p-type silicon *Solid-State*” *Electron.* 24 pp. 827-33
- [22] Suhl H and Shockley W 1949 “Concentrating holes and electrons by magnetic fields” pp. 617-618

- [23] John Wiley and Sons “Microsensors Principles and Applications” pp. 199-223
- [24] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช “เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม” ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หน้า 275-289
- [25] 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.
- [26] C.Lombardi et al., “A Physically Based Mobility Model for Numerical Simulation of Nonplanar Devices” IEEE Transactions on Computer-Aided Design, vol.7, no.11, pp.1164-1171, 1988
- [27]. E. Conwell and V. F. Weisskopf, “Theory of Impurity Scattering in Semiconductors” Phys. Rev., 77, 388 (1950).
- [28] Roberts G G, Apsley N and Munn R W 1980 “Temperature dependent Electronic conduction in semiconductors” pp. 59–150
- [29] “Sentaurus Process Used Guide” Synopsis, Version A-2007.12, December 2007
- [30] “Sentaurus Device Used Guide” Synopsis, Version A-2007.12, December 2007
- [31] “Sentaurus Structure Editor Used Guide” Synopsis, Version A-2007.12, December 2007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300K)

คุณสมบัติทั่วไป	ซิลิคอน (Si)	เยอรมันเนียม (Ge)	แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs)
น้ำหนักอะตอม	28.09	72.59	144.63
เลขอะตอม, Z	14	32	
ความหนาแน่น, : g/cm ³	2.33	5.33	5.32
ความหนาแน่นอะตอม, : cm ³	5.10x10 ²²	4.42x10 ²²	4.4x10 ²²
ลักษณะโครงสร้างผลึก	Diamond	Diamond	Zincblende
จุดหลอมเหลว, : °C	1415	937	1238
ค่าคงตัวแลตทิซ, a : nm.	0.543	0.565	0.563
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก, ϵ_r	11.7	16.0	13.1
ความกว้างช่องว่างพลังงาน, E _g : eV.	1.12	0.66	1.42
ค่า electron affinity, χ : eV.	4.01	4.13	4.07
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน, μ_n : cm ² /V-sec	1350	3900	8500
สภาพคล่องของโฮล, μ_p : cm ² /V-sec	480	1900	400
ค่าคงที่การแพร่ของอิเล็กตรอน, D _n : cm ² /sec	34.6	93	13
ค่าคงที่การแพร่ของโฮล, D _p : cm ² /sec	12.3	48.7	80
ความหนาแน่นอินทรินซิก, n _i : cm ⁻³	1.5x10 ¹⁰	2.4x10 ¹³	1.8x10 ⁶
ความหนาแน่นสถานะที่แถบนำไฟฟ้า, N _c : cm ⁻³	2.8x10 ¹⁹	1.0x10 ¹⁹	4.7x10 ¹⁷
ความหนาแน่นสถานะที่แถบวาเลนซ์, N _v : cm ⁻³	1.0x10 ¹⁹	6.0x10 ¹⁸	7.0x10 ¹⁸

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

โปรแกรมจำลองแบบ TCAD

ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทเราจะทำการจำลองแบบทั้งหมด 3 โครงสร้าง เพื่อสังเกตผลปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ที่เกิดขึ้น คือ โครงสร้างฮอลล์เพลท, การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท โดยแต่ละโครงสร้างจะมีส่วนประกอบ อยู่ 2 ส่วน ได้แก่ 1. การออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor) 2. การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง (Sentaurus Device)

1. การออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor)

1.1 โปรแกรมจำลองแบบโครงสร้างฮอลล์เพลท

```
;Device configurations
```

```
(define l 400)
```

```
(define w 100)
```

```
(define t 1)
```

```
;Doping profiles
```

```
(define impurity "PhosphorusActiveConcentration")
```

```
(define dopingconcentration 2e15)
```

```
;Grids and refinement
```

```
(define grd_x_max 5)
```

```
(define grd_x_min (/ grd_x_max 2))
```

```
(define grd_y_max 5)
```

```
(define grd_y_min (/ grd_y_max 2))
```

```
(define grd_z_max 5)
```

```
(define grd_z_min (/ grd_z_max 2))
```

```
;Overlap behaviour
```

```
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
```

```
;Device geometry
```

```
(sdegeo:create-rectangle(position 0 0 0) (position l w t) "Silicon" "substrate")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;Contacts
```

```
(sdegeo:define-contact-set "contactA" 4 (color:rgb 1 0 0) "##")
(sdegeo:define-contact-set "contactB" 4 (color:rgb 0 1 0) "##")
(sdegeo:set-current-contact-set "contactA")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 0 50 0.5)) "contactA")
(sdegeo:set-current-contact-set "contactB")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 400 50 0.5)))) "contactB")
```

```
;Doping profiles
```

```
(sdedr:define-constant-profile "profile.magnetoresistance" impurity dopingconcentration)
(sdedr:define-constant-profile-region "Place.magnetoresistance" "profile.magnetoresistance"
"substrate")
```

```
;mesh
```

```
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_1" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_1" "RefDef_1" "substrate" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_1" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
```

```
;grid
```

```
(sde:build-mesh "mesh" "-d" "/home/tcad/Documents/PrateepTCAD /magnetoresistance")
```

1.2 โปรแกรมจำลองแบบการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

```
;Device configurations
```

```
(define l 400)
(define w 100)
(define t 1)
```

```
;Doping profiles
```

```
(define impurity "PhosphorusActiveConcentration")
(define dopingconcentration 2e15)
```

```
;Grids and refinement
```

```
(define grd_x_max 5)
(define grd_x_min (/ grd_x_max 2))
(define grd_y_max 5)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(define grd_y_min (/ grd_y_max 2))
(define grd_z_max 5)
(define grd_z_min (/ grd_z_max 2))
```

```
;Overlap behaviour
```

```
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
```

```
;Device geometry
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position 0 0 0) (position l w t) "Silicon" "substrate")
(sdegeo:create-cuboid (position 9.75 0 0.5) (position 10.25 100 1.0) "Aluminum" "A")
(sdegeo:create-cuboid (position 19.75 0 0.5) (position 20.25 100 1.0) "Aluminum" "B")
(sdegeo:create-cuboid (position 29.75 0 0.5) (position 30.25 100 1.0) "Aluminum" "C")
(sdegeo:create-cuboid (position 39.75 0 0.5) (position 40.25 100 1.0) "Aluminum" "D")
(sdegeo:create-cuboid (position 49.75 0 0.5) (position 50.25 100 1.0) "Aluminum" "E")
(sdegeo:create-cuboid (position 59.75 0 0.5) (position 60.25 100 1.0) "Aluminum" "F")
(sdegeo:create-cuboid (position 69.75 0 0.5) (position 70.25 100 1.0) "Aluminum" "G")
(sdegeo:create-cuboid (position 79.75 0 0.5) (position 80.25 100 1.0) "Aluminum" "H")
(sdegeo:create-cuboid (position 89.75 0 0.5) (position 90.25 100 1.0) "Aluminum" "I")
(sdegeo:create-cuboid (position 99.75 0 0.5) (position 100.25 100 1.0) "Aluminum" "J")
(sdegeo:create-cuboid (position 109.75 0 0.5) (position 110.25 100 1.0) "Aluminum" "K")
(sdegeo:create-cuboid (position 119.75 0 0.5) (position 120.25 100 1.0) "Aluminum" "L")
(sdegeo:create-cuboid (position 129.75 0 0.5) (position 130.25 100 1.0) "Aluminum" "M")
(sdegeo:create-cuboid (position 139.75 0 0.5) (position 140.25 100 1.0) "Aluminum" "N")
(sdegeo:create-cuboid (position 149.75 0 0.5) (position 150.25 100 1.0) "Aluminum" "O")
(sdegeo:create-cuboid (position 159.75 0 0.5) (position 160.25 100 1.0) "Aluminum" "P")
(sdegeo:create-cuboid (position 169.75 0 0.5) (position 170.25 100 1.0) "Aluminum" "Q")
(sdegeo:create-cuboid (position 179.75 0 0.5) (position 180.25 100 1.0) "Aluminum" "R")
(sdegeo:create-cuboid (position 189.75 0 0.5) (position 190.25 100 1.0) "Aluminum" "AA")
(sdegeo:create-cuboid (position 199.75 0 0.5) (position 200.25 100 1.0) "Aluminum" "BB")
(sdegeo:create-cuboid (position 209.75 0 0.5) (position 210.25 100 1.0) "Aluminum" "CC")
(sdegeo:create-cuboid (position 219.75 0 0.5) (position 220.25 100 1.0) "Aluminum" "DD")
(sdegeo:create-cuboid (position 229.75 0 0.5) (position 230.25 100 1.0) "Aluminum" "EE")
(sdegeo:create-cuboid (position 239.75 0 0.5) (position 240.25 100 1.0) "Aluminum" "FF")
(sdegeo:create-cuboid (position 249.75 0 0.5) (position 250.25 100 1.0) "Aluminum" "GG")
(sdegeo:create-cuboid (position 259.75 0 0.5) (position 260.25 100 1.0) "Aluminum" "HH")
(sdegeo:create-cuboid (position 269.75 0 0.5) (position 270.25 100 1.0) "Aluminum" "II")
(sdegeo:create-cuboid (position 279.75 0 0.5) (position 280.25 100 1.0) "Aluminum" "JJ")
(sdegeo:create-cuboid (position 289.75 0 0.5) (position 290.25 100 1.0) "Aluminum" "KK")
```

