

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์
ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส
Split-current Magnetic resistor



RdH
๗ ๗๗1๗
255๖

b. 12๗00๗33
i.

เลขหมู่
เลขทะเบียน 137830
วันเดือนปี - 6 ค.ศ. 2558

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้
ประจำปีงบประมาณ 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการเอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในการวิจัยต้นแบบ และศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ นายประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล ในการสร้างอุปกรณ์

สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงแก่ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือเป็นกัลยามิตรไม่ว่าโดยตรงหรือโดยอ้อมก็ตาม อาทิเช่นคณะกรรมการพิจารณาให้ทุนสนับสนุน เป็นต้น และหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนการวิจัยในโอกาสต่อไป



ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ).Split-current.Magnetic.resistor

แหล่งเงิน.เงินรายได้ประจำปี.2556.....

ประจำปีงบประมาณ.....2556.....

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

.....รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล (หัวหน้าโครงการ).....

.....สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....

.....คณะวิศวกรรมศาสตร์.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

คำสำคัญ (Keywords).Magnetoresistance, Current mode Hall Effect, Nonmagnetic Material.....

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้นำเสนอความต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมดกระแส โดยโครงสร้างเป็นแบบตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบวัสดุซิลิคอนที่เป็นตัวต้านทานอนุกรมกัน แต่มีขั้วของตัวต้านทานด้านหนึ่งแยกเป็นสองขั้วที่สมมาตรกัน ผลการตอบสนองจะอยู่ในรูปค่าความแตกต่างของกระแสแทนค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อที่จะให้อุปกรณ์สามารถทำงานกับวงจรประมวลผลในรูปกระแสที่มีค่าแรงดันต่ำได้โดยตรง การทำงานใช้ปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านกระแสจะเหนี่ยวนำแรงกระทำต่อพาหะเกิดการเลี้ยวเบนกระแสขึ้น ค่าความไวจะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนความต้านทานที่อนุกรมแต่จะขึ้นกับแรงที่เหนี่ยวนำแทนเพราะผลของการที่นำเอาเอาท์พุทออกมาในรูปผลต่างกระแสแทนการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ทำให้ค่าความต้านทานของอุปกรณ์กับค่าความต้านทานของอุปกรณ์ไม่ขึ้นกันโดยตรงมากนัก ทำให้สามารถเลือกใช้ค่าความต้านทานได้อิสระจากค่าความไวของอุปกรณ์ นอกจากนี้แล้วอุปกรณ์นี้ยังสามารถตรวจจับทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ซึ่งตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กไม่สามารถทำได้ จากการศึกษาโครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสสามารถที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบโหมดการทำงานแบบกระแส

Abstract

This project presents the magnetic resistor that detects the magnetic field in current mode. The structure is the silicon (nonmagnetic material) series resistor that split one terminal into two symmetry terminals. The output is in the form of current difference of the two symmetry terminals rather than changing resistance for operating directly with the low voltage current mode circuit. The operating principle is Hall Effect that magnetic field pass-through the current induces the force acting to current carrier. The sensitivity is not directly dependent with the number of series resistor but depend on the magnetic density because of the form of the current difference output. Moreover, it can also detect the direction of magnetic field but normally magnetic resistor cannot. From the studying, this device can detect magnetic field in current mode of operation.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	ix
สารบัญรูป.....	x
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.2 เซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบโครงสร้างฮอลล์เพลต (Hallplate sensor).....	13
2.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect).....	15
2.3.1 Physical magnetoresistance effect.....	15
2.3.2 Geometrical magnetoresistance effect.....	16
2.4 พารามิเตอร์ที่มีช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์.....	18
2.4.1 ผลของการชนกัน.....	19
2.4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่มีผลต่อความคล่องตัวของพาหะ.....	21
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.....	27
3.2.1 Sentaurus Workbench.....	27
3.2.2 Sentaurus Process	28
3.2.3 Sentaurus Structure Editor.....	29
3.2.4 Sentaurus Device.....	31
3.2.4.1 File.....	31
3.2.4.2 Electrode.....	32
3.2.4.3 Physics.....	33
3.2.4.4 Plot.....	33
3.2.4.5 Solve.....	34
3.2.5 Tecplot SV.....	34
3.2.6 Inspect.....	35
3.3 การจำลองแบบการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดย TCAD.....	35
3.3.1 ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	36
3.3.1.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท.....	36
3.3.1.2 การกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า.....	37
3.3.1.3 การแบ่งกริด(grid) ให้กับตัวอุปกรณ์.....	37
3.3.1.4 โครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ.....	38
3.3.2 การจำลองแบบการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท	38
3.3.2.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท.....	39
3.3.2.2 สร้างลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน โครงสร้างฮอลล์เพลท.....	39
3.3.2.3 กำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม.....	39
3.3.2.4 การแบ่งกริด(grid) บนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้าง ฮอลล์เพลท.....	40
3.3.2.5 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทใน การจำลองแบบ.....	41
3.3.3 การออกแบบตัวต้านทานแบบแยกกระแสโครงสร้างอนุกรมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลองตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส.....	44
4.1 ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบอนุกรมค่าความต้านทาน.....	44
4.2 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวต้านทานแบบอนุกรมความต้านทาน.....	46
4.3 ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส.....	50
บทที่ 5 การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์.....	54
5.1 ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer cleaning).....	54
5.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process).....	54
5.2.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation).....	54
5.2.2 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation).....	55
5.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process).....	55
5.4 การกัด (Etching).....	57
5.5 การลอกชั้นไวแสงออกจากแผ่นผลึก.....	57
5.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion).....	58
5.6.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....	58
5.6.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....	59
5.7 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization).....	60
5.8 กระบวนการสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	62
5.8.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design).....	62
5.8.2 การสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	63
5.8.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well.....	64
5.8.2.2 ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+).....	65
5.8.2.3 ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม.....	66
5.8.2.4 ขั้นตอนการสร้างกัตชั้นโลหะ.....	67
5.9 กระบวนการสร้างแมกนีไตรีซิสแตนซ์แบบแยกกระแส.....	68
5.9.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design).....	68
5.9.2 การสร้างโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.9.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well.....	70
5.9.2.2 ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+).....	71
5.9.2.4 ขั้นตอนการสร้างกัณฑ์โลหะ.....	73
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก (ก) คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ.....	79
ภาคผนวก (ข) ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	5
2.2 การเบี่ยงเบนของ (ก) อิเล็กตรอน (ข) โฮล ในฮอลล์เพลทซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง z.....	7
2.3 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค (n_i).....	9
2.4 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์.....	13
2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง (ก).มุมมองด้านบน และ (ข).ภาคตัดขวาง.....	14
2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน (ก).มุมมองด้านบน และ (ข). ภาคตัดขวาง.....	15
2.7 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect.....	16
2.8 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect.....	16
2.9 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s)	17
2.10 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสแตนซ์ (ก) แบบวงกลม (ดิสก์) และ (ข) แบบอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนฮอลล์เพลท.....	17
2.11 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	18
2.12 แสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆในผลึกสารของแข็ง เมื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำและมีการชนกับแลททิซ.....	20
2.13 การเปลี่ยนแปลงสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่างๆกัน.....	22
2.14 แสดงค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ (ก). ซิลิคอน (ข) แกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือความเข้มข้นค่าต่างๆที่ 300 K.....	23
3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง.....	26
3.2 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD.....	26
3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	27
3.4 แสดงโปรแกรมการจำลองแบบส่วนต่างๆใน Sentaurus Workbench.....	28
3.5 แสดงส่วนของการอิมพลานเทชันใน Sentaurus Process.....	28
3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor	29
3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน.....	30
3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด	30
3.9 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV.....	34
3.11 แสดงหน้าต่างในส่วนของ Inspect.....	35
3.12 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD.....	36
3.13 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD.....	37
3.14 แสดงการแบ่งกริดบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	37
3.15 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองการทำงาน.....	38
3.16 แสดงผลลวดลายอะลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม.....	39
3.17 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมจากการ จำลองแบบ TCAD.....	40
3.18 แสดงการแบ่งกริดของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	40
3.19 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	41
3.20 ภาพด้านบนโครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสโครงสร้างแบบ อนุกรมบนฮอลล์เพลท.....	42
3.21 ภาพด้านข้างโครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสโครงสร้างแบบ อนุกรมบนฮอลล์เพลท.....	42
3.22 แสดงแบบจำลองโครงสร้างแบบสามมิติของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบ แยกกระแส.....	43
4.1 ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างอนุกรมค่าความต้านทาน.....	45
4.2 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและคัทที่เท่ากันในแนวตั้งของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก แบบอนุกรม.....	46
4.3 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนท์กับความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน บนฐานรองซิลิคอน.....	47
4.4 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างของอะลูมิเนียมของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบน โครงสร้างซิลิคอนฮอลล์เพลท.....	50
4.5 โครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส.....	51
4.6 วงจรการวัด.....	51
4.7 ผลของเส้นกระแสของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส.....	52
4.8 ผลตอบสนองของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสที่ค่ากระแส 0.5mA และ 1 mA.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด.....	56
5.2 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนพื้นผิวฐานรองด้วยการหมุน.....	57
5.3 แสดงลักษณะของสารเจือที่ได้จากกระบวนการแพร่สารเจือ.....	58
5.4 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก.....	60
5.5 กระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation).....	61
5.6 มาส์คต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวม.....	63
5.7 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างป้อ n-well.....	64
5.8 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น p^+	65
5.9 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกและลวดลายที่ต้องการ.....	66
5.10 แสดงขั้นตอนกระบวนการกัดชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก.....	67
5.11 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	68
5.12 มาส์คต้นแบบกระบวนการสร้างการใช้วงแหวนลุ่มิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท.....	69
5.13 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างป้อ n-well.....	70
5.14 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น p^+	72
5.15 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก.....	72
5.16 แสดงขั้นตอนกระบวนการกัดชั้นโลหะเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายที่ต้องการ.....	73
5.17 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ของวัสดุ 2 ชนิดที่ความเข้มข้นสารเจือ $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน ของการอนุกรมค่าความต้านทานบนโครงสร้างฮอลล์เพลท.....	48
4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์กับระยะห่างของอคูมิเนียม.....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

แมกเนตริกซิสเตนซ์ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแบ่งได้ตามวัสดุได้แก่ประเภทที่ใช้สารแม่เหล็กกับประเภทที่ไม่ใช้สารแม่เหล็ก ประเภทที่ใช้สารแม่เหล็กมีการใช้งานและวิจัยอย่างกว้างขวางเพราะมีค่าการเปลี่ยนตัวต้านทานกับสนามแม่เหล็กที่สูง ส่วนประเภทที่ไม่ใช้วัสดุแม่เหล็กโดยมากเป็นสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่ต่ำและไม่เป็นที่นิยมเท่ากับแบบแรก หลักการที่ใช้กับวัสดุที่ไม่ใช่วัสดุแม่เหล็กอาศัยการเบี่ยงเบนกระแสจากแรงลอเรนซ์ หรือใช้หลักการฮอลล์ในโหมดกระแสแทนแรงดัน ค่าความต้านทานแบบนี้จะมากขึ้นเมื่อวัสดุมีค่าโมบิลิตี้สูง และมีติและรูปร่างตัวต้านทานมีความเหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานยังอยู่ในรูปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงทำให้เซนเซอร์ประเภทนี้มีข้อต่ออย่างมากเมื่อเทียบกับประเภทแรก

ผู้วิจัยได้เคยวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กที่มีโครงสร้างเป็นทรานซิสเตอร์และไดโอดที่ใช้กลไกการเบี่ยงเบนกระแส ผลที่ได้แสดงค่าความเป็นเชิงเส้นที่ดี แต่โครงสร้างที่ทำมีความซับซ้อนกว่าโครงสร้างความต้านทาน ตัวต้านทานที่ใช้หลักการการเบี่ยงเบนกระแสจากวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กที่เป็นสารกึ่งตัวนำเมื่อเทียบประสิทธิภาพในรูปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงมีค่าต่ำที่สนามแม่เหล็กค่าน้อยๆ แต่ยังไม่มีการนำมาใช้งานในรูปการตรวจจับสนามแม่เหล็กในรูปความแตกต่างของกระแส การใช้งานในรูปแบบนี้จะทำให้ข้อต่อของอุปกรณ์นี้หมดไป เพราะเป็นการใช้งานหลักการการเบี่ยงเบนกระแสโดยตรงไม่ใช่โดยอ้อมที่อยู่ในรูปค่าความต้านทาน ปกติการออกแบบค่าความต้านทานแบบนี้มิติของอุปกรณ์มีผลต่อค่าความต้านทานของอุปกรณ์โดยตรง แต่เมื่อนำการเบี่ยงเบนกระแสมาเป็นเอาท์พุทโดยตรงทำให้ค่าความต้านทานของอุปกรณ์กับค่าเอาท์พุทความแตกต่างของกระแสไม่ขึ้นแก่กันโดยตรงโดยที่ค่ามุมการเบี่ยงเบนจะขึ้นตรงกับมุมความเข้มสนามแม่เหล็ก

วงจรรวมแบบอนาล็อกแรงดันต่ำกินพลังงานต่ำมีการทำงานในโหมดกระแสเป็นหลัก เมื่อพิจารณาการใช้งานร่วมกันอุปกรณ์ที่ใช้งานในโหมดความแตกต่างของกระแสจะใช้งานได้โดยตรงและมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่าการใช้งานผ่านค่าความต้านทาน ทำให้อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบตัวต้านทานที่ใช้การเบี่ยงเบนกระแสที่ออกแบบให้ทำงานโหมดกระแสมีความเหมาะสมยิ่งขึ้นเป็นอย่างมาก เพราะมีโครงสร้างที่ง่ายในการออกแบบและสร้าง สามารถเลือกค่าความต้านทานที่ต้องการโดยไม่มีผลต่อเอาท์พุทที่เป็นความแตกต่างของกระแสมีการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นและสามารถสร้างออกแบบและสร้างไปกับวงจรรวมได้เลยเพราะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันโดยที่แมกเนตริกซิสเตนซ์แบบสารแม่เหล็กทำได้ยากกว่าแม้จะให้เอาท์พุทในรูปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าก็ตาม

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรรวมมีการพัฒนาให้มีการกินพลังงานต่ำและมีค่าแรงดันไฟเลี้ยงที่ลดลง ส่งผลให้วงจรรวมบางประเภทเช่นวงจรรวมแบบอนาล็อกมีการประมวลผลในรูปกระแสแทน โดยอาศัยหลักการหลีกเลี่ยงค่าแรงดันที่จำกัดจึงต้องนำค่ากระแสที่ไม่จำกัดมาประมวลเป็นสัญญาณ ดังนั้นอุปกรณ์ที่อยู่ในรูปการทำงานโหมดกระแสจึงมีความเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับวงจรรวมประเภทนี้ โครงการวิจัยนี้ต้องการที่จะออกแบบและสร้างอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโหมดการทำงานแบบ

กระแสนี้ยังไม่มีขึ้นมา อุปกรณ์นี้สามารถสร้างพร้อมวงจรรวมแบบโหมดกระแส และยังคงสามารถใช้เป็นอุปกรณ์เดี่ยวที่ต่อกับวงจรทั่วไปภายนอกได้ และสามารถเลือกใช้งานได้ทั้งโหมดกระแสและแรงดันตามความต้องการของผู้ใช้ได้อีกด้วย