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(sdegeo:create-cuboid (position 299.75 0 0.5) (position 300.25 100 1.0) "Aluminum" "LL")
(sdegeo:create-cuboid (position 309.75 0 0.5) (position 310.25 100 1.0) "Aluminum" "MM")
(sdegeo:create-cuboid (position 319.75 0 0.5) (position 320.25 100 1.0) "Aluminum" "NN")
(sdegeo:create-cuboid (position 329.75 0 0.5) (position 330.25 100 1.0) "Aluminum" "OO")
(sdegeo:create-cuboid (position 339.75 0 0.5) (position 340.25 100 1.0) "Aluminum" "PP")
(sdegeo:create-cuboid (position 349.75 0 0.5) (position 350.25 100 1.0) "Aluminum" "QQ")
(sdegeo:create-cuboid (position 359.75 0 0.5) (position 360.25 100 1.0) "Aluminum" "RR")
(sdegeo:create-cuboid (position 369.75 0 0.5) (position 370.25 100 1.0) "Aluminum" "X")
(sdegeo:create-cuboid (position 379.75 0 0.5) (position 380.25 100 1.0) "Aluminum" "Y")
(sdegeo:create-cuboid (position 389.75 0 0.5) (position 390.25 100 1.0) "Aluminum" "Z")
```

```
;contacts
```

```
(sdegeo:define-contact-set "contactA" 4 (color:rgb 1 0 0) "###")
(sdegeo:define-contact-set "contactB" 4 (color:rgb 0 1 0) "###")
(sdegeo:set-current-contact-set "contactA")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 0 50 0.5)) "contactA")
(sdegeo:set-current-contact-set "contactB")
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 400 50 0.5))) "contactB")
```

```
;Doping profiles
```

```
(sdedr:define-constant-profile "profile.magnetoresistance" impurity dopingconcentration)
(sdedr:define-constant-profile-region "Place.magnetoresistance" "profile.magnetoresistance"
"substrate")
```

```
;mesh
```

```
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_1" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_1" "RefDef_1" "substrate" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_1" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_2" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_2" "RefDef_2" "A" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_2" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_3" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_3" "RefDef_3" "B" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_3" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_4" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_4" "RefDef_4" "C" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_4" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_5" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_5" "RefDef_5" "D" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_5" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_6" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_6" "RefDef_6" "E" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_6" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_7" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_7" "RefDef_7" "F" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_7" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_8" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_8" "RefDef_8" "G" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_8" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_9" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_9" "RefDef_9" "H" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_9" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_10" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_10" "RefDef_10" "I" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_10" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_11" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_11" "RefDef_11" "J" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_11" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_12" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_12" "RefDef_12" "K" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_12" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_13" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_13" "RefDef_13" "L" )

```

(sdedr:define-refinement-function "RefDef_13" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_14" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_14" "RefDef_14" "M")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_14" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_15" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_15" "RefDef_15" "N")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_15" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_16" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_16" "RefDef_16" "O")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_16" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_17" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_17" "RefDef_17" "P")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_17" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_18" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_18" "RefDef_18" "Q")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_18" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_19" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_19" "RefDef_19" "R")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_19" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_20" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_20" "RefDef_20" "AA")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_20" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_21" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_21" "RefDef_21" "BB")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_21" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_22" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min)
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_22" "RefDef_22" "CC")
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_22" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_23" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min

เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อคุณเห็นใบแจ้งรายละเอียดการดำเนินการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_23" "RefDef_23" "DD" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_23" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_24" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_24" "RefDef_24" "EE" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_24" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_25" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_25" "RefDef_25" "FF" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_25" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_26" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_26" "RefDef_26" "GG" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_26" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_27" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_27" "RefDef_27" "HH" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_27" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_28" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_28" "RefDef_28" "II" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_28" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_29" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_29" "RefDef_29" "JJ" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_29" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_30" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_30" "RefDef_30" "KK" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_30" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_31" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_31" "RefDef_31" "LL" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_31" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_32" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_32" "RefDef_32" "MM" )

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัท ทรู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(sdedr:define-refinement-function "RefDef_32" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_33" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_33" "RefDef_33" "NN" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_33" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_34" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_34" "RefDef_34" "OO" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_34" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_35" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_35" "RefDef_35" "PP" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_35" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_36" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_36" "RefDef_36" "QQ" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_36" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_37" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_37" "RefDef_37" "RR" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_37" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_38" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_38" "RefDef_38" "X" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_38" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_39" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_39" "RefDef_39" "Y" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_39" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_40" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_40" "RefDef_40" "Z" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_40" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)

;grid
(sde:build-mesh "mesh" "-d" "/home/tcad/Documents/ ContactAV/magnetoresistance")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 โปรแกรมจำลองแบบการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลท

```
;Device configurations
```

```
(define l 400)
```

```
(define w 100)
```

```
(define t 1.0)
```

```
;Doping profiles
```

```
(define impurity "PhosphorusActiveConcentration")
```

```
(define dopingconcentration 2e14)
```

```
;Grids and refinement
```

```
(define grd_x_max 5)
```

```
(define grd_x_min (/ grd_x_max 2))
```

```
(define grd_y_max 5)
```

```
(define grd_y_min (/ grd_y_max 2))
```

```
(define grd_z_max 5)
```

```
(define grd_z_min (/ grd_z_max 2))
```

```
;Overlap behaviour
```

```
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
```

```
;Device geometry
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position 0 0 0) (position 400 100 1.0) "Silicon" "substrate")
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position 9.75 0 0.5) (position 10.25 100 1.0) "Aluminum" "A")
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position 9.75 0 0.5) (position 390.25 0.5 1.0) "Aluminum" "up")
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position 9.75 99.5 0.5) (position 390.25 100 1.0) "Aluminum" "low")
```

```
(sdegeo:create-cuboid (position 389.75 0 0.5) (position 390.25 100 1.0) "Aluminum" "Z")
```

```
;contacts
```

```
(sdegeo:define-contact-set "contactA" 4 (color:rgb 1 0 0) "##")
```

```
(sdegeo:define-contact-set "contactB" 4 (color:rgb 0 1 0) "##")
```

```
(sdegeo:set-current-contact-set "contactA")
```

```
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 0 50 0.5)) "contactA")
```

```
(sdegeo:set-current-contact-set "contactB")
```

```
(sdegeo:set-contact-faces (find-face-id (position 400 50 0.5)))) "contactB")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;Doping profiles
(sdedr:define-constant-profile "profile.magnetoresistance" impurity dopingconcentration)
(sdedr:define-constant-profile-region "Place.magnetoresistance" "profile.magnetoresistance"
"substrate")

;mesh
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_1" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_1" "RefDef_1" "substrate" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_1" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_2" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_2" "RefDef_2" "A" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_2" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_38" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_38" "RefDef_38" "up" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_38" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_39" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_39" "RefDef_39" "low" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_39" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-size "RefDef_40" grd_x_max grd_y_max grd_z_max grd_x_min
grd_y_min grd_z_min )
(sdedr:define-refinement-region "RefPlace_40" "RefDef_40" "Z" )
(sdedr:define-refinement-function "RefDef_40" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)