อุปกรณ์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นสำหรับระบบการวัดทุกชนิด ซึ่งแบ่งได้หลายประเภทตามประเภทของปริมาณที่ทำการวัด อุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กและมีอยู่หลายประเภทเช่นเดียวกัน ประเภทที่มีความนิยมมากได้แก่อุปกรณ์ฮอลล์ และแมกเนติกคริสตัลแดนซ์หรือตัวต้านทานที่แปรค่าตามความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในโหมดการทำงานแบบแรงดัน ส่วนแมกเนติกคริสตัลแดนซ์แบ่งเป็นประเภทใหญ่ได้สองประเภทได้แก่ประเภทที่ใช้สารแม่เหล็ก และประเภทที่ไม่ใช้สารแม่เหล็ก ประเภทที่ใช้สารแม่เหล็กอาศัยหลักการทิศทางของโดเมนแม่เหล็กที่อยู่ในสารแม่เหล็กมีผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแส การควบคุมทิศทางโดเมนแม่เหล็กเกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่ตรวจจับทำให้ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง แมกเนติกคริสตัลแดนซ์ประเภทนี้เป็นที่นิยมเพราะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่สูง สำหรับประเภทที่ไม่ใช้สารแม่เหล็กอาศัยหลักการฮอลล์ในโหมดกระแส คือให้กระแสเบี่ยงเบนตามความเข้มสนามแม่เหล็กแทนแรงดันฮอลล์ ทำให้ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามหลักการนี้จะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่น้อยกว่าประเภทแรกมาก การจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่สูงจะต้องใช้การออกแบบทางรูปทรงเรขาคณิตและจะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่าโมบิลิตีสูง แต่อย่างไรก็ตามแมกเนติกคริสตัลแดนซ์สามารถที่จะนำมาทำเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กในโหมดกระแส

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 สร้างนวัตกรรมจากองค์ความรู้ที่มีอยู่
- 2 พัฒนาบุคลากร นักศึกษาจากการวิจัยแบบพึ่งพิงตนเอง
- 3 สร้างองค์ความรู้ใหม่ ต่อยอดและประยุกต์ต่อองค์ความรู้เดิม
- 4 เผยแพร่ความรู้สู่สาธารณะในรูปบทความในวารสารนานาชาติ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. โครงสร้างแมกนีโตริซิสแดนซ์ที่ไม่ใช้วัสดุสารแม่เหล็กสามารถนำมาออกแบบให้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมดกระแส
2. การทำงานแยกเป็นอิสระระหว่างค่าตัวต้านทานกับค่าความไวของอุปกรณ์ซึ่งโครงสร้างแบบแมกนีโตริซิสแดนซ์แบบไม่ใช้วัสดุแม่เหล็กทำไม่ได้
3. อุปกรณ์นี้เหมาะสมสามารถนำไปใช้กับวงจรประมวลผลแบบกระแส

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

แมกเนติกคริสตัลแดนซ์สามารถใช้งานในโหมดกระแส หลักการเซนเซอร์ประเภทสารแม่เหล็ก
เอกสารสามารถทำได้โดยใช้โดเมนแม่เหล็กในเนื้อสารที่เปลี่ยนแปลงเป็นตัวขวางกันการเคลื่อนที่ของกระแส การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประเภทหลังใช้การหักเหของกระแสเป็นตัวเปลี่ยนค่าความต้านทาน การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับสนามแม่เหล็กก็มีค่าความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดี และหลักการเบี่ยงเบนกระแสแม่เหล็กจะมีค่าแรงดันตกคร่อมสูงทำให้ใช้งานในโหมดการทำงานแบบกระแสได้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์แบบการเบี่ยงเบนกระแสสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในรูปความแตกต่างของกระแสได้ซึ่งทำให้สามารถใช้งานในโหมดกระแสได้เป็นอย่างดีและความสัมพันธ์มุมเบี่ยงเบนของกระแสมีค่าเป็นเชิงเส้นสูงทำให้ค่าเอาต์พุตที่ได้มีความเป็นเชิงเส้นที่ดี

ในการวิจัยนี้เป็นการสร้างตัวต้านทานที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กในรูปกระแส โดยอาศัยการเบี่ยงเบนกระแสจากสนามแม่เหล็กภายนอกที่ตรวจจับ ตัวต้านทานนี้ใช้เป็นวัสดุประเภทที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กเป็นสารกึ่งตัวนำโดยตัวต้านทานด้านหนึ่งมีขั้วกระแสออกสองทางที่สมมาตรกัน โครงสร้างตัวต้านทานที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กนี้มีความแตกต่างจากตัวต้านทานธรรมดาที่สร้างทั่วไปซึ่งไม่สามารถนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ การออกแบบต้องการทำให้ค่าความต้านทานกับค่ากระแสเอาต์พุตเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กันทำให้ผู้ใช้สะดวกที่จะเลือกค่าความต้านทานที่เหมาะสมโดยไม่มีผลต่อเอาต์พุต การวิจัยนี้ต้องการศึกษาตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้อง เช่น โมบิลิตี ค่าความต้านทานกับค่ากระแสเอาต์พุต ค่ามิติของตัวต้านทานกับกระแสเอาต์พุต ค่าความไวของอุปกรณ์ การใช้งานในลักษณะนี้ทำให้ข้อดีของแมกเนตริกซิสแตนท์ประเภทที่ไม่ใช่สารแม่เหล็กที่เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทที่ใช้สารแม่เหล็กหมดไปไม่ว่าค่าเอาต์พุตและความเป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ สามารถสร้างกับวงจรรวมได้ เพราะเป็นสารกึ่งตัวนำ เป็นการนำอุปกรณ์ประเภทนี้มาใช้ในงานที่เหมาะสม

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 ออกแบบ จำลองแบบ และสร้างอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับแม่เหล็ก
- 2 ทดสอบ วัดผลการทดลองจากอุปกรณ์
- 3 สรุปผล เผยแพร่ผลงานในวารสารนานาชาติ

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1 ขั้นตอนแรกทำการออกแบบและจำลองแบบการทำงานจากโปรแกรมเฉพาะทางสำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นโปรแกรมมาตรฐานในอุตสาหกรรม โดยออกแบบ และศึกษาตัวแปร มิติที่เกี่ยวข้องและทำการจำลองแบบเบื้องต้น ขั้นตอนนี้จะศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพร้อมทั้งปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพที่สุด
- 2 นำสิ่งที่ได้ออกแบบในรูปแบบต่างๆ มาทำการสร้างในห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำแม่เหล็ก ขั้นตอนออกซิเดชัน โฟโตลิโธกราฟี การกัด การเคลือบโลหะ การแพร่สารเจือ การต่อขั้วไฟฟ้า
- 3 ทำการวัดทดสอบกับสนามแม่เหล็ก สรุปผล และเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI หรือ Scopus หรือ TCI และการประชุมวิชาการนานาชาติ

โดยเนื้อหาในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ

เป็นบทนำ ซึ่งกล่าวถึงวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนของการศึกษาสำหรับงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์และปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ คุณสมบัติทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับตัวต้านทานตรงจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส และแนวคิดในการจำลองการออกแบบ

บทที่ 3 โปรแกรมการจำลองแบบ Sentaurus TCAD และการจำลองแบบการทดลอง

กล่าวถึงเทคโนโลยี TCAD เบื้องต้นและการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม TCAD ในการออกแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

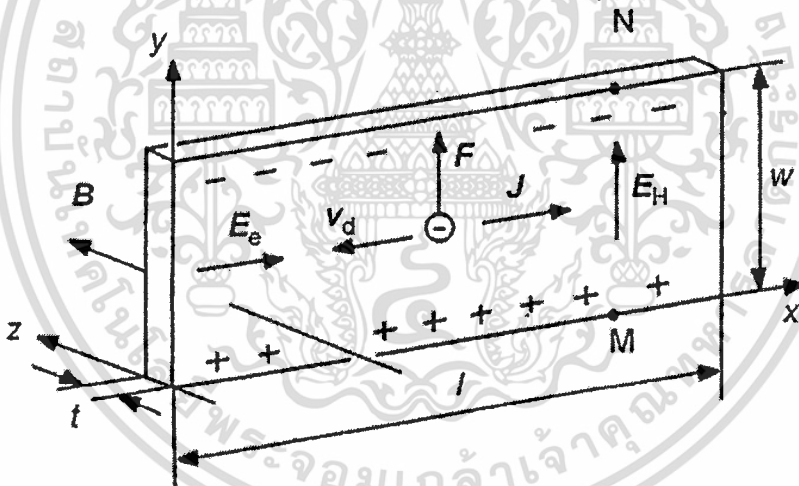
ผลการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์แบบแยกกระแสที่กระแสไบแอสและพารามิเตอร์ต่างๆ

บทที่ 5 การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์ใช้งาน

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง สรุปผลการทดลองทั้งหมดและข้อเสนอแนะต่างๆ

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 เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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

จากที่กล่าวก่อนหน้านี้อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟต์เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ (F_L) ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2

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

v_x คือ ความเร็วดริฟต์เฉลี่ยของประจุพาหะในทิศทาง x

อิเล็กตรอนจะถูกเบี่ยงเบนด้วยแรงลอเรนซ์ ในทิศทาง $+y$ ไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท ส่วนทิศทาง $-y$ ก็เกิดพาหะประจุอีกชนิดหนึ่งซึ่งก็คือโฮล สิ่งนี้จะสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์ขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้พาหะเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก สนามไฟฟ้าฮอลล์ในขณะนี้หาได้จากสมการที่ 2.3

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

ความหนาแน่นกระแส J_x คือ

$$J_x = nqv_x \quad (2.4)$$

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

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

คุณสมบัติสองข้างด้วยความกว้าง w ก็จะได้

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

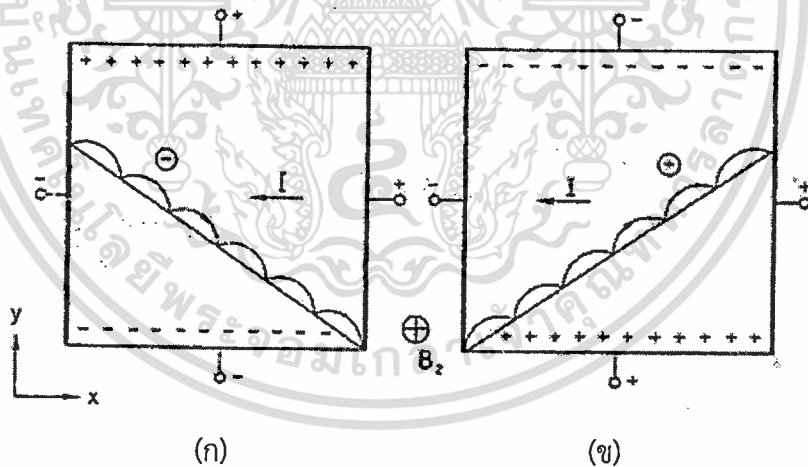
ดังนั้นแรงดันฮอลล์จะได้

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

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 โวลต์ก็เป็นพาหะนำไฟฟ้าอีกชนิดหนึ่งในสารกึ่งตัวนำ 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] แต่ผลการชนความเร็วของพาหะจะลดลงเป็นศูนย์และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วอีกครั้งด้วยผลของสนามไฟฟ้าในทิศทาง x และแรงลอเรนซ์ F_L ในทิศทาง y สำหรับสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีค่าเป็นบวกตามสมการที่ 2.9

ยชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การได้มาถึงสัมประสิทธิ์ฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างเข้มข้นสามารถหาได้จากที่กล่าวมา แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารชนิดอินทรีนซิกเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กพาทะประจุทั้งสองชนิดจะเบี่ยงเบนไปทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท เมื่อสนามไฟฟ้าฮอลล์สมดุลกับแรงลอเรนซ์จะทำให้กระแสไหลในทิศทางเดิมโดยไม่มีการเบี่ยงเบนอีก ซึ่งสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทาง y แสดงตามสมการที่ 2.10

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

เมื่อมีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift (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 อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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

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

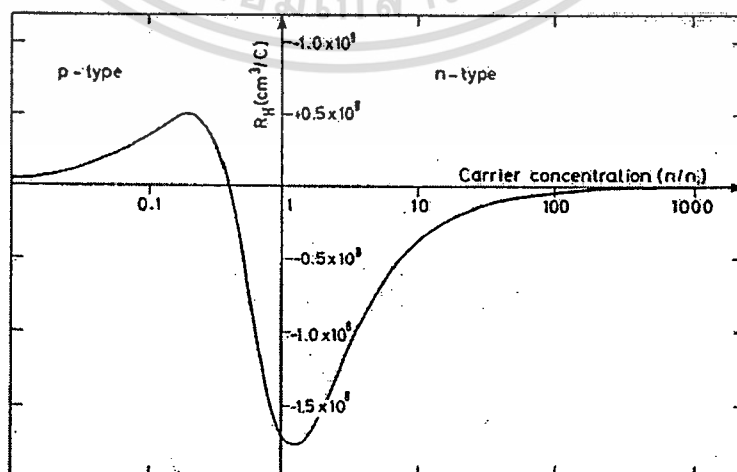
สำหรับวัสดุชนิดเอ็น ($n \gg p$) สัมประสิทธิ์ฮอลล์ $R_H = -1/nq$ (2.21)

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 แสดงให้เห็นว่าในที่สุดความเข้มข้นอะตอมสารเจือน้อยจะทำให้สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่มีค่าสูงขึ้นได้^[9]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.3 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (n_i) ใ้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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

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

จากสมการที่ 2.28 ความหนาแน่นของโฮลคือ

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

และสภาพต้านทานไฟฟ้า คือ

$$\rho = R \frac{w \cdot t}{l} = \frac{V}{I} \frac{w \cdot t}{l} \quad (2.30)$$

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

ในการทำงานเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าแรงดันฮอลล์ (R_H) จะมีค่าตรงข้ามกับกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือมีค่าเป็นลบ(-) 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีนี้ที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับแลตทิซ 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)

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

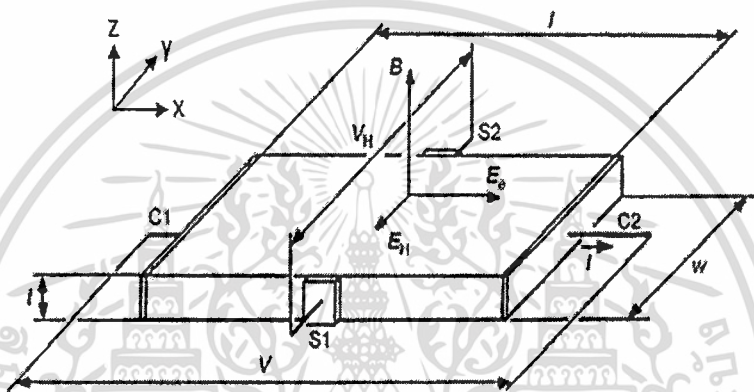
และ
$$\mu_{Hi} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.40)$$

เมื่อ μ_{Hi} คือ ค่าสภาพความคล่องตัวของฮอลล์ในกรณีพิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ

เอกสาร และ μ_p คือ ค่า Mobility ของโฮล ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 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 และสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา S1 กับ S2 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.41^[20]



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์

$$V_H = \frac{R_H \cdot G \cdot I \cdot B_z}{t} \quad (2.41)$$

โดยที่ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ G คือพารามิเตอร์โครงสร้าง t คือความหนาของอุปกรณ์ฮอลล์ B_z คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง

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

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

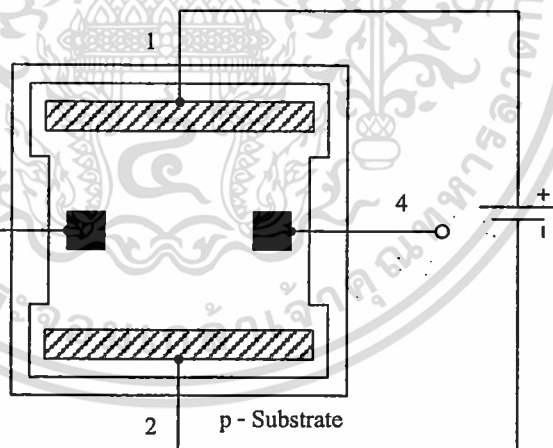
โดยที่ r_n คือ พารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameter)

จากสมการที่ 2.41 และ 2.42 แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์โครงสร้าง G จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันฮอลล์ โดยที่พารามิเตอร์โครงสร้าง G สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.43

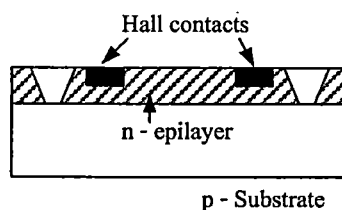
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งเนื้อหาและข้อมูลในเอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัทฯ และไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายขายของบริษัทฯ

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

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] ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์ โครงสร้างคือ ใช้ฐานรองชนิดพี และสร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และมีความหนาชั้นอิพิทาเซียระหว่าง $5 - 10 \mu\text{m}$ โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ $200 \times 200 \mu\text{m}$ สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิ (Epilayer) สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแวนอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แวนอน^[23]

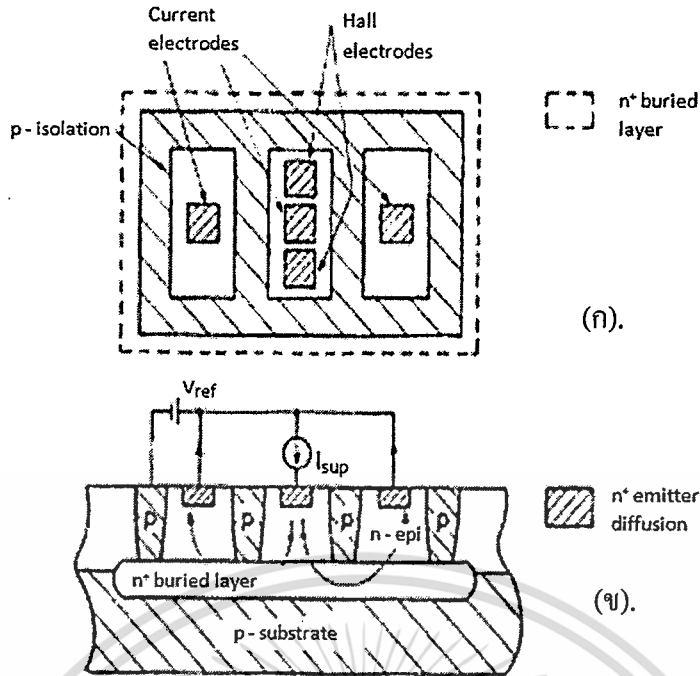


(ก).



(ข).

เอกสารนี้รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนดิง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวางในการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

โดยแสดงดังรูปที่ 2.6(ก) และ 2.6(ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรดออกเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ลักษณะแนวตั้ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์

2.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

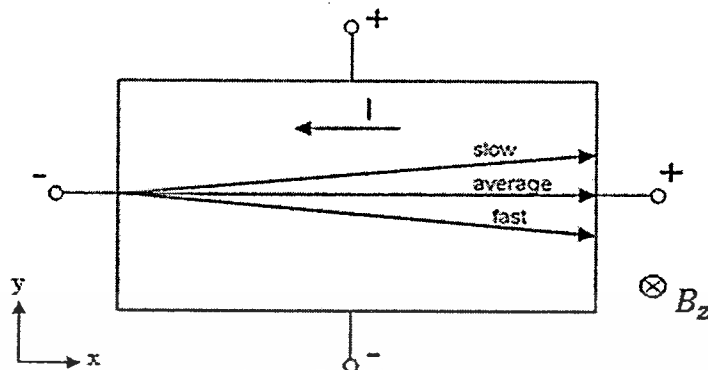
นอกจากปรากฏการณ์ฮอลล์ในโครงสร้างฮอลล์เพลท เรายังสามารถพบกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์คือ ปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของวัสดุมีค่าเปลี่ยนแปลงกับสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่กล่าวมานี้มีสาเหตุหลักๆอยู่ 2 สาเหตุคือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการกระจายความเร็วของประจุพาหะ หรือที่เรียกว่า (Physical magnetoresistance effect) และ การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่เกิดจากรูปร่างของตัวอุปกรณ์ หรือที่เรียกว่า (Geometrical magnetoresistance effect)

2.3.1) Physical magnetoresistance effect

จากที่กล่าวมาเป็นการสมมุติว่าพาหะประจุทั้งหมดมีการกระจายความเร็วที่เท่ากัน แต่ในความเป็นจริงไม่เป็นเช่นนั้นซึ่งในกรณีของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพาหะประจุจะมีการกระจายความเร็วขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงมีผลทำให้พาหะประจุมีแรงลอเรนซ์ที่ต่างกัน ในกรณีนี้พาหะประจุบางตัวแรงลอเรนซ์จะใหญ่กว่าแรงเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าฮอลล์แต่พาหะประจุบางตัวอาจไม่เป็นเช่นนั้น สิ่งนี้มีผลทำให้พาหะประจุบางตัวเกิดการเบี่ยงเบนขึ้นส่วนพาหะประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

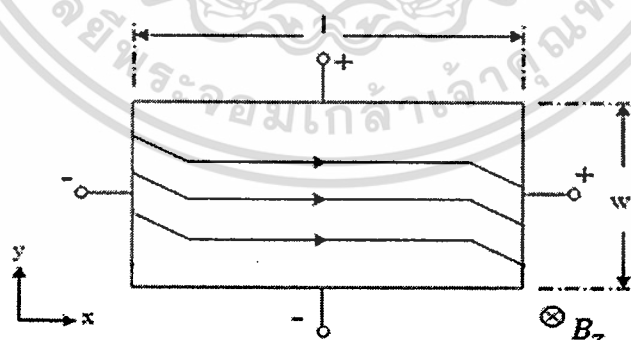
บางตัวเกิดการเบี่ยงเบนลงซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์นี้นำไปสู่ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขึ้นเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก^[9]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Physical magnetoresistance effect

2.3.2) Geometrical magnetoresistance effect

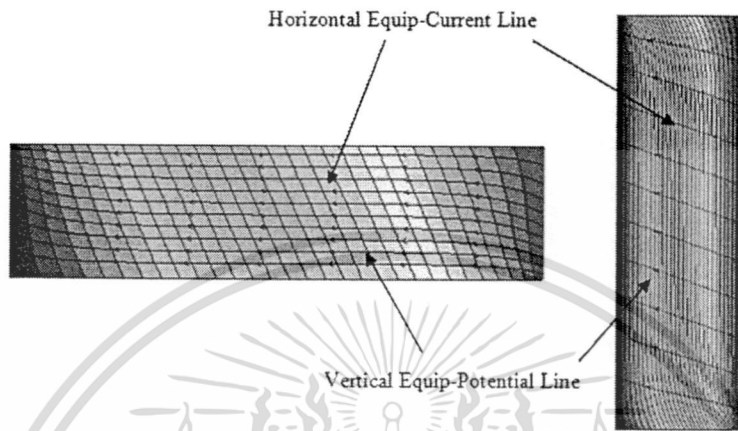
ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากโครงสร้างของฮอลล์เพลทที่เป็นแผ่นยาวโดยปกติจะมีความยาวมากกว่าความกว้างจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ขึ้น แรงดันฮอลล์ที่เหนี่ยวนำจะสมดุลกับแรงลอเรนซ์ อย่างไรก็ตามเมื่อออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีความกว้างมากกว่าความยาวจะมีผลทำให้แรงดันฮอลล์เพลทมีค่าลดลงและไม่สมดุลกับแรงลอเรนซ์ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบน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



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแสดงปรากฏการณ์ของ Geometrical magnetoresistance effect

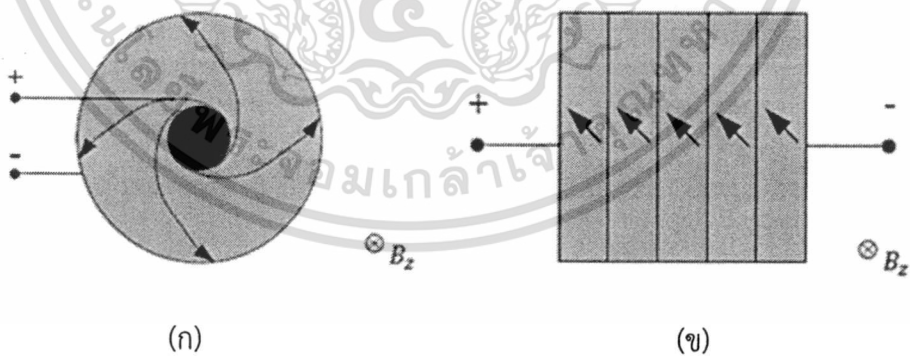
รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์และความหนาแน่นกระแสในฮอลล์เพลท จากตัวอย่างแสดงฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาวและขนาดสั้น ความหนาแน่นกระแสถูกแทนที่ด้วยเส้นกระแส (Equip-current lines) (เส้นตรงมีหัวลูกศร) และสนามไฟฟ้าฮอลล์ถูกแทนที่ด้วยเส้นศักย์ไฟฟ้า (Equip-potential lines) (เส้นตรงไม่มีหัวลูกศร) ในบริเวณตรงส่วนกลางของฮอลล์เพลท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้เพื่อประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีขนาดยาวเส้นกระแสยังคงไหลโดยไม่มี การเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งสังเกตได้จากเส้นศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ในแนวตั้งมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นดังรูป 2.9(ก) และในบริเวณส่วนกลางของแผ่นฮอลล์เพลทที่มีขนาดสั้นเส้นศักย์ไฟฟ้ายังคงขนาดเท่ากับหน้าสัมผัสไฟฟ้าซึ่งแสดงว่าไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นจึงทำให้เส้นกระแสเกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์ซึ่งสังเกตจากรูปที่ 2.9(ข)



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นกระแสและเส้นศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างฮอลล์เพลทที่มีขนาดยาว (l) และขนาดสั้น (s)

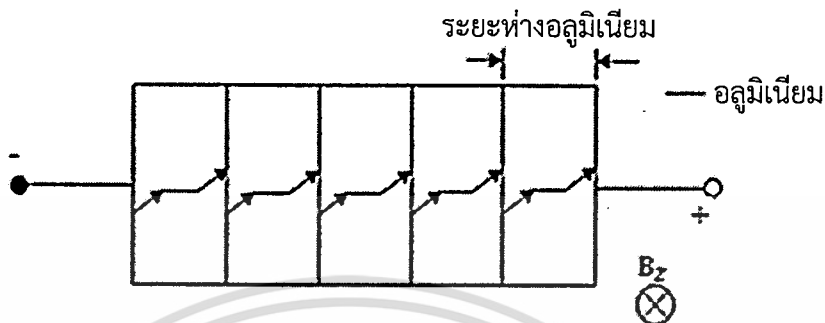
ซึ่งการทำให้ผลปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์มีค่ามากขึ้นจะต้องทำการออกแบบให้แรงดันฮอลล์มีค่าลดลงหรือไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นได้เพื่อให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์อย่างเต็มที่ ซึ่งมีสองวิธีดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10^[9]



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

จากรูปที่ 2.10(ก) แบบดิสก์จะมีวงกลมวงนอกและวงใน การออกแบบนี้มีผลทำให้ทิศทางของสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ไม่สามารถเกิดแรงดันฮอลล์ขึ้นมาได้ ส่วนอีกหนึ่งวิธีแสดงในรูปที่ 2.10(ข) เป็นการอนุกรมค่าความต้านทานรวมของฮอลล์เพลทโดยอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (l/w) มีค่าน้อยนำมาต่ออนุกรมกัน ส่งผลให้ไม่มีแรงดันฮอลล์เกิดขึ้นมาได้ทำให้พาหะ

เกิดการเบี่ยงเบนตามแรงลอเรนซ์เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กอย่างไรก็ตามโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่องการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมมีผลกระทบกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์ ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากรูปที่ 2.11 โดยถ้าช่องว่างของอลูมิเนียมมีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียมที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นในระหว่างช่องว่างของอลูมิเนียมได้ ซึ่งอาจส่งผลกับค่าแมกนีโตริซิสแดนท์ที่มีค่าลดลง โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการออกแบบโครงสร้างของฮอลล์เพลทแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อช่วยในเรื่องของการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากเกี่ยวกับระยะห่างดังกล่าว

2.4 พารามิเตอร์ที่มีช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนท์

จากที่กล่าวก่อนหน้านี้ว่าอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุเป็นลบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟท์เฉลี่ยผ่านทางฮอลล์เพลทเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์หาได้จากสมการที่ 2.2 จากสมการ เราพบว่าแรงลอเรนซ์จะแปรเป็นสัดส่วนกับความเร็วดริฟท์ของอิเล็กตรอน ซึ่งความเร็วดริฟท์ของอิเล็กตรอนแปรโดยตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้าตามสมการที่ 2.44

$$v = -\mu_n \cdot \mathcal{E}_x \quad (2.44)$$

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

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

ดังนั้นเรานิยามสภาพคล่องของพาหะได้ว่า ความเร็วของพาหะต่อหนึ่งหน่วยสนามไฟฟ้า และถูกเอกสารพิจารณาเป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าความคล่องตัวของพาหะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากของสารกึ่งตัวนำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะมันเป็นตัวบอกถึงว่าพาหะจะเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด ซึ่งภายในสารของแข็งประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซที่มีอยู่อย่างหนาแน่น อะตอมเหล่านี้จะเป็นอุปสรรคและขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะ ดังนั้นขณะที่พาหะเคลื่อนที่จึงเกิด “การชนกัน” (Collision) ระหว่างพาหะเช่นอิเล็กตรอนหรือโฮลกับอะตอม ซึ่งอาจเป็นอะตอมของสารกึ่งตัวนำเอง หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆก็ได้ การชนกันนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อเกิดการชนกันความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนมีค่าลดลงเป็นศูนย์ 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