;grid
(sde:build-mesh "mesh" "-d " "/home/tcad/Documents /ContactAl/magnetoresistance")

```

2. การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง (Sentaurus Device)

ส่วนในการจำลองการทำงานในส่วนของอุณหภูมิตามแม่เหล็กไฟฟ้า และโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในการจำลองแบบ เราสามารถจำลองในส่วนของ Sentaurus Device ซึ่งในส่วนโปรแกรมการจำลองแบบจะแสดงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
File {
  * Input Files
  Grid = "magnetoresistance_msh.tdr"
  * Output Files
  Current = "magnetoresistance_des.plt"
  Plot = "magnetoresistance_des.tdr"
  Output = "magnetoresistance_des.log"
}
```

```
Electrode {
```

```
{ Name="contactA" Voltage=0.0 }
{ Name="contactB" Voltage=0.0}
}
```

```
Physics {
```

```
Mobility(DopingDependence)
MagneticField=(0, 0, 0.0)
AreaFactor=0.4
Temperature=300
*Incompletelionization
}
```

```
Plot {
```

```
eDensity eCurrent eCurrent/Vector
Potential/Vector SpaceCharge ElectricField/Vector
eMobility eVelocity EffectiveIntrinsicDensity
Doping DonorConcentration
}
```

```
Math {
```

```
Extrapolate
RelErrControl
Iterations=20
NotDamped=30
Digits=5
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Solve {
  Poisson
  coupled{ Poisson Electron}
  *- Bias contactA to target bias
  Quasistationary(
  InitialStep=0.01 Maxstep=0.01 MinStep=0.001 *Increment=1.41 *Decrement=2.0
  Goal{Voltage=3 Name="contactA"}
  ){ coupled{ Poisson Electron } }
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, วิทวัส แยมวงษ์ และ อัมพร โพธิ์โย “ผลของแมกนีโตรีซิสแตนท์ในโครงสร้างของฮอลล์เพลท” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34 (EECON-34) 30 พฤศจิกายน -2 ธันวาคม 2554.
2. T. Phetchakul , P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai “The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure”, The 9th International conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2012, May 16-18, Hua-Hin, Thailand.
3. T. Phetchakul , P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai “Contributing Parameters for Magnetoresistance Effect of The New Design on Hall Plate Structure” The 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2013, May 15-17, Krabi, Thailand.

ผลของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างของฮอลล์เพลท Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure

ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล¹ เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล¹ วิทวัส แยมวงษ์¹ และ อัมพร โพธิ์ไย¹
¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซ.ฉลองกรุง 1 ถ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. 0-2329-8344-5
¹ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
51/4 หมู่ 1 ต.วังตะเคียน อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอตัวแปร ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์(magnetoresistance) ในโครงสร้างฮอลล์เพลท(Hall plate) ได้แก่ ชนิดของวัสดุ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา โดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD การจำลองการทำงานใช้โครงสร้างฮอลล์เพลทชนิดนี้มีความยาว 400 ไมโครเมตร ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร ระหว่างซิลิคอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ฮอลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 16.1%, 6.3% และ 2.7% และแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็น 135.6%, 78.9% และ 49.0% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ฮอลล์เพลทที่สร้างจากซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็น 3.0%, 2.8% และ 2.1% และแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็น 53.2%, 50.7% และ 42.4% ที่อุณหภูมิ 300 เคลวินตามลำดับ

คำสำคัญ: แมกนีโตรีซิสแตนซ์, การจำลองแบบสองมิติ, ฮอลล์เพลท, TCAD

Abstract

This paper is present the parameters which contribute to magnetoresistance on Hall plate structure such as material type, doping concentration and temperature in magnetic field range 0-3 Tesla by simulation with Sentaurus TCAD program. The Hall plate structure is 400 μm length, 100 μm width and 1 μm thickness. Two kinds of material which are used in this experiment are silicon and gallium arsenide. Silicon Hall plates show the percentage of magnetoresistance changing 16.1%, 6.3% and 2.7% and GaAs Hall plates show 135.6%, 78.9% and 49.0% at temperature 200, 250 and 300K at doping

concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, respectively. Silicon Hall plates show the percentage of magnetoresistance changing 3.0%, 2.8% and 2.1% and 53.2%, 50.7% and 42.4% for GaAs at doping concentration $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at 300 K, respectively.

Keywords: Magnetoresistance, 2D Simulation, Hall plate, TCAD

1. บทนำ

ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้นำมาใช้ในงาน เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมากมายเช่น คีย์บอร์ด แมกนีโตมิเตอร์รวมถึงเซ็นเซอร์ต่างๆ ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นจาก โครงสร้างวัสดุที่เป็นแท่งตัวนำยาวหรือเรียกว่าฮอลล์เพลทจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำจะสมดุลกับแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) [1] ในโครงสร้างฮอลล์เพลทผลของปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อออกแบบให้วัสดุมีความสั้น หรือ มีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่าแรงลอเรนซ์ทำให้กระแสเกิดการหักเห แต่อย่างไรก็ตามได้มีการพบว่าโครงสร้างฮอลล์เพลทสามารถเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์เป็นจำนวนมากที่เงื่อนไขที่เหมาะสมได้ [2-5]

ในบทความนี้ได้นำเสนอตัวแปร ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างของฮอลล์เพลทโดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD[6] ในการจำลองการทำงานเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลแมกนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างฮอลล์เพลทต่อไป

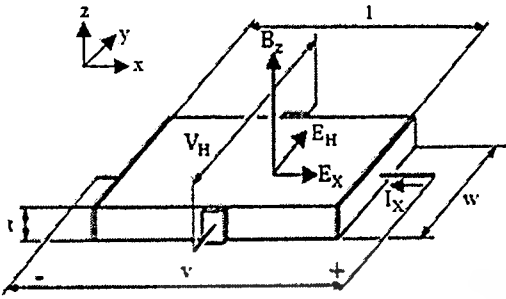
2. ปรากฏการณ์ฮอลล์และแมกนีโตรีซิสแตนซ์

2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 1 ซึ่งแสดงอุปกรณ์ฮอลล์เพลทที่มีความกว้าง w ยาว l และหนา t มีกระแสไฟฟ้า I_x ไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำในทิศทาง $-x$ วัสดุเป็นสารกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำชนิดอื่น (n-type) พาระประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I_x ในทิศทาง +x เมื่อให้สนามแม่เหล็ก B_z ดังจากภาพทิศของกระแส I_x และตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวฮอลล์เพลทจะทำให้



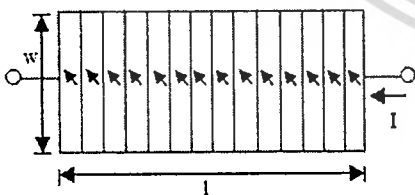
รูปที่ 1 อุปกรณ์ฮอลล์เพลทในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

- เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบน
- ทิศทางทิศ +y ส่วนทิศทาง -y แสดงประจุไฟฟ้าบวก การที่มีประจุไฟฟ้า
- ่างชนิดกันที่ทิศทาง y ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์
- E_H ในแผ่นฮอลล์เพลทมีทิศ +y สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า
- กระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางทิศ -y เมื่อแรง
- ไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ใน
- ทิศทาง +x เช่นเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอีก
- ขณะนี้ แรงลอเรนซ์ และ แรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์มีค่าเท่ากัน ซึ่ง
- สนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H หาได้จากสมการที่ 1

$$E_H = \frac{I_x \times B_z}{n \cdot e} \quad (1)$$

2.2 ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์

ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ คือ ปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็ก ในโครงสร้างฮอลล์



รูปที่ 2 แมกนีโตริซิสแตนซ์ต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างของฮอลล์เพลท

- ผลของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแตนซ์เพียงเล็กน้อย ดังนั้น เพื่อเพิ่มค่าแมกนีโตริซิสแตนซ์ให้มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น เราจึง
- ออกแบบให้ ฮอลล์เพลทมีความสั้น หรือ มีความกว้างมากกว่าความยาว
- ากๆ เพื่อที่จะทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำมีค่าน้อยกว่าค่าแรงล
- อแรงทำให้กระแสเกิดการหักเห โดยออกแบบให้ค่าความต้านทานต่อ

อนุกรมกันหลายตัวเพื่อเพิ่มค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานรวมกับสนามแม่เหล็กในโครงสร้างฮอลล์เพลทดังรูปที่ 2

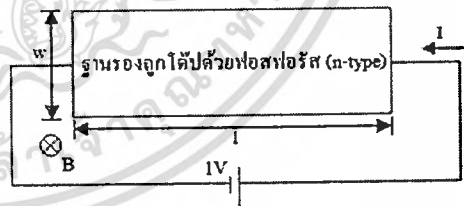
3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดลอง

ในการทดลองเราทำการหาตัวแปร ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ ในโครงสร้างของฮอลล์เพลท ได้แก่ ชนิดของฐานรอง ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และ อุณหภูมิที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ โดยทดลองกับซิลิคอนและ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ทำการได้ไปด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดอื่นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อหาค่าแมกนีโตริซิสแตนซ์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน และทำการหาค่าแมกนีโตริซิสแตนซ์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งเปอร์เซ็นต์แมกนีโตริซิสแตนซ์หาได้จากสมการที่ 2

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

โดย $R(H)$ คือ ความต้านทานที่ขั้วไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ (V/I) ที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า H โครงสร้างที่ใช้ในการทดลองจะใช้โครงสร้างของฮอลล์เพลทซึ่งเป็นแผ่นวัสดุสารกึ่งตัวนำโดยมีขนาดความยาว 400 ไมโครเมตร กว้าง 100 ไมโครเมตร และหนา 1.0 ไมโครเมตร มีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสและมีหน้าสัมผัสไฟฟ้าทางด้านข้างทั้งสองเพื่อเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 3



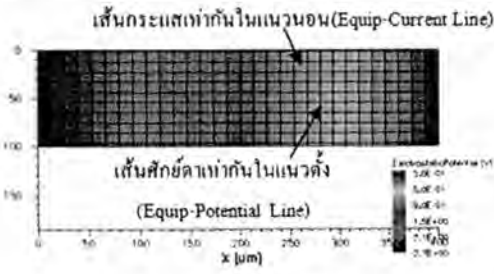
รูปที่ 3 โครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ผลการทดลอง

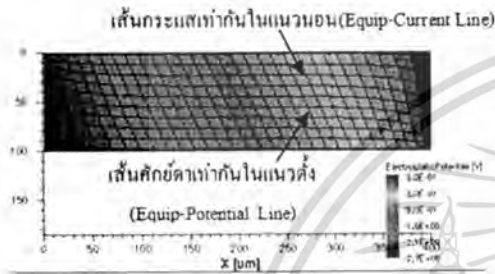
ในการจำลองแบบผลการทดลองเราทำการวัดค่ากระแสและแรงดันที่สนามแม่เหล็กค่าต่างๆกันจาก 0 – 3 เทสลาด้วยโครงสร้างของฮอลล์เพลทที่แรงดัน 1 V จากรูปที่ 4 แสดงเส้นทางเดินกระแสของการจำลองการทำงานด้วย Sentaurus TCAD ของโครงสร้างฮอลล์เพลทที่สนามแม่เหล็กที่ 0 เทสลา และ 3 เทสลาของฐานรองซิลิคอน ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน รูปที่ 4(ก) ที่แรงดัน 1 โวลต์จะทำให้ได้กระแส 5.4 ไมโครแอมป์ และ ความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

30 กิโลโอมห์ จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอน เมื่อ อลล์เพลทยังไม่มีสนามแม่เหล็กจะไม่มีการเบี่ยงเบนของเส้นทางเดิน



(ก) 0 เทสลา



(ข) 3 เทสลา

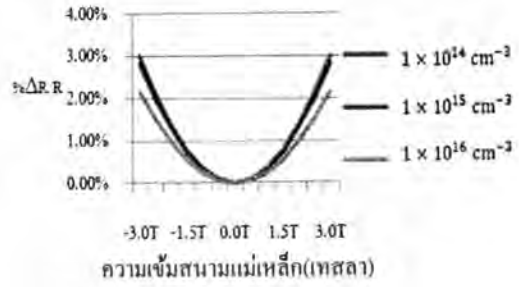
รูปที่ 4 การกระจายตัวของเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดที่เท่ากันในแนวตั้ง

กระแสเกิดขึ้น ส่วนเส้นที่มีศักดที่เท่ากันในแนวตั้ง จะเป็นเส้นตรงซึ่งหมายความว่าไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น ส่วนในรูปที่ 4(ข) เมื่ออลล์เพลทได้รับสนามแม่เหล็ก 3 เทสลาที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแส 2.2 ไมโครแอมป์และความต้านทาน 190 กิโลโอมห์ จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้น ซึ่งการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสอยู่ที่พหุที่มีค่าน้อยลงเกิดความต้านทานไฟฟ้าขึ้น ส่วนเส้นศักดไฟฟ้าจะมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้า สำหรับแกลเลียมอาเซไนด์ให้แนวโน้ม เช่นเดียวกับซิลิคอนโดยจะไม่มีสนามแม่เหล็กที่แรงดัน 1 โวลต์จะทำให้ได้กระแส 32 ไมโครแอมป์และความต้านทาน 1.9 กิโลโอมห์และเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กที่ 3 เทสลาที่แรงดัน 1 โวลต์จะทำให้ได้กระแส 21.2 ไมโครแอมป์และความต้านทาน 46.6 กิโลโอมห์ ทั้งซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์ที่สนามแม่เหล็กที่ 3 เทสลาจะทำให้กระแสมีค่าน้อยลงและความต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น

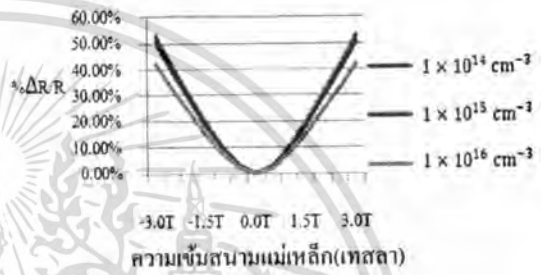
2.1 การเปลี่ยนแปลงแมกนีโตริซิสแดนที่ระหว่างซิลิคอนกับแกลเลียมอาเซไนด์

ทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กกับวัสดุ 2 ชนิด คือ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาเซไนด์โดยทดลองที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน จากรูปที่ 5

จะเห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างจากแกลเลียมอาเซไนด์จะทำให้ผลของแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่ามากกว่าซิลิคอนเป็น 50.2% , 47.9% และ 40.3% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ



(ก) ซิลิคอน

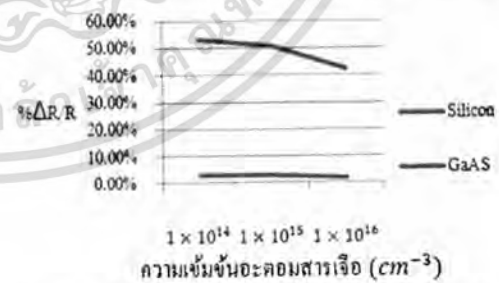


(ข) แกลเลียมอาเซไนด์

รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงแมกนีโตริซิสแดนที่กับสารเจือ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

3.2.2 ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ

จากรูปที่ 5(ก) จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ฮอลล์เพลทที่สร้างมาจากซิลิคอน จะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ เป็น



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ของวัสดุ 2 ชนิด

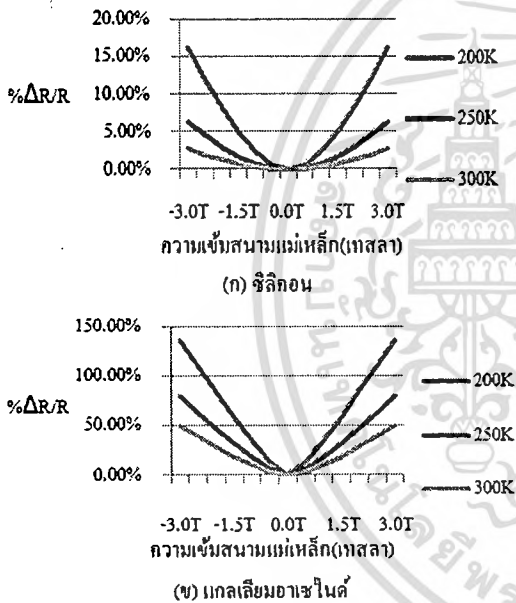
3.0%, 2.8% และ 2.1% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 5(ข) ฮอลล์เพลท ที่สร้างมาจากแกลเลียมอาเซไนด์ ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวินจะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่เป็น 53.2%, 50.7% และ 42.4% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฮอลล์เพลทที่สร้างมาจากซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์ที่มีสารเจือน้อยจะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่าสูง ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสองยังพบอีกว่า ฮอลล์เพลทที่สร้างจาก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลเลียมอาเซไนด์ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนจะทำให้ค่าความแตกต่างของแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6

3.2.3 อุณหภูมิ

รูปที่ 7 แสดงค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ของ ซิลิคอนและ กลเลียมอาเซไนด์ จากรูปที่ 7(ก) ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน วัสดุที่สร้างจากซิลิคอนจะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่าเป็น 16.1% , 5.3% และ 2.7% ที่ 3 เทสลาตามลำดับ และจากรูปที่ 7(ข) จะเห็นว่าที่ อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน วัสดุที่สร้างจากกลเลียมอาเซไนด์จะ ทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่าเป็น 135.6%, 78.9% และ 49.0% ที่ 3 เทสลาตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าในรูปที่ 7 ทั้งซิลิคอนและกลเลียมอาเซไนด์ที่อุณหภูมิ 200 เคลวิน จะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่ามากกว่า ที่ อุณหภูมิ 250 เคลวินและ 300 เคลวิน

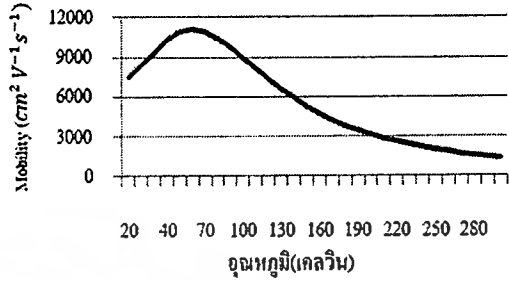


รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงแมกนีโตริซิสแดนที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าค่าแมกนีโตริซิสแดนที่จะขึ้นอยู่กับตัวแปร ใดๆก็ตามที่ได้ทำการจำลองการทำงานดังนี้คือ ความเข้มข้นอะตอมสารเจือปน ความเข้มข้นอะตอมสารเจือปน จะทำให้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่มีค่าเพิ่มขึ้น ชนิดของวัสดุสารกึ่งตัวนำ จะพบว่าวัสดุที่สร้างจากกลเลียมอาเซไนด์จะได้ค่าแมกนีโตริซิสแดนที่ดีกว่าซิลิคอน เนื่องจาก กลเลียมอาเซไนด์มีสภาพคล่องของพาหะ(Mobility) ที่ดีกว่าซิลิคอน อุณหภูมิโดย การจำลองการทำงานจะพบว่าที่อุณหภูมิต่ำค่าแมกนีโตริซิสแดนจะสูงกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะมีสภาพคล่องของพาหะ