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

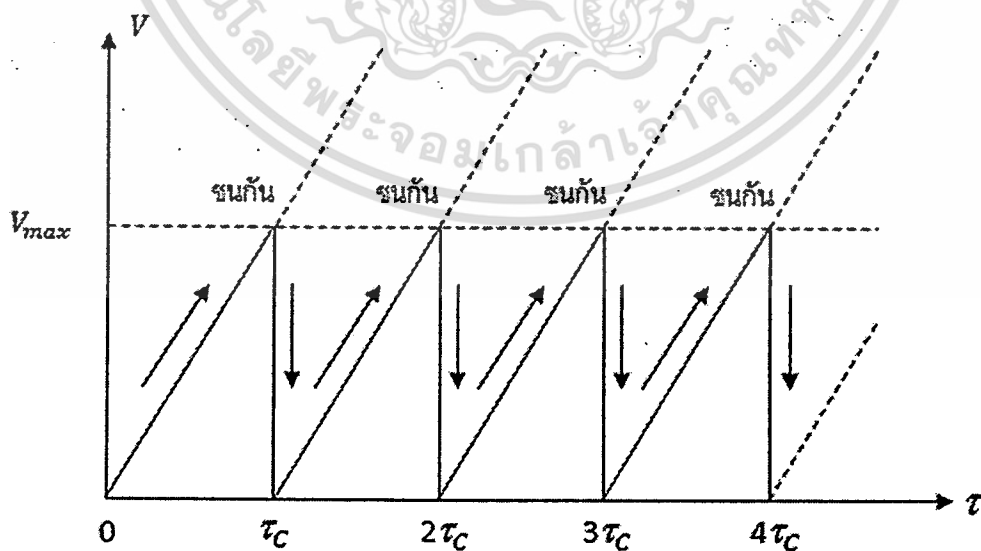
จากสมการที่ 2.46 แสดงว่า ถ้าสนามไฟฟ้า \mathcal{E} คงที่ จะทำให้มีแรงค่าคงที่กระทำต่ออิเล็กตรอนตลอดเวลา ความเร็วของอิเล็กตรอนจึงเพิ่มขึ้นกับเวลา หรือก็คือมีความเร่งเกิดขึ้นนั่นเอง เครื่องหมายลบในสมการ (2.46) แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า การสมมุติว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างอิสระ โดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆเข้ามาเกี่ยวข้องไม่สามารถนำมาใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะในสารของแข็งได้ เพราะโดยความเป็นจริงแล้วภายในโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการละเมิดลิขสิทธิ์ในบางประการ กรุณาแจ้งผู้ดูแลระบบหรือเจ้าของเอกสารทันทีหากพบการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ถูกต้องตามที่กำหนด หรือหากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้ดูแลระบบหรือเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยอะตอมหรือแลตทิซจำนวนมากมาย ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จึงทำให้มีการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับแลตทิซที่อยู่ตลอดเวลา 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

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

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} เนื่องจากการชนกันเกิดขึ้น^[24]



รูปที่ 2.12 แสดงความเร็วของอิเล็กตรอนที่เวลาต่างๆในผลึกสารของแข็ง เมื่อพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำและมีการชนกับแลตทิซเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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

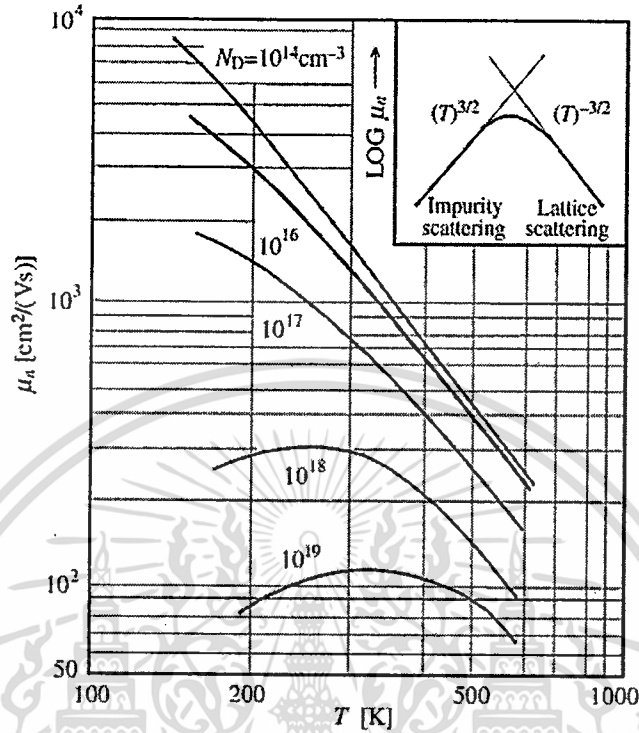
μ_L หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับแลตทิซ

μ_i หมายถึงสภาพคล่องเนื่องจากการชนกับอะตอมสารเจือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์

ลดลงและจะแปรผันกับ $T^{-3/2}$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นจึงต่างไปจากกรณีสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (หรือเมื่อมีอะตอมสารเจือน้อย)

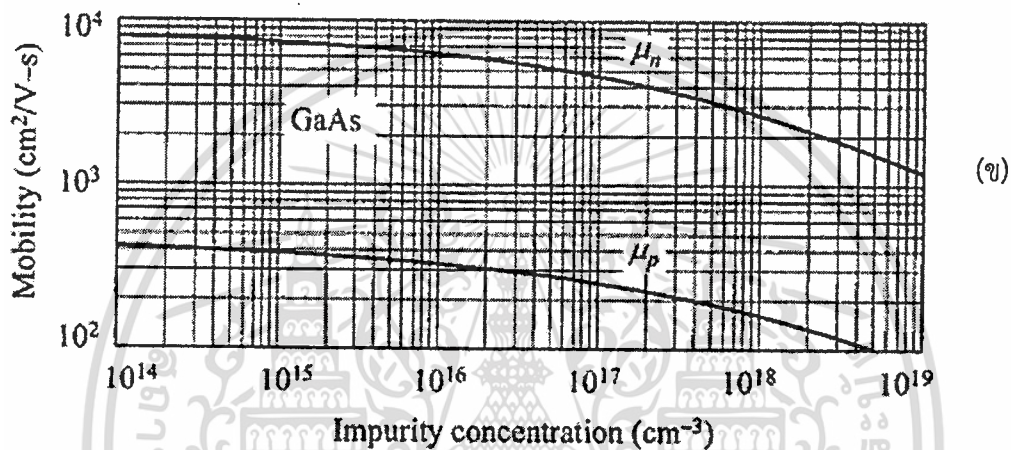
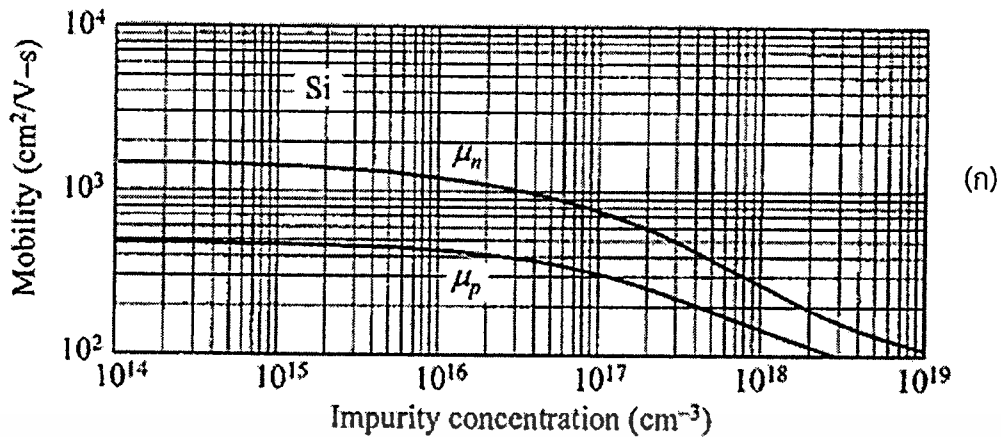


รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงสภาพคล่องของพาหะในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะตอมสารเจือความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น^[25,26] เช่น มากกว่า 10^{17} อะตอมต่อลบ.ซม. ในกรณีนี้สามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิช่วงต่ำๆ จะมีการชนระหว่างพาหะกับแลตทิซน้อยมาก สภาพคล่องจึงถูกกำหนดด้วยผลของการชนกันระหว่างพาหะกับอะตอมสารเจือเพียงอย่างเดียว ยังมีอะตอมสารเจือมากจะมีการชนกันมาก ทำให้สภาพคล่องยังมีค่าต่ำ^[27] อย่างไรก็ตามในช่วงนี้เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นเล็กน้อย 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 ที่อุณหภูมิกว่า 300K ค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน และโฮลในสารกึ่งตัวนำซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์จะเปลี่ยนแปลงกับความหนาแน่นอะตอมสารเจือดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าน้อยสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าเกือบคงที่ แต่เมื่อความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าสูงเช่นมากกว่า 10^{15} อะตอมต่อลบ.ซม. สภาพคล่องของพาหะจะลดลงขณะที่ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

จากที่กล่าวมาเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในโครงสร้างฮอลล์เฟลทได้ ซึ่งในโครงสร้างฮอลล์เฟลทผลของปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนที่ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก เนื่องจากแรงลอเรนซ์สมดุลกับแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะที่เกิดขึ้นเบี่ยงเบนไม่เต็มที่ อย่างไรก็ตามเราพบว่าการเบี่ยงเบนของพาหะจะขึ้นอยู่กับแรงลอเรนซ์ ซึ่งแรงลอเรนซ์จะแปรโดยตรงกับสภาพคล่องของพาหะ ดังนั้นเพื่อให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีการเบี่ยงเบนมากขึ้น เราจะต้องทำให้ค่าสภาพคล่องของพาหะมีค่าสูง ซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออยู่ในเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1.) อุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิต่ำ พลังงานความร้อนมีค่าน้อยทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Thermal vibration) น้อยตามไปด้วย โครงสร้างของแลตทิซจึงอยู่ในสภาวะที่ค่อนข้างนิ่ง กรณีนี้โอกาสที่จะเกิดการชน จึงมีน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการสั่นของอะตอมเกิดขึ้นมาก การชนกันเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “การกระเจิงเนื่องจากแลตทิซ” (Lattice scattering) หรือ “การกระเจิงเนื่องจากความร้อน” (Thermal scattering) ในทางอุณหพลศาสตร์ที่ 0K อะตอมจะไม่มีสั่นเลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของแลตทิซจะอยู่ในสภาวะนิ่ง หรือมีลักษณะเป็น Stationary Lattice ดังนั้นการชนกันจะไม่เกิดขึ้นเลยซึ่งจะทำให้ค่าสภาพคล่องมีค่าสูง

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Sentaurus TCAD และการจำลองแบบ

ในเนื้อหาของบทนี้เราจะกล่าวถึงเครื่องมือที่สำคัญในการจำลองแบบการทำงาน และการจำลองแบบที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โปรแกรม Sentaurus TCAD (Technology CAD) คือโปรแกรมหนึ่งที่ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงาน เพื่อพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างหรือพัฒนาตัวอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำให้ดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้เราจึงใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการดำเนินการทดสอบเพื่อพัฒนาและปรับปรุงผลของแมกนีโตรีซิสแตนท์ในโครงสร้างฮออลล์เพลท ตลอดถึงการออกแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮออลล์เพลท เช่นการออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮออลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮออลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนท์ให้มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นด้วย

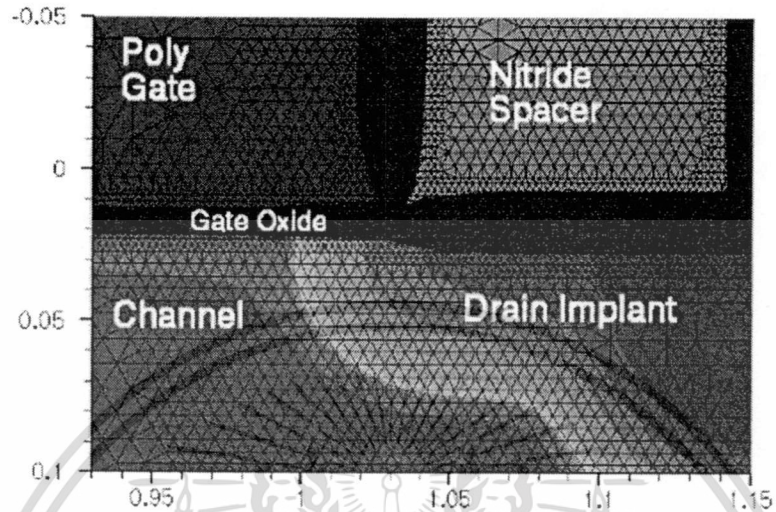
3.1 บทนำ TCAD

การจำลองการทำงาน TCAD ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะกับงานด้านอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor Industry) เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความเร็วในการค้นคว้าวิจัยหรือพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้ผลิตตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (semiconductor device) ใช้ TCAD สำหรับการวิเคราะห์ผลซึ่งก็คือการตรวจสอบ, วิเคราะห์, การศึกษาวิธีที่ดีที่สุดขั้นตอนกระบวนการสร้างและยังสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนกระบวนการสร้างในวงจรรวมได้อีกด้วย โดย TCAD แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกันกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก โดย TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆ อยู่ 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 ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนพื้นฐานของสมการค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

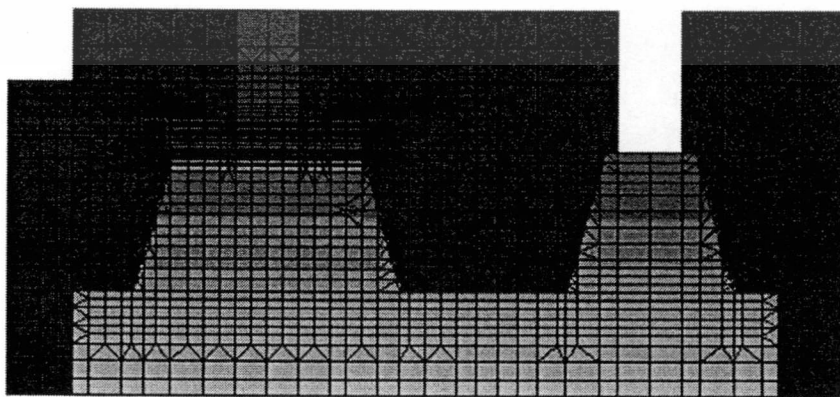
ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูกเมส (mesh) หรือกริด (grid) และถูกแทนที่ด้วย finite-element structure เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในส่วนการจำลองแบบกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองแบบกระบวนการสร้าง

3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

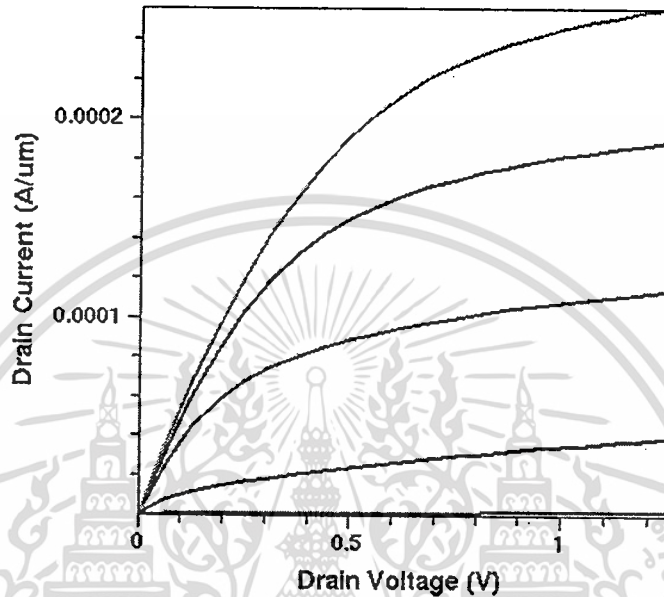
ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD เราสามารถที่จะจำลองแบบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น คุณสมบัติทางแสงหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกเมส จากนั้นจะถูกแทนที่ด้วย finite-element structure ซึ่งแต่ละโนดของตัวอุปกรณ์จะมีคุณสมบัติทางด้านต่างๆที่ร่วมกันอยู่ เช่น ชนิดของวัสดุ (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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขังนะเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในเว็บไซต์ของศูนย์ฯจะขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

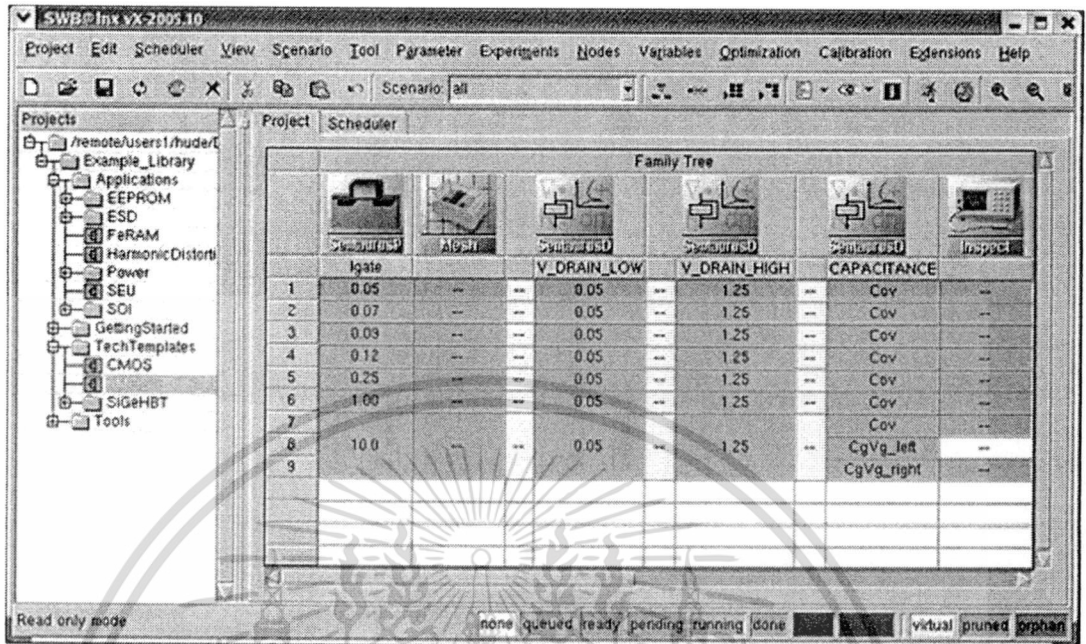
โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD จะมีส่วนประกอบย่อยๆ อยู่ 7 ส่วนดังนี้

- 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 ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

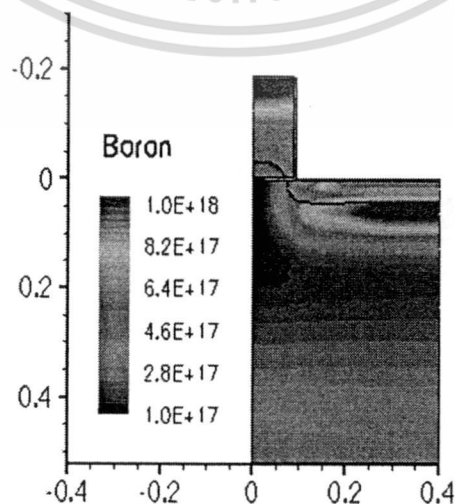
ตามที่ต้องการได้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการจำลองการทำงาน โดย TCAD ในส่วนของ Sentaurus Workbench แสดงดังรูปที่ 3.4



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

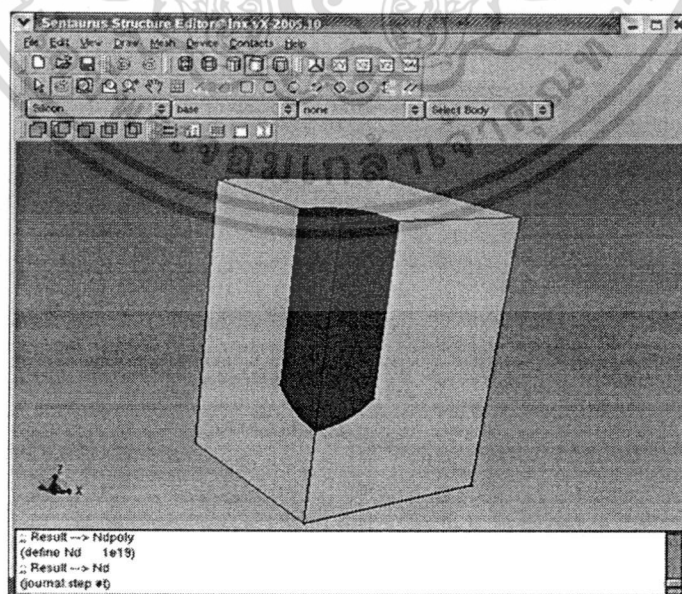
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งรูปร่างและโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเกิดจากรูปร่างง่ายๆ เหล่านี้ ซึ่งหน้าต่างในส่วนของ Sentaurus Structure Editor^[31] แสดงในรูปที่ 3.6



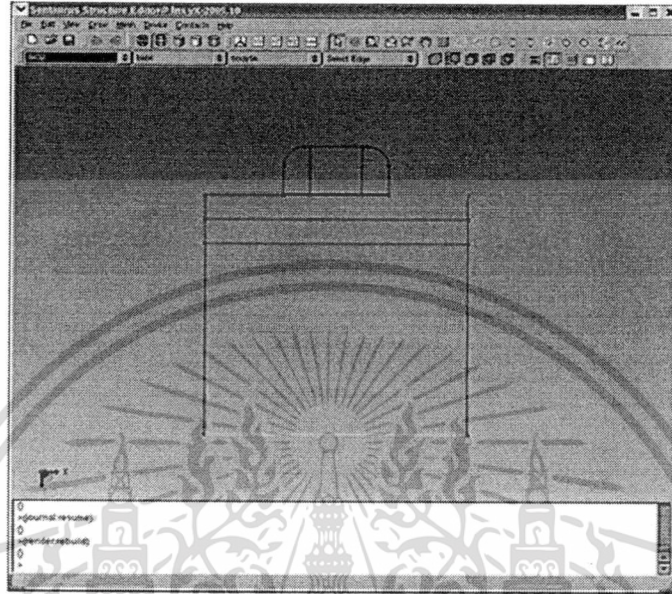
(ก) 2 มิติ



(ข) 3 มิติ

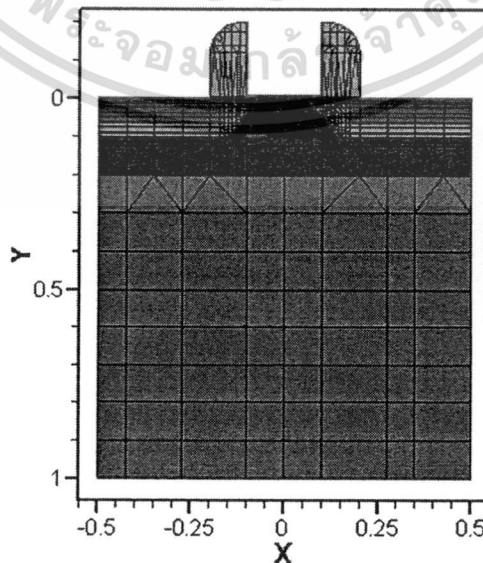
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.6 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของ Sentaurus Structure Editor
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราสามารถที่จะกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

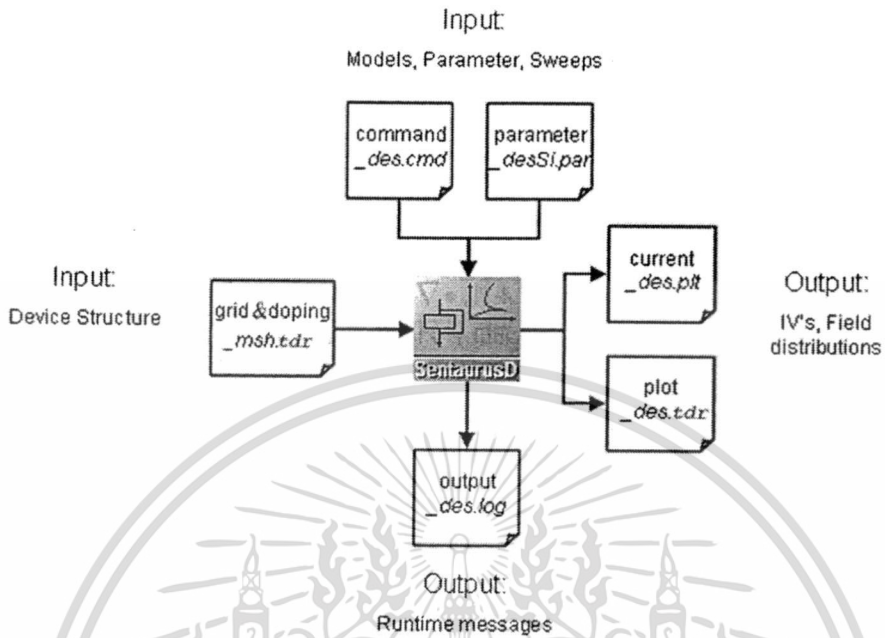
จากนั้นในส่วนของ Setaurus Structure Editor เราสามารถกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือในบริเวณหรือส่วนต่างๆที่สร้างขึ้นมา ต่อจากนั้นจะเป็นการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ รูปที่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



รูปที่ 3.8 แสดงการจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการแบ่งกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ หรือทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลที่ไม่ได้ระบุไว้

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, หน้าสัมผัสไฟฟ้าแบบช็อตก็, 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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(

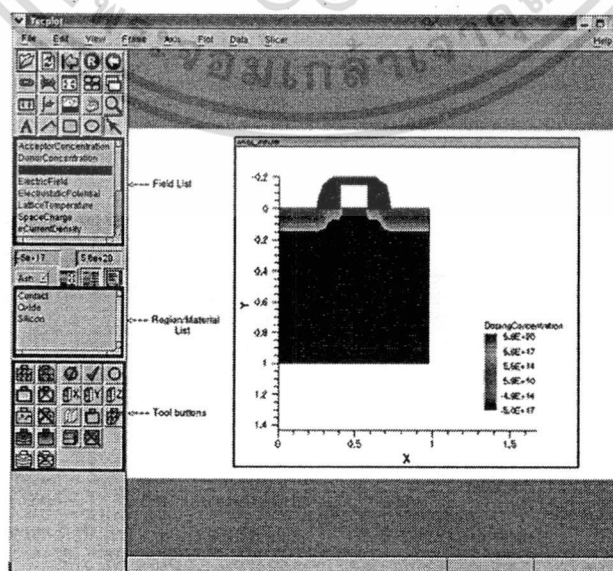
Goal{ Name="contact name" Voltage= voltage value }

){ Coupled{ Poisson Electron Hole } }

}

3.2.5 Tecplot SV

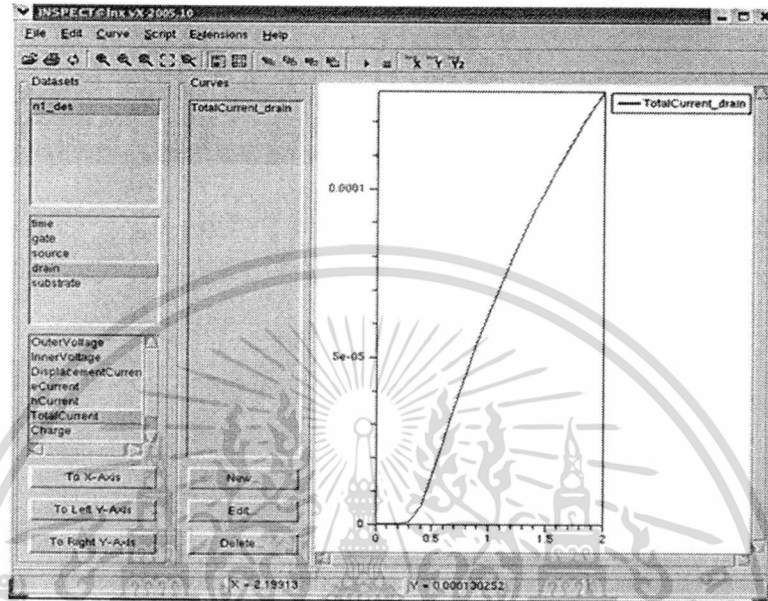
ส่วนของ Tecplot SV เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงาน ตัวอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ในส่วนต่างๆที่ต้องการทราบซึ่งจะถูกกำหนดไว้แล้วในส่วน Plot โดย Tecplot SV จะแสดงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี, ความเร็วของพาหะ หรือ ความเข้มข้นสวาร์เจือ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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.10 แสดงส่วนโปรแกรม Tecplot SV เติหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 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 ในส่วนของการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทแบบต่างๆ เช่น ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท, การออกแบบเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท รวมถึงการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่หมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่ดีขึ้นด้วย โดยพารามิเตอร์ที่เราใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ โดยในการจำลองแบบเราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน

3.3 การจำลองแบบการทดลองปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดย TCAD

ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทเราจะทำการจำลองเอกสารฉบับทั้งหมด 3 โครงสร้าง เพื่อสังเกตผลปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ที่เกิดขึ้น คือ โครงสร้างค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

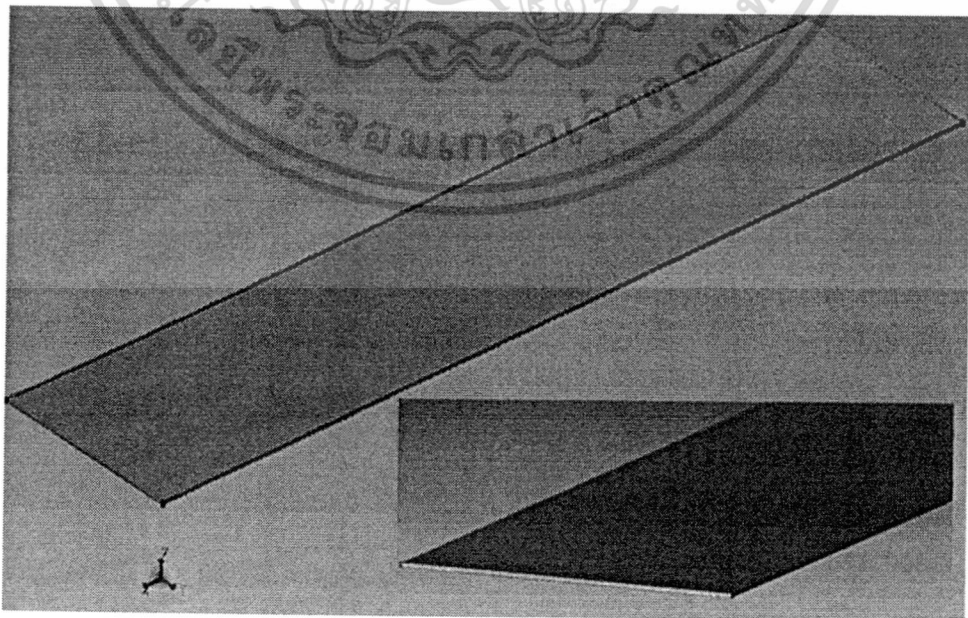
ฮอลล์เพลท, การอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท และการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท โดยแต่ละโครงสร้างจะมีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการจำลองแบบ TCAD อยู่ 3 ส่วนได้แก่ 1. การออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Structure Editor) 2. การกำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง (Sentaurus 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 ซึ่งโครงสร้างสำหรับการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทแสดงขั้นตอนในส่วนต่างๆดังนี้