(Mobility) ที่ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำรูปที่ 8 ดังนั้นจากพารามิเตอร์ทั้งสามตัวที่ได้ทำการจำลองการทำงานพบว่าค่าแมกนีโตริซิสแดนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นอะตอมสารเจือปนต่ำกับค่าสภาพคล่องของพาหะ (Mobility) ที่สูง



รูปที่ 8 ค่าสภาพคล่องที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่ความเข้มข้นสารเจือ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ของซิลิคอน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการการจำลองแบบกระบวนการสร้างอุปกรณ์นาโนและไมโครอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารอ้างอิง

- [1] R S Popovic Swiss "Series in Sensors Hall Effect Devices Second Edition" Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)
- [2] Michael P. Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono & Kensuke Kobayashi "Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect" Vol 457|26 February 2009| doi:10.1038/nature07711
- [3] M P Delmo, S Kasai, K Kobayashi, and T Ono-Space-charge effect induced magnetoresistance effect in silicon" Journal of Physics: Conference Series 193 (2009) 012001 doi:10.1088/1742-6596/193/1/012001
- [4] Michael P.Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi-Large Magnetoresistive effect enhanced by Space-charge effect in silicon" CP1199, 29th International conference on the Physics of Semiconductors, edited by M.J. Caldas and N.Studart 2009 American Institute of Physics 978-0-7354-0736-7/09/\$25.00
- [5] Kasai S, Nakano K, Kondou K, Ohshima N, Ono T and Kobayashi K "New Feature of the Semiconductor Leader: Large Magnetoresistance in Silicon" ICR ANNUAL report, 2009
- [6] TCAD Sentaurus Manual, Synopsis, Version A-2007.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure

T. Phetchakul¹, P. Taisettavatkul¹, W. Pengchan¹, W. Yamwong² and A. Poyai²

¹Department of Electronic Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
²Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand 24000

Abstract— This paper presents the new design which compares magnetoresistance effect on Hall plate by compared series resistance structure by Sentaurus TCAD program. A design creates zero Hall voltage area which the carriers move deflect freely. The Hall plate structure is n-type silicon with a length, 100 μm width and 1 μm thickness. Both designs percentage of magnetoresistance effect about 20% at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, temperature 300K at magnetic field 3 T. A new design on Hall plate structure is easier than the original series resistance and has no effect of metal space which is series resistance structure.

Keywords- Magnetoresistance effect; Hall plate; TCAD

I. INTRODUCTION

The Hall effect has been applied in many electronic device such as microprocessors, magnetometers, magnetic recording heads, and current sensors [1-2]. When a transverse magnetic field is applied to a current-carrying conductor an electric field is induced which is perpendicular to the current as well as to the magnetic field. The Hall voltage arises because a charge-carrier moving in a magnetic field is subject to the so-called Lorentz force.

The Hall effect appears from long plate metal or semiconductor material so called Hall plate. Hall plate induced a small Hall voltage which counter-balances the Lorentz force [3]. Magnetoresistance effect has slightly changed on Hall plate structure. Magnetoresistance effect will be increased when the design gives the length of Hall plate much shorter than the width. In this case the Hall voltage which is induced has a smaller value than Lorentz force that appears the current deflection [4]. This design applied Hall plate structure by a series resistance value series for increase to change total resistance in a magnetic field. However, this design has disadvantage of space of metal which makes to raise Hall voltage. It has a fully magnetoresistance effect [5-7] if the space of metal ratio of width per length is not suitable.

This paper presents a new design by Sentaurus TCAD [8]. A rectangular metal ring is surrounded Hall plate. It suppresses Hall voltage which extremely induces magnetoresistance effect by magnetic field strength. New design is easier way and reduces complexity of fabrication because it is not consider space of metal.

II. HALL AND MAGNETORESISTANCE EFFECT

A. Hall effect

A simple-geometry Hall plate device is shown in Fig. 1. It is a thin plate of conducting material fitted with four electrical contacts. Hall plate device is n-type silicon with a length l and thickness t . A bias voltage V is applied to

the plate via the two current contacts C1 and C2. Material is n-type semiconductor which majority carrier is electron to move in $-x$ direction. The plate is exposed to a perpendicular magnetic induction B_z with both current I_x and plane of the Hall plate in $+z$ direction. This appears Lorentz force which electrons are deflected by this force in the $-y$ direction of the Hall contact S1 and y direction at Hall contact S2 is opposite carriers. Hall voltage V_H appears between the two contacts S1 and S2.

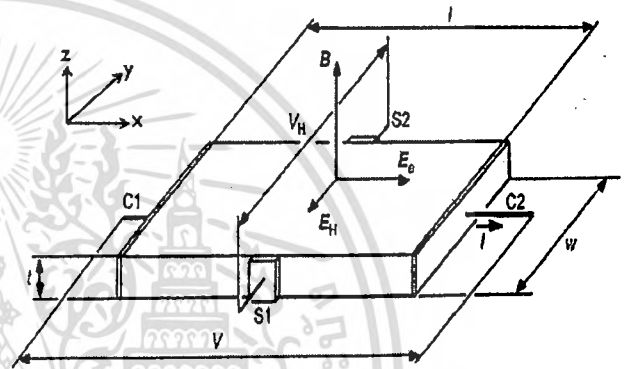


Fig. 1: Hall device in n-type semiconductor

This creates an electric field E_H which counter-balances the Lorentz force. The result is that the current again flows in its original direction in $+x$ direction. Hall electric field is given by Eq. (1).

$$E_H = \frac{I_x B_z}{n \cdot e} \quad (1)$$

An electron travelling in a magnetic field B encounters a Lorentz force given by Eq. (2)

$$F = -q (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

where \mathbf{v} is average drift velocity.

B. Magnetoresistance effect

Besides the Hall effect the so-called magnetoresistance effect can also be observed in metals, semiconductors and magnetic materials. Many materials change their resistivity upon the application of a magnetic field. Magnetoresistance effects slightly change in Hall plate structure such as magnetoresistance effects will increase when Hall plate is designed its width much longer than length of Hall plate. In

se the Hall voltage is reduced and does not fully balance Lorentz force. Ideally the plate is much wider than long. The design is a series of Hall plates shown in Fig. 2.

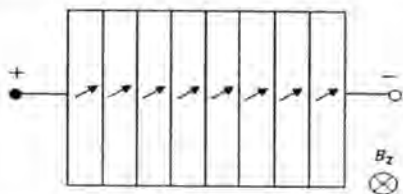


Fig. 2: Magnetoresistance effect is series on Hall plate structure.

III. EXPERIMENT

We study the magnetoresistance effect in a new design on Hall plate structure by compared with series resistance of Hall plate at 0-3 Tesla magnetic field range with 1 voltage bias. The Hall plate structure is silicon by length 400 μm, width 100 μm and thickness 1.0 μm. Magnetic field applied perpendicular to the plane of the plate and current. Hall plate with two ohmic contacts at the end of both sides is shown in Fig. 3.



Fig. 3: Hall plate structure

The magnitude of magnetoresistance effect can be shown in Eq. (3)

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

R(H) is the two-terminal resistance at magnetic field.

IV. RESULTS

The I-V characteristic was measured on Hall plate structure. Figure 4 shows percentage of magnetoresistance related to magnetic field. It shows 2.7% with doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 300K at magnetic field 3 Tesla. The direction of magnetic field also can be detected.

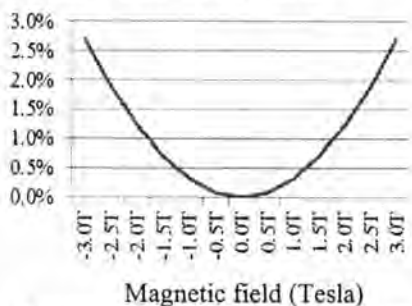


Fig. 4: Percentage of magnetoresistance effect on Hall plates structure

Figure 5 shows Equip-current line and Equip-potential line by Sentaurus TCAD. Figure 5(a) is the case of no magnetic field at 1 voltage bias, current 4.21 μA, resistance 235 kΩ. It shows that the both parallel of Equip-current line in horizontal and Equip-potential line have no any difference so the Hall voltage is zero. Figure 5(b) is the case of magnetic field 3 Tesla at 1 voltage bias, current 4.1 μA, resistance 242 kΩ. The Equip-current line in Hall plate almost has no deflection only nearly the contact that shows some deflection. It means that the induced Hall voltage in Hall plate that we can observe the bending of vertical Equip-voltage with Hall angle can balance the Lorentz's force except near the contact that the Equip-potential bending less than Hall angle that cause some excess Lorentz's force act on carrier. It confirms the normal operation of Hall plate by TCAD.

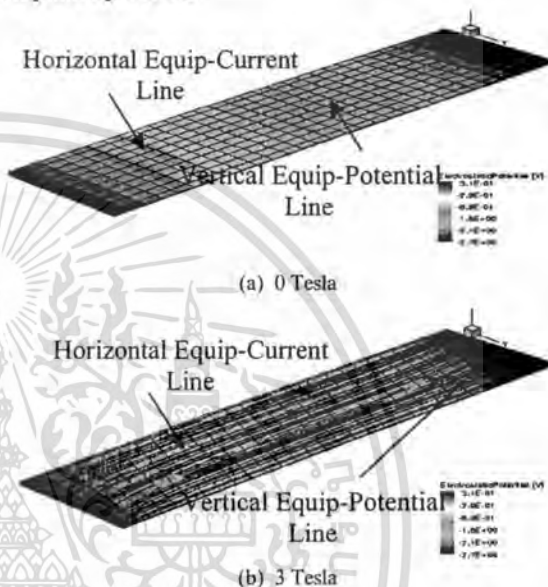


Fig. 5: Distribution of Equip-Current Line and Equip-Potential Line on Hall plate

A. Magnetoresistance effect of series resistance on Hall plate structure

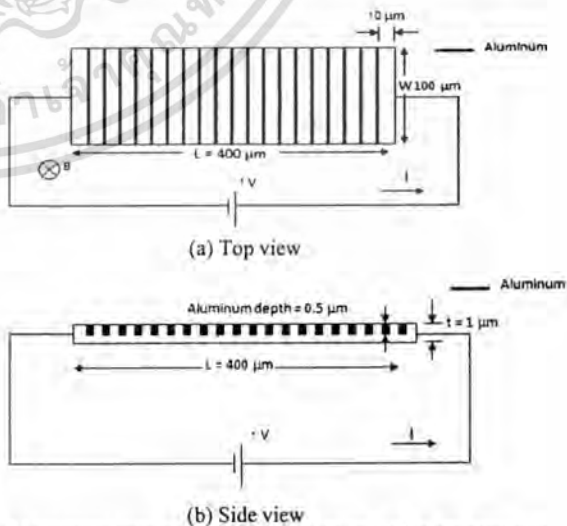
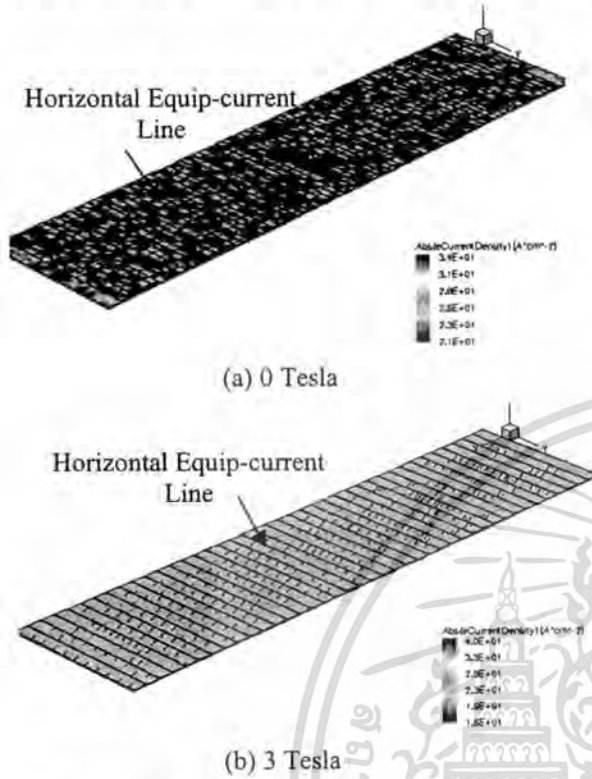


Fig. 6: Magnetoresistance effect series design on Hall plate structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ll plate can increase magnetoresistance effect by ed its width much longer than length. Hall voltage is d and does not fully balance the Lorentz force and make deflection. The design of series resistance of Hall plates is separated by aluminum space 10 μm is shown in Fig.



g. 7: Equip-current line of series resistance on Hall plate structure

is design has percentage of magnetoresistance effect % with doping concentration is $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, temperature at 3 tesla. Figure 7(a) is the case of no magnetic field at 1 e bias, current $4.41 \mu\text{A}$, resistance $224 \text{ k}\Omega$. Equip-current horizontal has no deflection of current contour. Fig. 7(b) case of magnetic field 3 Tesla at 1 voltage bias, current A, resistance $269 \text{ k}\Omega$. Equip-current line in horizontal has ion of current contour in each small piece of series r.

The disadvantage of this design is the dependence of space width of aluminum. Hall voltage is up raising which resists carrier deflection when the space width is so wide. Table I illustrates percentage of magnetoresistance effect of series resistance on silicon Hall plate at length $400 \mu\text{m}$, width $100 \mu\text{m}$ and thickness $1.0 \mu\text{m}$ at 3 Tesla on n-type silicon at different space of metal. It shows that space of aluminum should be recommend at least or less than $10 \mu\text{m}$ in order to receive the saturation of magnetoresistance effect.

B. The new design on Hall plate structure

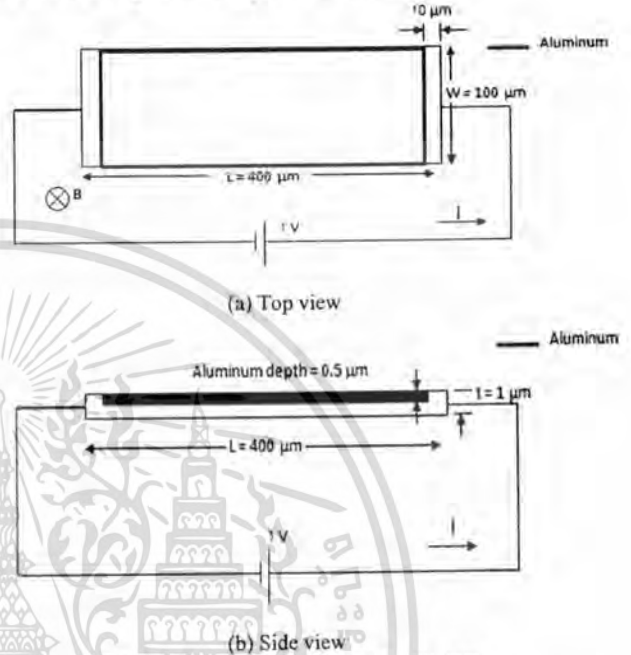


Fig. 8: A new design on Hall plate structure

The new design on Hall plate is designed with rectangular ring aluminum area surrounding on Hall plate. The design that has distance from contact $10 \mu\text{m}$ and depth $0.5 \mu\text{m}$ is shown in Fig. 8. Figure 9 shows the comparing of the percentage of magnetoresistance effect of the new design which has $10 \mu\text{m}$ aluminum space near the contact with the series resistance which has aluminum space $10 \mu\text{m}$. They are 20% of magnetoresistance effect at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 300K at magnetic field 3 Tesla.

LE I. PERCENTAGE OF MAGNETORESISTANCE EFFECT WITH SERIES STANCE SPACE OF ALUMINUM

Space of aluminum	% $\Delta R/R$
200 μm	8.5%
80 μm	12.5%
40 μm	16.2%
20 μm	18.5%
10 μm	19.8%
8 μm	20.1%
5 μm	20.4%

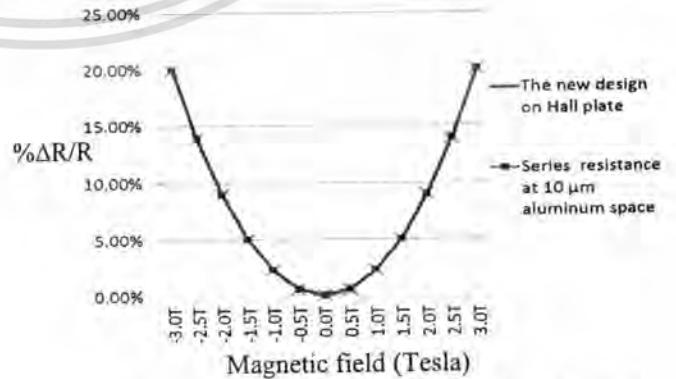


Fig. 9: Percentage of magnetoresistance effect with both designs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 10(a) is the case of no magnetic field at 1 voltage bias current $85.8\mu\text{A}$, resistance $11.5\text{ k}\Omega$. Current line in metal has no deflection of carriers. Fig. 10(b) is the case of magnetic field 3 Tesla at 1 voltage bias, current $71.5\mu\text{A}$, resistance $13.8\text{ k}\Omega$. Current line in horizontal is deflected in full voltage area. It was observed that current lines are deflected by Lorentz's force so much in the inner area of rectangular ring aluminum. The metal ring shorts the potential of the metal line so the Hall voltage is decreased. The area where the metal ring has so smaller electric force to balance the Lorentz's force so the current is deflected so much in this large

V. CONCLUSION

This paper presents the new design on Hall plate which contributes magnetoresistance effect. This design used rectangular ring aluminum surrounds Hall plate with $10\text{ }\mu\text{m}$ distance from contact which makes zero Hall voltage. It is compared with series resistance on Hall plate by $10\text{ }\mu\text{m}$ aluminum space and both designs have the percentage of magnetoresistance effect about 20 % with doping concentration $2\times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, 300K at 3 Tesla. The new design is easier design than the classical series resistance on Hall plate because the distance of aluminum space affects to magnetoresistance.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to National Research Council of Thailand for financial support.

REFERENCES

- [1] S. Middelhoek, S.A. Audet "Silicon Sensors" Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.202-213.
- [2] M. Epstein (1967), "Hall effect devices," IEEE Trans, Magn. 3,352-359.
- [3] Decimal classification R282.12. Original manuscript received by the Institute, "Proceedings of the I.R.E. Hall Effect OLOF Lindberg", pp.1414-1419
- [4] P.W. Bridgman, "The Thermodynamics of Electrical Phenomena in Metals", Macmillan Co., New York, N.Y., pp.135-138;1934
- [5] M P Delmo, S Kasai, K Kobayashi, and T Ono "Space-charge effect induced magnetoresistance effect in silicon" Journal of Physics: Conference Series 193 (2009) 012001 doi:10.1088/1742-6596/193/1/012001
- [6] Michael P. Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi "Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect" Vol 457, 26 February 2009, doi:10.1038/nature07711
- [7] Kasai S, Kondou K, Kondou K, Ohshima N, Ono T and Kobayashi K "New Feature of the Semiconductor Leader: Large Magnetoresistance in Silicon" ICR ANNUAL report, 2009
- [8] TCAD Sentaurus Manual, Synopsis, Version A-2007

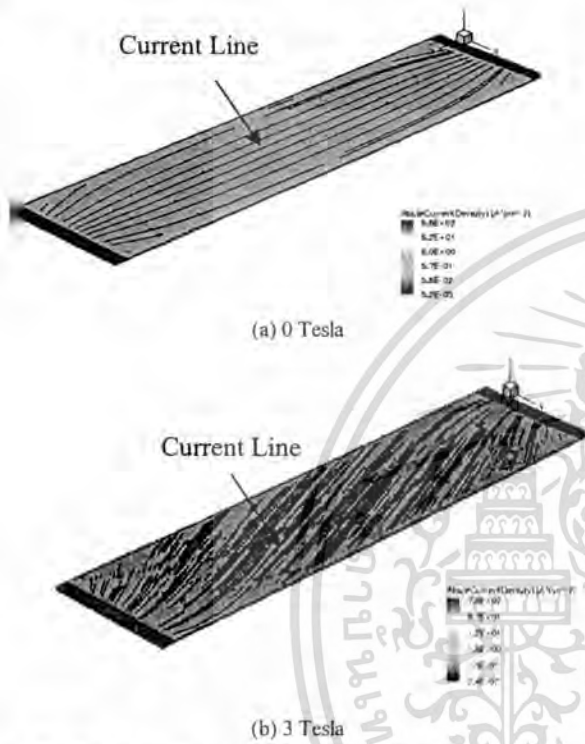