3.3.1.1 จำลองแบบแผ่นฮอลล์เพลท

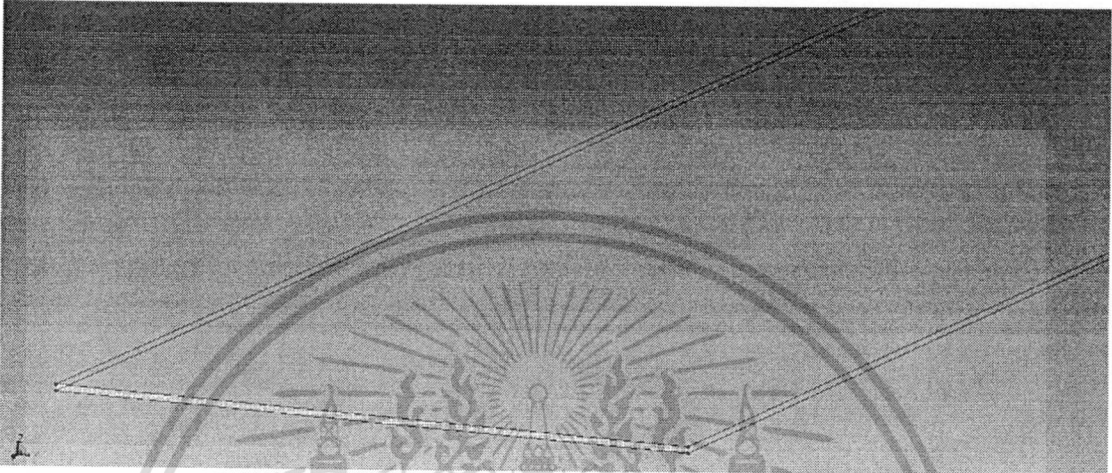
โดยขั้นตอนแรกของการจำลองแบบการสร้าง เราจะทำการสร้างแผ่นฮอลล์เพลทที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร, ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD ขั้วประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้า

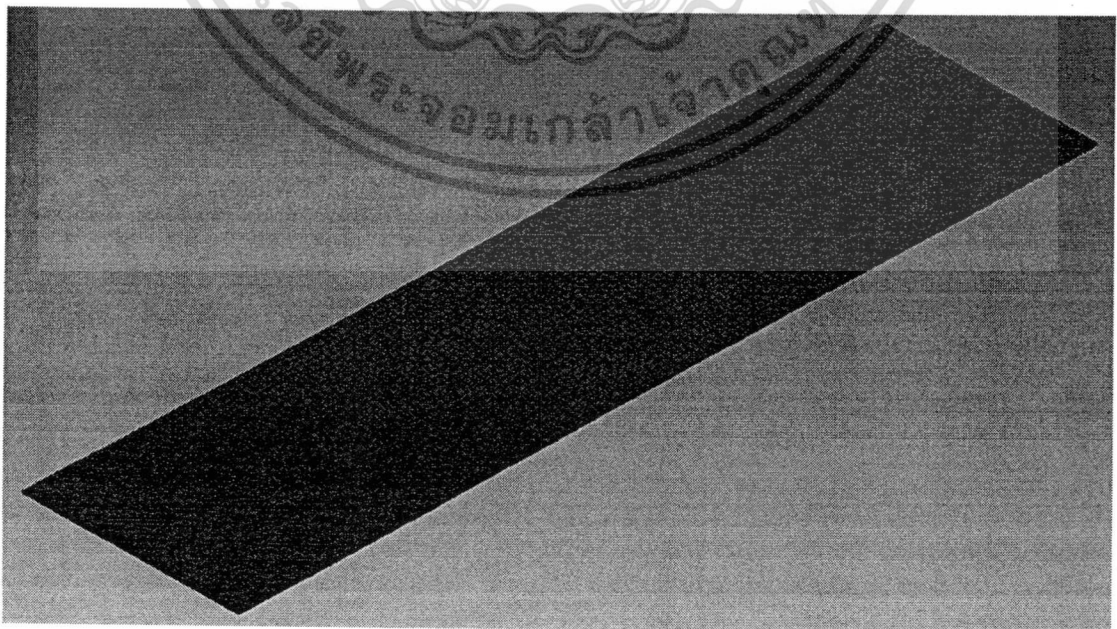
เมื่อกำหนดขนาดของแผ่นฮอลล์เพลทเสร็จแล้ว เราจะทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้าง ซึ่งจากรูปที่ 3.13 เราจะเห็นว่าหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.13 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างฮอลล์เพลทจากการจำลองแบบ TCAD

3.3.1.3 การแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์

หลังจากการสร้างตัวอุปกรณ์และการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์แล้ว เราจะทำการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารายงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.14 แสดงการแบ่งกริดบนโครงสร้างฮอลล์เพลท
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.4 โครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ

หลังจากการสร้างแผ่นฮอลล์เพลทใน Sentaurus Structure Editor ให้มีขนาดและวัสดุที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้โครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองแบบดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

3.3.2 การจำลองแบบการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

จากโครงสร้างฮอลล์เพลทเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์เพียงเล็กน้อยดังนั้นเพื่อเพิ่มค่าแมกนีโตริซิสแดนซ์ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเราจึงออกแบบให้ฮอลล์เพลทมีความสั้นหรือมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ 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 ซึ่งโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทสำหรับใช้ในการจำลองแบบปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์แสดงขั้นตอนในส่วนต่างๆดังนี้

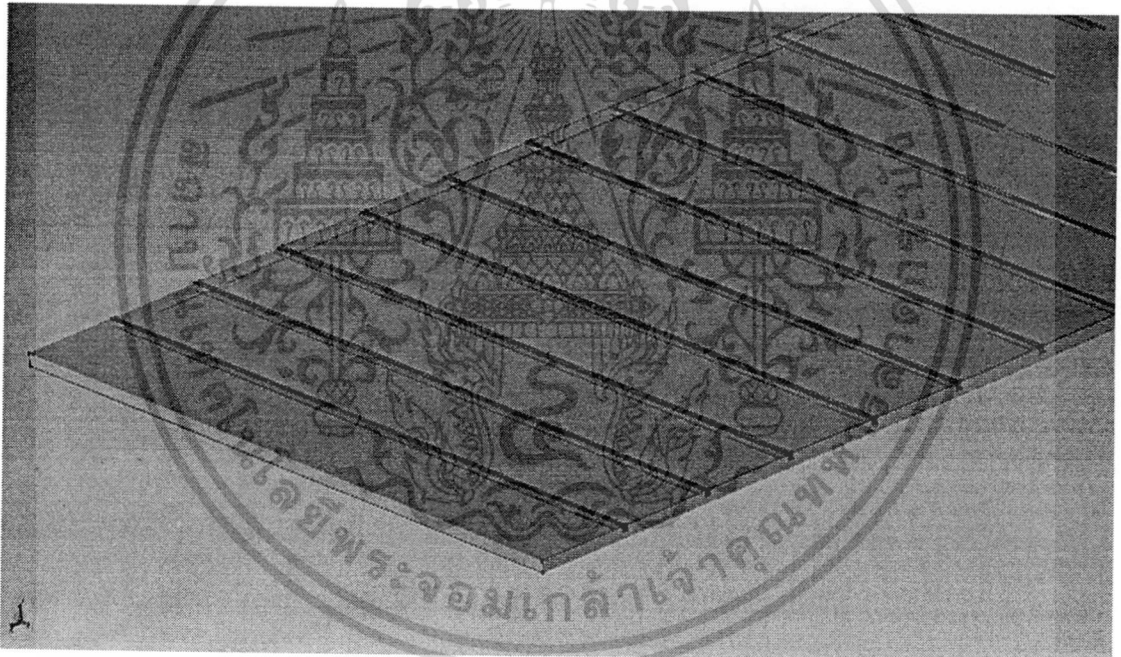
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

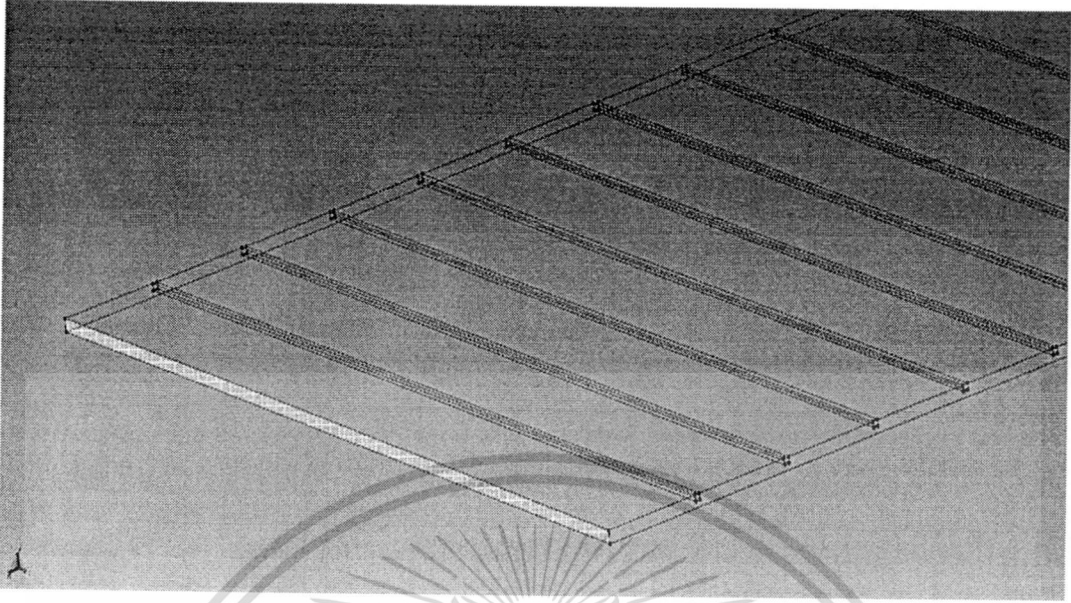


รูปที่ 3.16 แสดงลวดลายอลูมิเนียมบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม

3.3.2.3 กำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าของโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวม

เมื่อกำหนดลวดลายและขนาดของอลูมิเนียมเสร็จแล้ว เราจะทำการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งจากรูปที่ 3.17 เราจะเห็นว่าหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่กำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้

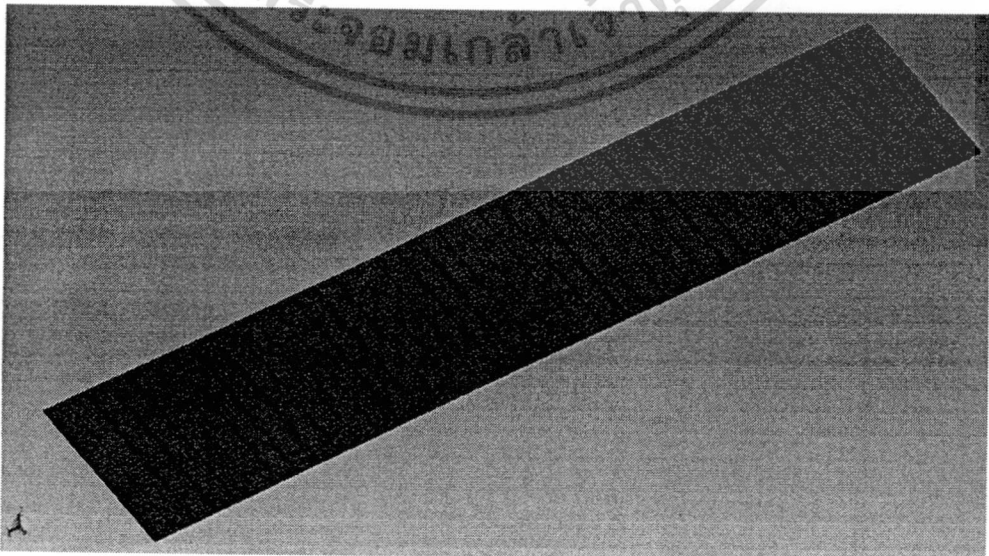
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าบนโครงสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมจากการจำลองแบบ TCAD

3.3.2.4 การแบ่งกริด (grid) บนโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท

หลังจากทำการสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทและการกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์แล้ว เราจะทำการแบ่งกริด (grid) ให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการแบ่งกริดของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลท เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่สามารถนำ ไปเผยแพร่ในชื่อโครงการได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.5 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทในการจำลองแบบ

หลังจากการสร้างโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทใน Setaurus Structure Editor ให้มีขนาด วัสดุ และการออกแบบที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว เราก็จะได้ โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทที่ใช้ในการจำลองแบบดังแสดงใน รูปที่ 3.19



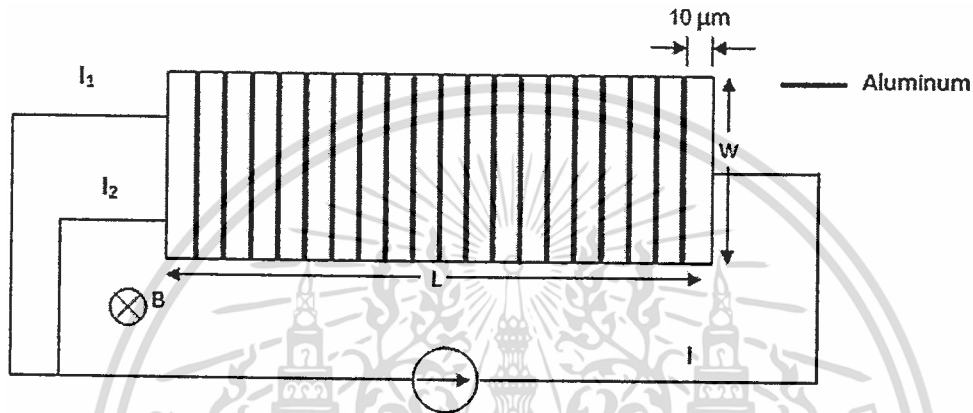
รูปที่ 3.19 โครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

อย่างไรก็ตามการอนุกรมความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่อง การออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและระยะห่างระหว่างช่องว่างอคูมิเนียมมีผลกับปรากฏการณ์ แมกนีโตริซิสแตนท์ โดยถ้าช่องว่างของอคูมิเนียมมีระยะห่างระหว่างอคูมิเนียมที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิด สนามไฟฟ้าฮอลล์ระหว่างช่องว่างของอคูมิเนียมได้ ซึ่งอาจส่งผลกับค่าแมกนีโตริซิสแตนท์ที่มีค่าลดลง โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเราจึงทำการ ออกแบบโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช่วงแหวนอคูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อช่วยใน เรื่องของการออกแบบที่ค่อนข้างยุ่งยากและระยะห่างระหว่างอคูมิเนียมดังกล่าว