Fig. 10: Current line of a new design on Hall plate structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Contributing Parameters for Magnetoresistance Effect of The New Design on Hall Plate Structure

T. Phetchakul¹, P. Taisettavatkul¹, W. Pengchan¹, W. Yamwong² and A. Poyai²

¹Department of Electronic Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
²Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand 24000

Abstract— This paper presents the parameters which contribute to magnetoresistance effect of the new design on Hall plate structure when it is compared with series resistance structure. The new design is designed with rectangular aluminum ring surrounding on Hall plate. It creates zero Hall voltage area which carriers move and deflect freely. The new and classical designs have percentage of magnetoresistance effect about 20% at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, temperature 300K at magnetic field 3 Tesla when classical one has metal space about 10 μm . The new design one is easier design than the classical series resistance and has no effect of metal space. Parameters which are used in this experiment are silicon and gallium arsenide at doping concentration 2×10^{14} , 2×10^{15} and 2×10^{16} at temperature 200, 250 and 300K with Sentaurus TCAD program simulation. The new design has the percentage of magnetoresistance effect much higher than the classical series resistance when it is designed with high mobility material, low doping concentration and low temperature.

Keywords- Magnetoresistance effect; Hall plate; TCAD

I. INTRODUCTION

Hall voltage arises because a charge-carrier travelling in magnetic field is subject to the so-called Lorentz force[1] which appears carrier deflection[2]-[3]. Hall voltage and carrier deflection in magnetic field causes a change in the total resistance of the Hall plate. This is called the magnetoresistance effect[4]-[5]. The magnetoresistance effect is slightly changed on Hall plate structure. It can be increased when the new design gives the length of Hall plate much shorter than the classical one. The Hall voltage is reduced that appears more the carrier deflection. This effect applied Hall plate structure by using series resistance for increase to change total resistance with magnetic field. However, this design has disadvantage about space of aluminum which Hall voltage is up raising and resists carrier deflection when the aluminum space is so wide. The new design on Hall plate is designed with rectangular aluminum ring surrounding on Hall plate which creates zero Hall voltage area to affect the carriers move and deflect freely[5]. The new design on Hall plate structure is easier way which reduces complexity of fabrication because it is not consider space of aluminum which is in series resistance structure. Therefore, magnetoresistance effect is more showed when it is in appropriate condition[7]-[8]. In this paper, we study parameters which contribute percentage of magnetoresistance effect of the new design on Hall plate by comparing with classical series resistance structure. The parameters which are used for simulation with TCAD [9] are the type of material, doping concentration and temperature.

II. DEVICE STRUCTURE

We study the parameters which contribute the magnetoresistance effect of the new design on Hall plate structure by comparing with series resistance on Hall plates at 0-3 Tesla magnetic field range with 1 voltage bias. Hall plate structure is n-type semiconductor by length 400 μm , width 100 μm and thickness 1.0 μm . Magnetic field applied perpendicular to the plane of the plate and current. The classical series resistance structure is Hall plate series which its width much longer than length. Hall voltage is reduced and does not fully balance the Lorentz force and appears carrier deflection. The series resistance design on Hall plates is separated by aluminums space 10 μm which aluminums have length 0.5 μm , width 100 μm and depth 0.5 μm shown in Fig. 1.

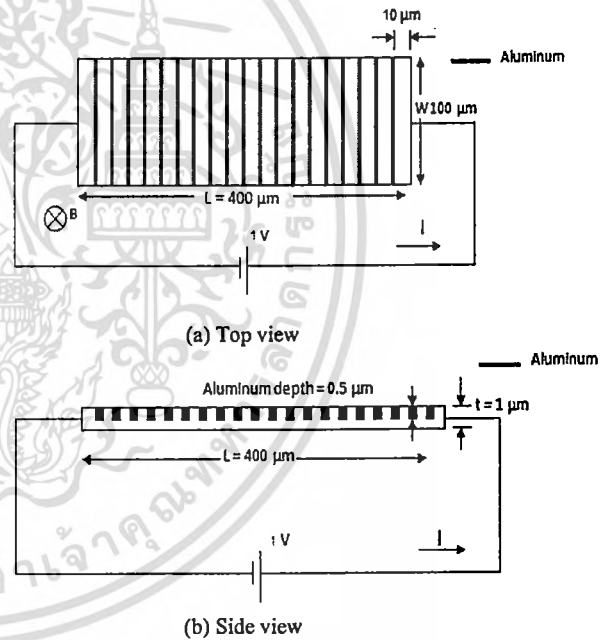


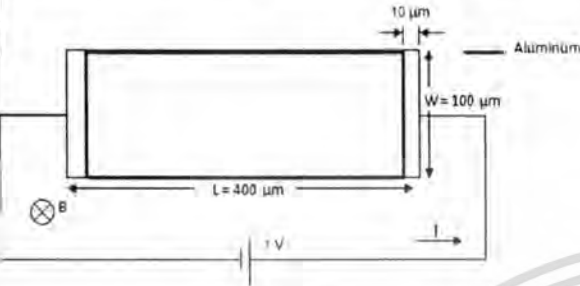
Fig.1 Magnetoresistance effect series design on Hall plate structure

The series resistance structure has disadvantage about space width of aluminum which affects to magnetoresistance. The new design on Hall plate is designed with rectangular aluminum ring surrounding on Hall plate which solves Hall voltage between aluminum spaces. It has aluminum distance from contact 10 μm and depth 0.5 μm which is shown in Fig. 2. New design is easier way and reduces complexity of fabrication because it is not consider space of aluminum. Both classical and new design have 20% of magnetoresistance effect at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 300K at magnetic

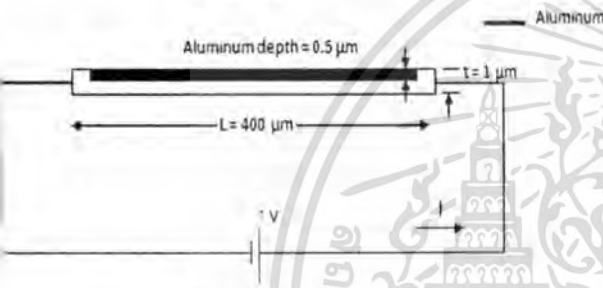
Tesla. It shows that the new design can replace the al series resistance. However, the new design can show magnetoresistance effect when it is in appropriate on. Percentage of magnetoresistance effect can be in Eq. (1)

$$\%MR(H) = \% \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H) - R(H=0)}{R(H=0)} \times 100\% \quad (1)$$

R(H) is the two-terminal resistance at magnetic field



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 2 The new design on Hall plate structure

III. SIMULATION AND RESULTS

I-V characteristic was measured on Hall plate structureoltage bias of the both designs. Figure 3 shows the ring of the percentage of magnetoresistance effect of the sign which has 10μm aluminum distance from contact e series resistance which has aluminum space 10μm.

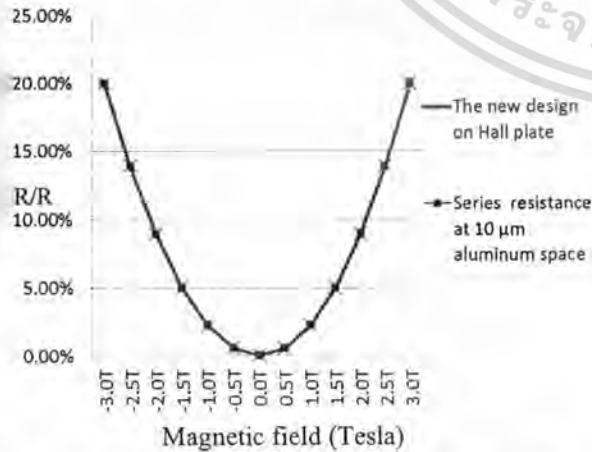


Fig. 3 Percentage of magnetoresistance effect with both designs

Both designs have percentage of magnetoresistance effect about 20% at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 300K at magnetic field 3 Tesla. Figure 4. show current line of the new design at 0 and 3 tesla magnetic field. Figure 4(a) is the case of no magnetic field at 1 voltage bias, current $85.8 \mu\text{A}$, resistance 11.5 kΩ. Current line in horizontal has no deflection of carriers beside nearly rectangular aluminum ring appears some carriers deflection. Fig. 4(b) is the case of magnetic field 3 Tesla at 1 voltage bias, current $71.5 \mu\text{A}$, resistance 13.9 kΩ. Current line in horizontal is fully deflected in rectangular aluminum ring area by Lorentz's force. The rectangular aluminum ring area shorts Hall voltage around Hall plate which effects the Hall voltage is decreased.

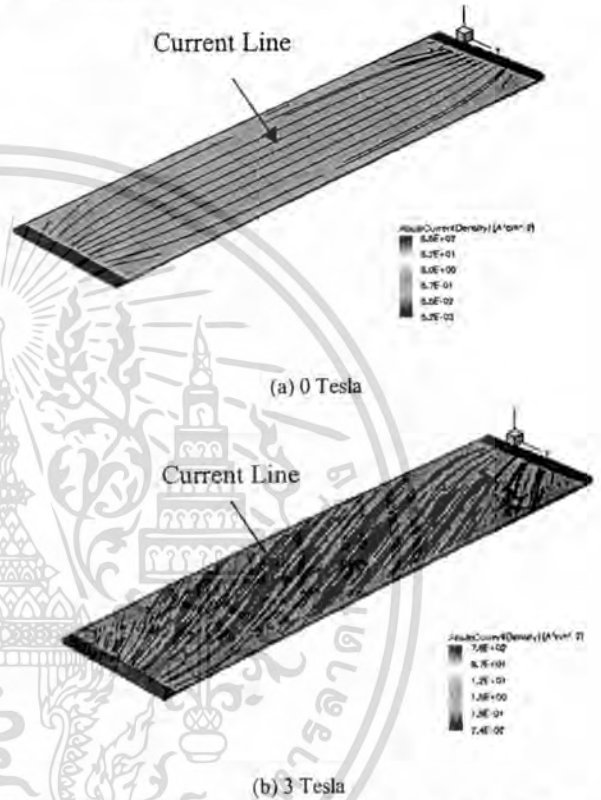


Fig. 4 Current line of the new design on Hall plate structure

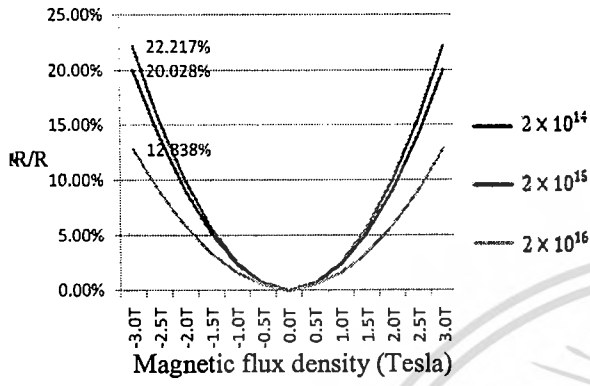
For Gallium arsenide substrate, it is similar to silicon substrate. The Gallium arsenide case while no magnetic field at 1 voltage, the current is $497.0 \mu\text{A}$ with the resistance 60.4 kΩ. At 3 Tesla magnetic field the current is $73.6 \mu\text{A}$ with the resistance 407.5 kΩ. However, magnetoresistance can increase when it is appropriate condition. The parameters which are used for simulation are the doping concentration, type of material and temperature for contributing magnetoresistance effect of the new design.

Doping Concentration

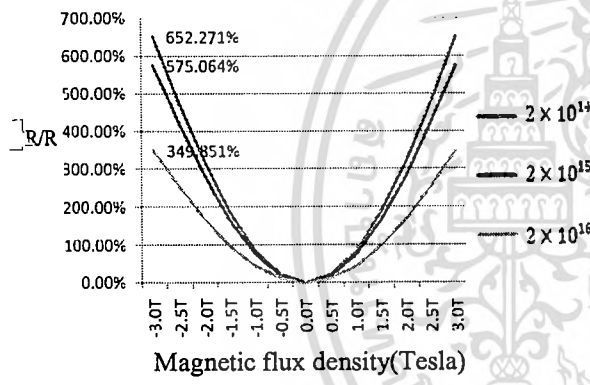
In simulation, we study magnetoresistance effect of doping concentration between silicon and Gallium arsenide with differential doping concentration at temperature 300K. Figure 5(a) shows magnetoresistance of new design on silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ate at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ which are 22.217%, 20.028% and 12.838% at 3 Tesla, respectively. Figure 5(b) shows magnetoresistance effect of new design on Gallium arsenide Hall plate at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ which are 2.271%, 575.064% and 349.851% at 3 Tesla, respectively. Silicon and GaAs Hall plate show that at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ have more magnetoresistance effect than $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.



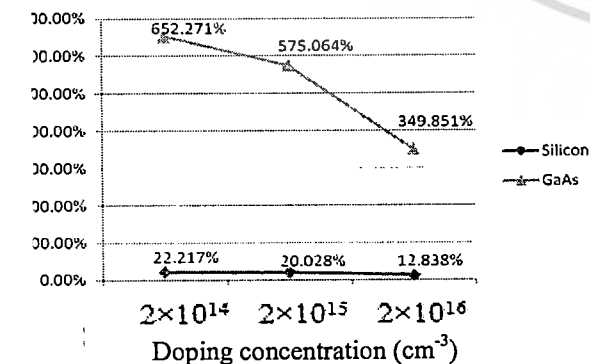
(a) Silicon



(b) Gallium arsenide

Magnetoresistance effect at 300K with the doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ of new design.

Material types between Silicon and Gallium arsenide

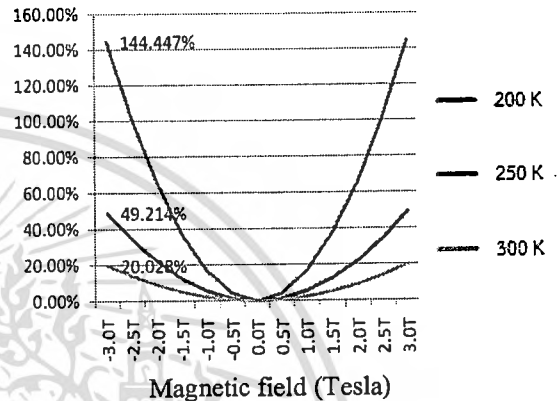


6. Comparing of magnetoresistance effect of silicon and Gallium arsenide of the new design at 3 Tesla.

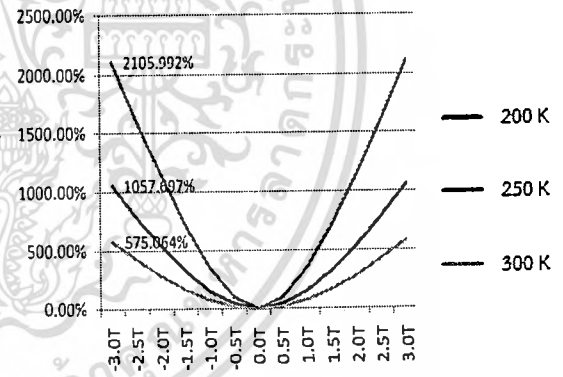
We study percentage of magnetoresistance effect of material between silicon and Gallium arsenide at temperature 300K. Figure 6 shows percentage of magnetoresistance effect of Gallium arsenide more than silicon which is 630.054%, 555.036% and 337.013% at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at 300K, 3 Tesla magnetic fields, respectively.

Temperature dependence

Figure 7 shows magnetoresistance effect of silicon and Gallium arsenide Hall plate at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ at temperature 200, 250 and 300K.



(a) silicon



(b) GaAs

Figure 7. Magnetoresistance effect at temperature 200, 250 and 300K at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ of new design

Figure 7(a) shows percentage of magnetoresistance effect of silicon Hall plate at temperature 200, 250 and 300K which has 144.447%, 49.214% and 20.028% at 3 Tesla, respectively. Figure 7(b) shows magnetoresistance effect of Gallium arsenide Hall plate at temperature 200, 250 and 300K which has 2105.992%, 1057.697% and 575.064% at 3 Tesla. Both silicon and GaAs Hall plate show that at low temperature at 200K has magnetoresistance effect more than at high temperature 250K and 300K.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERCENTAGE OF MAGNETORESISTANCE EFFECT OF CLASSICAL SERIES RESISTANCE DESIGNS

Parameters which contribute magnetoresistance effect of the new design on Hall plate structure is comparing to series resistance structure. Parameters which are used in this experiment are silicon and gallium arsenide at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at temperature 200, 250 and 300K. The series resistance structure percentage of magnetoresistance which is shown in table I.

PERCENTAGE OF MAGNETORESISTANCE EFFECT OF THE CLASSICAL SERIES RESISTANCE.

Temp (K)	Doping concentration		
	$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
200	160.036%	144.140%	91.957%
250	54.552%	49.170%	31.180%
300	22.193%	20.010%	12.823%
200	1977.459%	1694.060%	1040.028%
250	1109.930%	989.762%	663.523%
300	620.538%	567.956%	345.170%

COMPARING PERCENTAGE OF MAGNETORESISTANCE EFFECT OF BOTH DESIGNS

The new design has the percentage of magnetoresistance which is higher than the series resistance about 0.02% at doping concentration $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 300 K at 3 tesla magnetic field shown in table II.

PERCENTAGE OF MAGNETORESISTANCE EFFECT OF NEW DESIGN WHICH IS HIGHER THAN CLASSICAL SERIES RESISTANCE.

Temp (K)	Doping concentration		
	$2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
200	1.13%	0.31%	0.04%
250	0.11%	0.05%	0.03%
300	0.02%	0.02%	0.01%
200	906.27%	411.93%	234.52%
250	143.16%	67.93%	32.05%
300	31.73%	7.11%	4.68%

Table II shows that the new design has higher percentage of magnetoresistance than series resistance at all condition. The Hall plate of new design has to change less than GaAs material which is 0.01% - 1.13% for silicon and 4.68% -

906.27% for GaAs at doping concentration $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at temperature 200, 250 and 300K. The new design on Hall plate structure has changed the most when it is built GaAs at $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ doping concentration, 200K.

VI. CONCLUSION

The new design can contribute magnetoresistance effect on Hall plate structure. This design used rectangular aluminum ring is surrounding on Hall plate which makes zero Hall voltage. The new design is easier design than the classical series resistance because it does not consider the distance of aluminum space affects to magnetoresistance. The parameters which contribute to magnetoresistance effect of the new design on Hall plate structure are material type, doping concentration and temperature at magnetic field range 0-3 Tesla. New design has percentage of magnetoresistance effect at $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ doping concentration more than at $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at temperature 300K and shows that at low temperature has percentage of magnetoresistance effect more than high temperature. However, the new design has the percentage of magnetoresistance effect much higher than the classical series resistance when it is designed with high mobility material, low doping concentration and low temperature shown in table II.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to National Research Council of Thailand for financial support.

REFERENCES

- [1] M. Epstein (1967), "Hall effect devices," IEEE Trans, Magn. 3,352-359.
- [2] S. Middelhoek, S.A. Audet "Silicon Sensors" Department of Electrical Engineering, Delft University of Technology, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.202-213.
- [3] Newsome J P 1983 "Determination of the electrical characteristics of Hall plates" Proc. IEEE 110 653-659
- [4] Decimal classification R282.12. Original manuscript received by the Institute, "Proceedings of the I.R.E. Hall Effect OLOF Lindberg", pp.1414-1419
- [5] Wieder H H 1971 "Hall Generators and Magnetoresistors" (London: Pion) pp 30-32
- [6] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai "The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" ECTI 2012"
- [7] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai "A Simulation of Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" Siam physics congress 2012"
- [8] Michael P. Delmo, Shinpei Yamamoto, Shinya Kasai, Teruo Ono, and Kensuke Kobayashi "Large positive magnetoresistive effect in silicon induced by the space-charge effect" Vol 457, 26 February 2009, doi:10.1038/nature07711
- [9] TCAD Sentaurus Manual, Synopsis, Version A-2007