3.3.3 การออกแบบตัวต้านทานแบบแยกกระแสโครงสร้างอนุกรมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

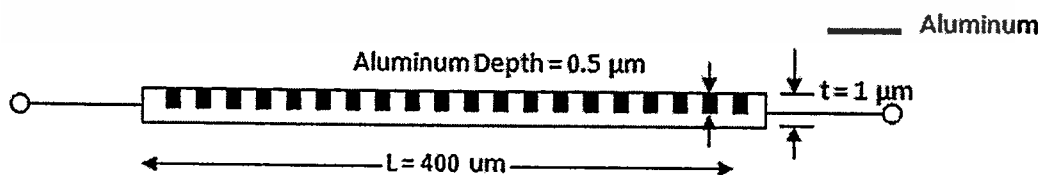
จากโครงสร้างตัวต้านทานอนุกรม จะเห็นได้ว่าการเบี่ยงเบนกระแสจะไม่ได้ถูกใช้เป็นเอาท์พุท โดยตรงแต่จะอยู่ในรูปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงและให้ผลเป็นแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานที่ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลง ซึ่งในกรณีเช่นนี้ไม่ถือว่าเป็นการทำงานโหมดกระแสโดยตรง เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมเอาท์พุทไม่ได้อยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส นอกจากนี้ค่าการเปลี่ยนแปลงจะมากขึ้นขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่อนุกรมด้วย ดังนั้นค่าความไวจะไม่เป็นอิสระกับค่าความต้านทานอนุกรม จากข้อจำกัดดังกล่าวเราทำการออกแบบใหม่โดยต้องการให้อุปกรณ์นี้เป็นอุปกรณ์ที่เป็นโหมดกระแสโดยตรง มีเอาท์พุทเป็นการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส จึงทำการออกแบบให้มีขั้วสองขั้วสมมาตรกันด้านหนึ่ง ส่วนอีกขั้วของตัวต้านทานเป็นขั้วเดียวเหมือนเดิม โดยตัวต้านทานนี้จะมีสามขั้ว



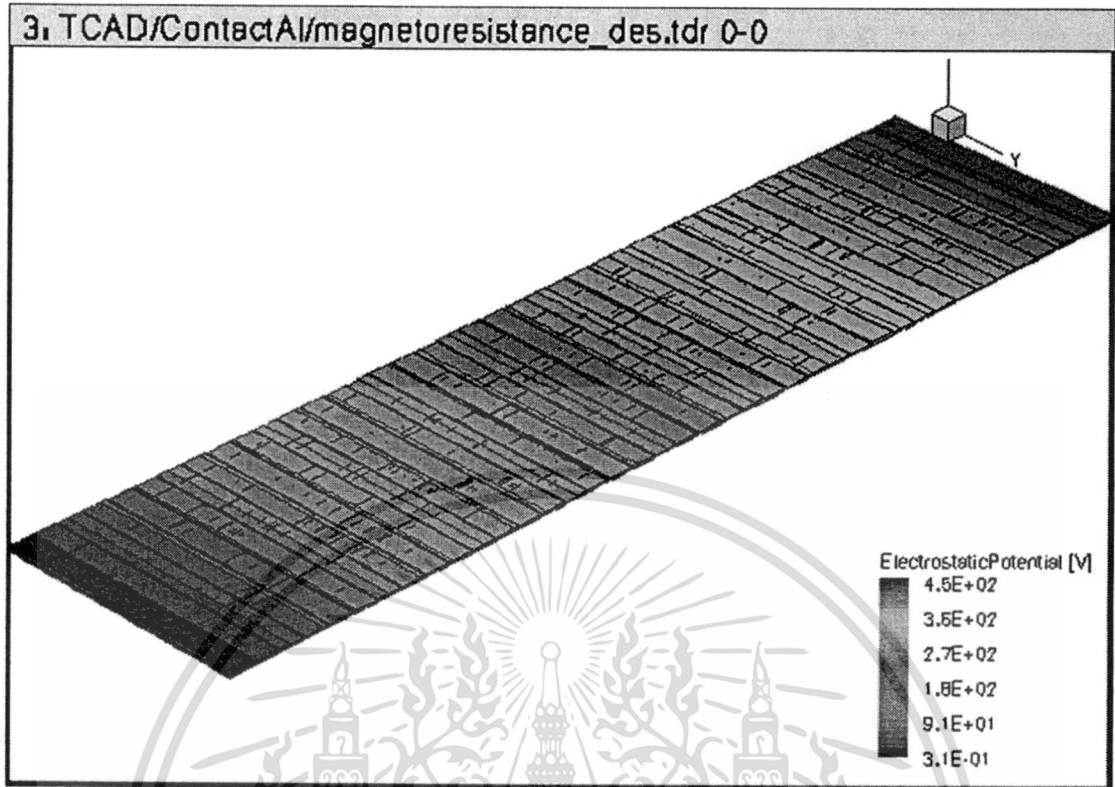
รูปที่ 3.20 ภาพด้านบนโครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสโครงสร้างแบบอนุกรมบนฮอลล์เพลท

รูปที่ 3.20 เป็นรูปแสดงโครงสร้างอุปกรณ์ที่ออกแบบเพื่อให้ทำการตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมดกระแสโดยด้านหนึ่งมีสองขั้วที่สมมาตรกัน และอีกด้านหนึ่งของตัวต้านทานมีขั้วเดียว รูปที่ 3.21 แสดงรูปด้านข้างของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส จะเห็นว่าโครงสร้างเป็นโครงสร้างฮอลล์เพลท ที่มีโลหะแพร่ด้านบนเป็นโครงสร้างตัวต้านทานอนุกรมกันโดยที่ความลึกของโลหะด้านบนไม่ทะลุถึงด้านล่าง จากรูปแสดงฮอลล์เพลทที่มีความลึก $1\ \mu\text{m}$ โลหะอลูมิเนียมมีความลึก $0.5\ \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างขั้ว $10\ \mu\text{m}$ มีจำนวนตัวต้านทาน 20 ตัว



รูปที่ 3.21 ภาพด้านข้างโครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสโครงสร้างแบบอนุกรมบนฮอลล์เพลท

จากโครงสร้างดังกล่าวเราทำการสร้างแบบจำลองตามโครงสร้าง รูปที่ 3.22 แสดงแบบจำลองเอกส โครงสร้างแบบสามมิติของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แสดงแบบจำลองโครงสร้างแบบสามมิติของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยก
กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลองตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็ก แบบแยกกระแส

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองการจำลองการทำงานปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์แบบโครงสร้างเก่าและโครงสร้างใหม่ในโหมดกระแสด้วยโปรแกรมการจำลองแบบ TCAD โดยการทดลองจะแบ่งเป็นสองส่วนได้แก่โครงสร้างตัวต้านทานแบบอนุกรมและโครงสร้างตัวต้านทานแบบแยกกระแส

4.1 ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบอนุกรมค่าความต้านทาน

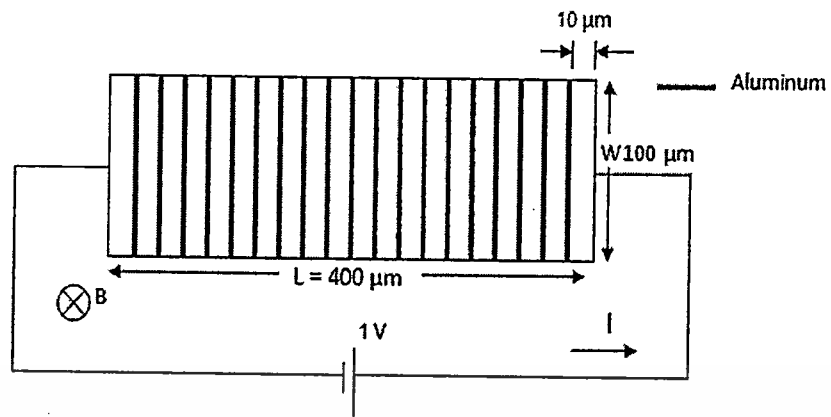
ในตอนนี้เป็นการศึกษาการทดลองและผลการทดลองการจำลองการทำงานปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์บนโครงสร้างอนุกรมค่าความต้านทานรวม จากนั้นศึกษาพารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์ ได้แก่ ชนิดของวัสดุ, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ และอุณหภูมิ ที่สนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา การจำลองการทำงานใช้โครงสร้างฮอลล์เพลทชนิดเอ็นที่มีความยาว 400 ไมโครเมตร ความกว้าง 100 ไมโครเมตรและหนา 1 ไมโครเมตร โดยให้มีระยะห่างระหว่างอลูมิเนียม 10 ไมโครเมตร ซึ่งอลูมิเนียมมีความยาว 0.5 ไมโครเมตร ความกว้างเท่ากับความกว้างของแผ่นฮอลล์เพลท 100 ไมโครเมตร ความหนา 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งโครงสร้างสำหรับการทดลองเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ของอนุกรมค่าความต้านทานรวม โครงสร้างฮอลล์เพลทแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับกระแสในทิศทาง z ในการจำลองการทำงานเราใช้แรงดันไฟฟ้า 1 โวลต์ โดยในการจำลองแบบ เราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน(Silicon) และแกเลียมอาเซไนด์(Gallium arsenide) ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตรีซิสแดนซ์ทำได้จากสมการที่ 4.1

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

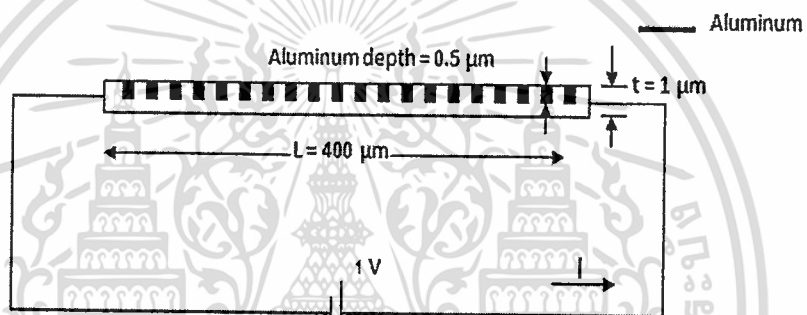
โดย $R(H)$ คือ ความต้านทานที่ขั้วไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ (V/I) ที่สนามแม่เหล็ก H

ซึ่งจากโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานในรูปที่ 4.1 ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม TCAD ในการศึกษาปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแดนซ์รวมถึงลักษณะการเบี่ยงเบนของพาหะ ดังรูปที่ 4.2 แสดงเส้นทางเดินกระแสของซิลิคอนฮอลล์เพลทที่สนามแม่เหล็ก 0 เทสลาและ 3 เทสลาที่ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



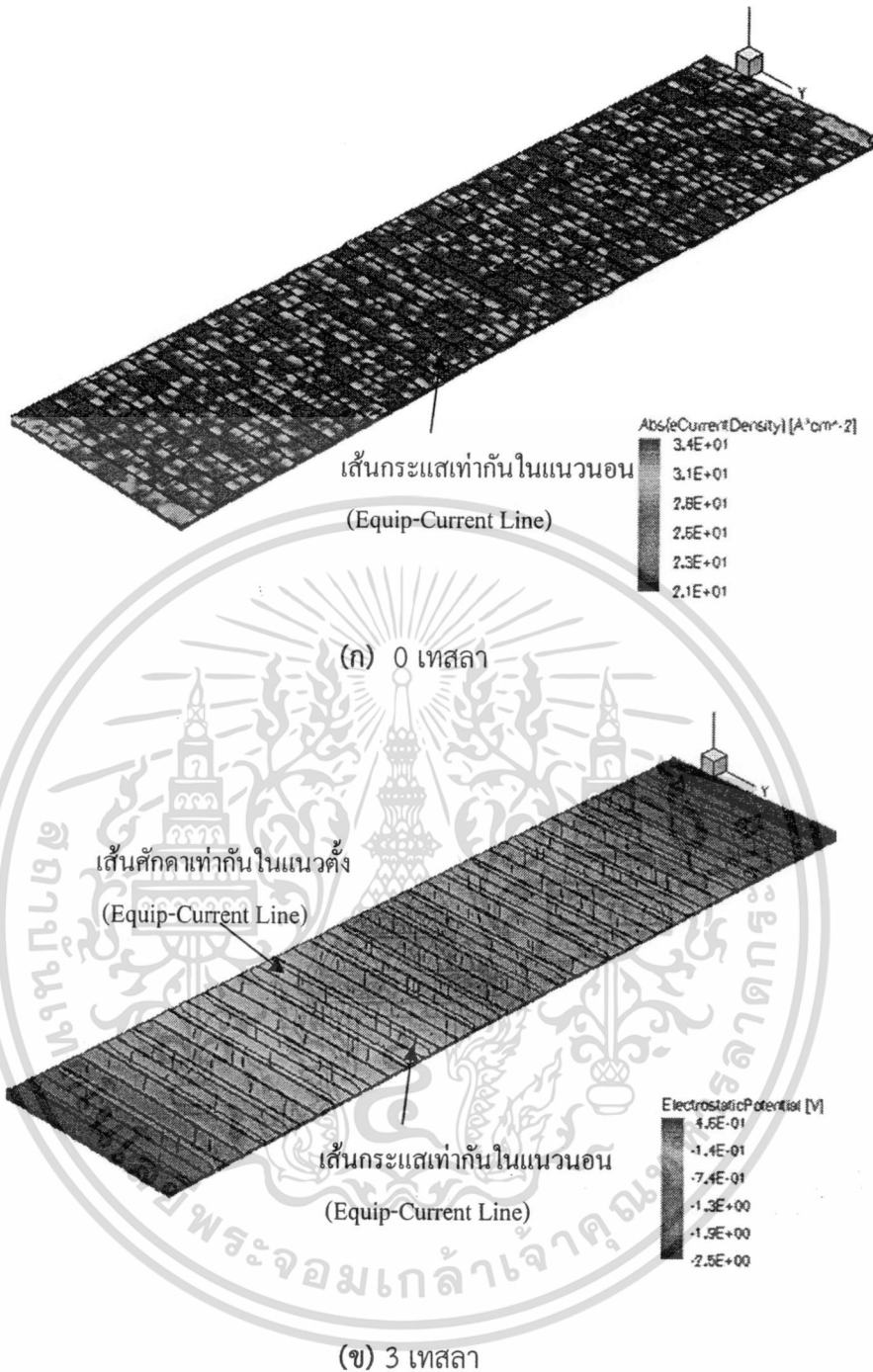
(ก) ด้านบน



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.1 ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างอนุกรมค่าความต้านทาน

อะตอมสารเจือ $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน รูปที่ 4.2(ก) ขณะยังไม่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ที่แรงดัน 1 โวลต์จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้า 4.41 ไมโครแอมป์ และความต้านทานไฟฟ้า 224.34 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนไม่มีการเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้น ส่วนในรูปที่ 4.2(ข) เมื่อฮอลล์เพลทได้รับสนามแม่เหล็ก 3 เทสลาที่แรงดัน 1 โวลต์ จะทำให้ได้กระแสไฟฟ้า 3.68 ไมโครแอมป์ และความต้านทานไฟฟ้า 269.24 กิโลโอห์ม จะเห็นว่าเส้นทางเดินกระแสที่เท่ากันในแนวนอนมีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ซึ่งการเบี่ยงเบนจะทำให้กระแสเอาท์พุทที่ได้มีค่าน้อยลงกว่ากรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กขึ้น ส่วนเส้นศักดาไฟฟ้าที่เท่ากันในแนวตั้งจะไม่มีการเบี่ยงเบนเกิดขึ้นซึ่งแสดงว่าไม่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าบริเวณทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท

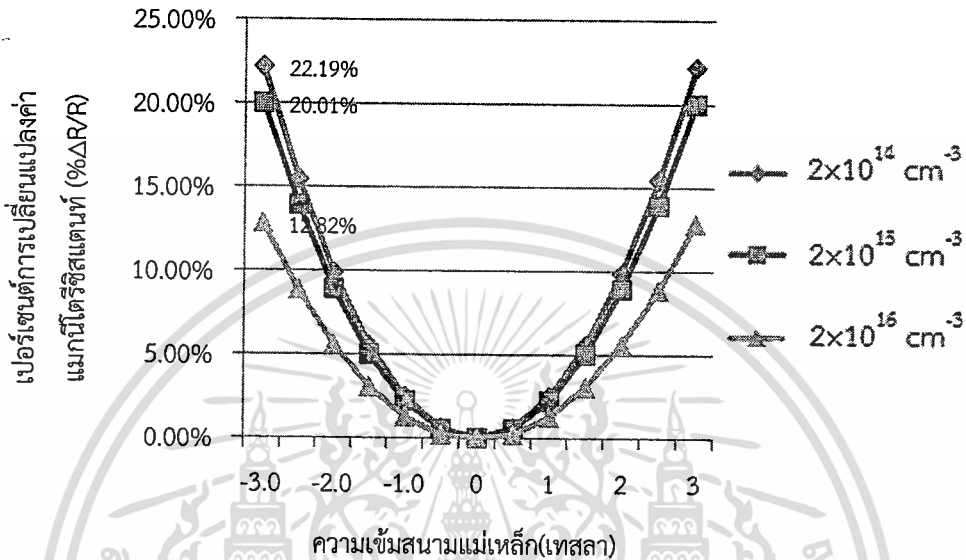


รูปที่ 4.2 แสดงเส้นกระแสที่เท่ากันในแนวนอนและศักดาที่เท่ากันในแนวตั้งของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบอนุกรม

4.2 พารามิเตอร์ที่มีส่วนช่วยสนับสนุนการตรวจจับสนามแม่เหล็กของตัวต้านทานแบบอนุกรมค่าความต้านทาน

ในส่วนนี้เราจึงนำพารามิเตอร์ต่างๆมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยสนับสนุนปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์ของโครงสร้างอนุกรมค่าความต้านทาน ได้แก่ ชนิดของฐานรอง, ความเข้มข้นอะตอมเอกซีสาร์เจือ และอุณหภูมิ โดยจำลองแบบสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0-3 เทสลา ที่แรงดัน 1 โวลต์ โดยในการคำนวณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองแบบ เราใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน และแกเลียมอาเซไนด์ ทำการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสให้เป็นชนิดเอ็นที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการหาค่าแมกนีโตริซิสแทนท์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิ 200, 250 และ 300 เคลวิน



รูปที่ 4.3 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแทนท์กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน บนฐานรองซิลิคอน

จากรูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแทนท์ของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมโครงสร้างฮอลล์เพลทของฐานรองซิลิคอนที่ความเข้มสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันคือ $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแทนท์เป็น 22.19%, 20.01% และ 12.82% ตามลำดับ ที่ 3 เทสลา อุณหภูมิ 300 เคลวิน จะเห็นว่าที่ความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยจะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซิสแทนท์ที่มากที่สุดสำหรับตารางที่ 4.1 แสดงผลสรุปปัจจัยที่มีส่วนสนับสนุนต่างๆ

อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่ให้ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างฮอลล์เพลทมีข้อเสียเปรียบในเรื่องของระยะห่างระหว่างช่องว่างของอะลูมิเนียมซึ่งจะมีผลต่อปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแทนท์ดังแสดงในรูป 4.20 ซึ่งแสดงการจำลองการทำงานของระยะห่างระหว่างอะลูมิเนียมของโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลทชนิดเอ็นที่มีความยาว 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 แสดงระยะห่างของช่องว่างอะลูมิเนียมที่ได้จากการจำลองการทำงานจะเห็นว่าถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซีสแดนท์ของวัสดุ 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%

ระยะห่างของอะลูมิเนียมห่างกันมากจะเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลทขึ้น ซึ่งส่งผลกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซีสแดนท์ที่มีค่าลดลงได้ โดยสนามไฟฟ้าฮอลล์จะทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะลดลง โดยตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซีสแดนท์กับระยะห่างระหว่างช่องว่างอะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน

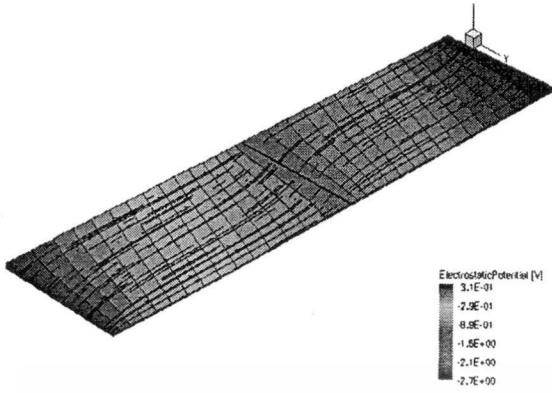
ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซีสแดนท์กับระยะห่างของอะลูมิเนียม

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%

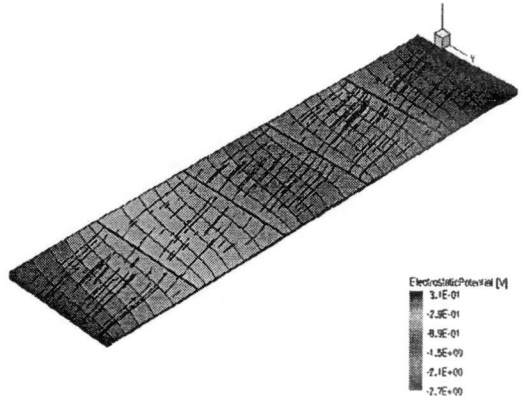
จากตารางที่ 4.3 เราจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซีสแดนท์จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างอะลูมิเนียมมีค่ามากขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าแมกนีโตริซีสแดนท์จะเข้าสู่ค่าอิมิตัวเมื่อระยะห่างระหว่างช่องว่างอะลูมิเนียมมีขนาดห่างกันตั้งแต่ 10 ไมโครเมตรลงไป ดังนั้นในการทดลองการจำลองการทำงานเราจึงอ้างอิงกับระยะห่างที่ 10 ไมโครเมตรจากหน้าสัมผัสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้

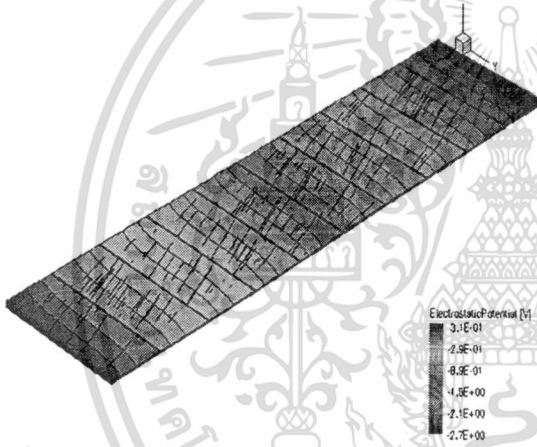
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



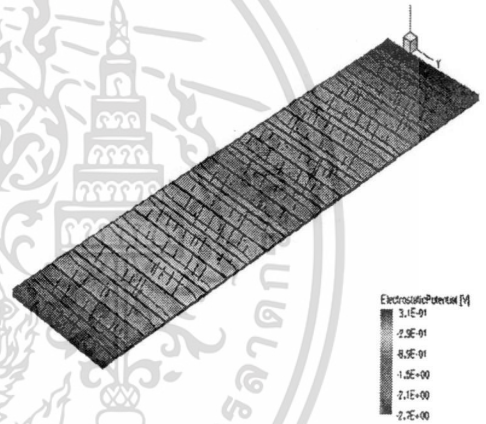
(ก) 200 ไมโครเมตร



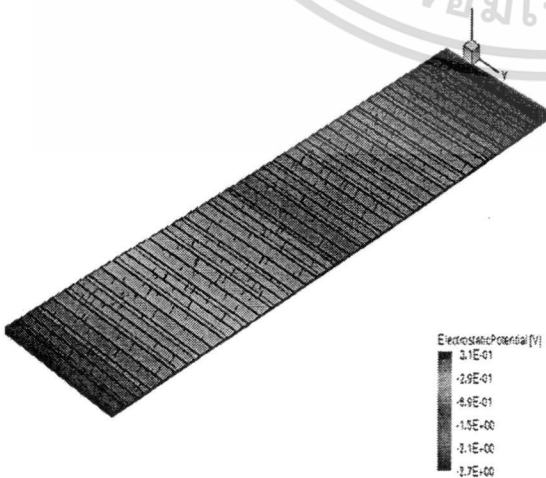
(ข) 80 ไมโครเมตร



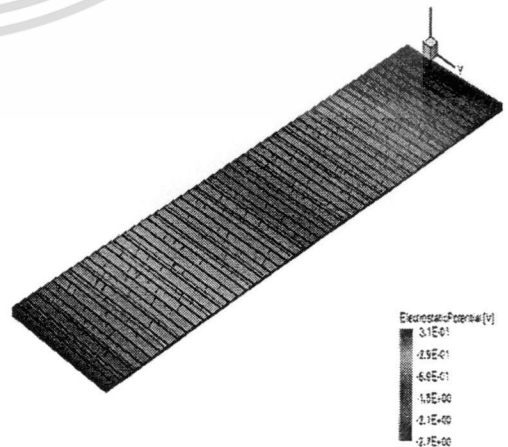
(ค) 40 ไมโครเมตร



(ง) 20 ไมโครเมตร

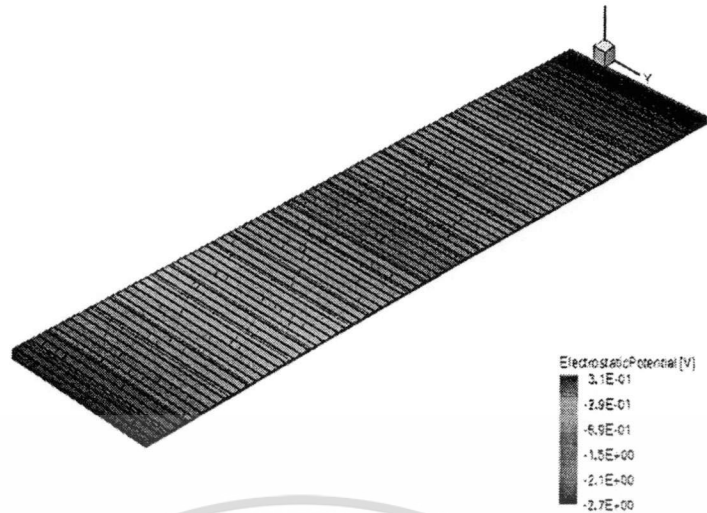


(จ) 10 ไมโครเมตร



(ฉ) 8 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

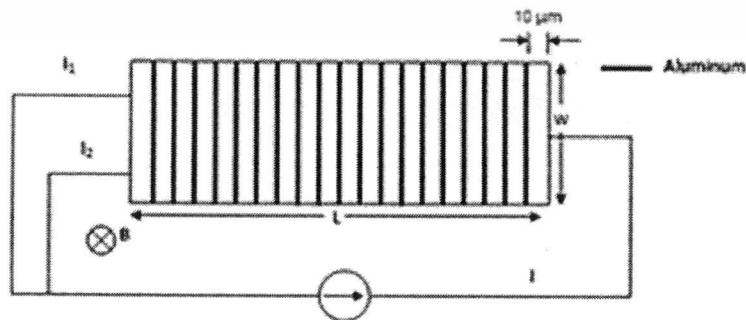


(ข) 5 ไมโครเมตร

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบระยะห่างของอะลูมิเนียมของการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างซิลิคอนฮอลล์เฟลท

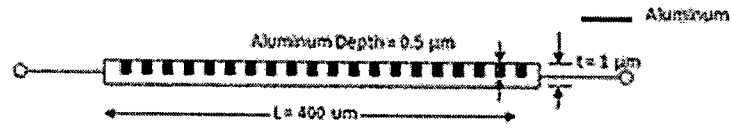
4.3 ตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส

ในตอนนี้ทำการทดลองการจำลองแบบโครงสร้างตัวต้านทานแบบแยกกระแส โครงสร้างที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยโครงสร้างเป็นแบบตัวต้านทานอนุกรม มีความลึก $1\ \mu\text{m}$ มีความกว้าง W เท่ากับ $100\ \mu\text{m}$ และมีความยาวรวม L ที่ค่า 200 และ $400\ \mu\text{m}$ ความกว้างระหว่างแถบอะลูมิเนียมมีค่า $10\ \mu\text{m}$ โครงสร้างภาพตัดขวางในรูป 4.5(ข) แสดงให้เห็นแถบอะลูมิเนียมลึกลงไปในพื้นผิวซิลิกอน $0.5\ \mu\text{m}$ ไม่ได้ทะลุผ่านซิลิกอน การออกแบบเป็นไปเช่นเดียวกับโครงสร้างตัวต้านทานอนุกรมโดยมีขั้วปลายด้านหนึ่งแยกออกจากกันอย่างสมมาตรสองขั้วเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของกระแสของขั้วทั้งสอง



(ก) ด้านบน

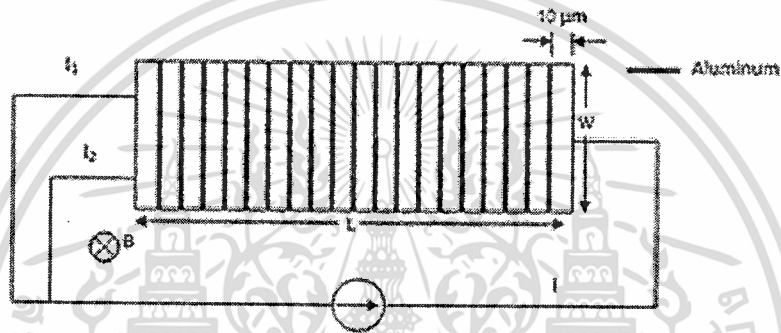
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ด้านข้าง

รูปที่ 4.5 โครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส

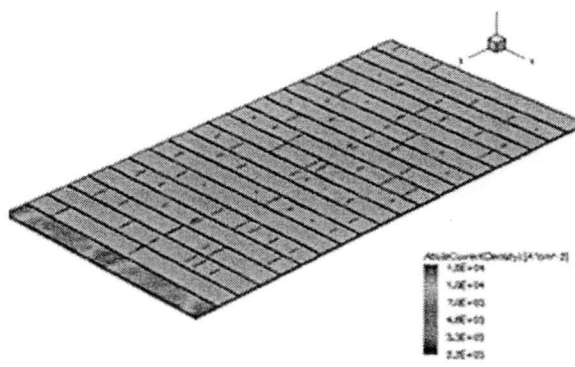
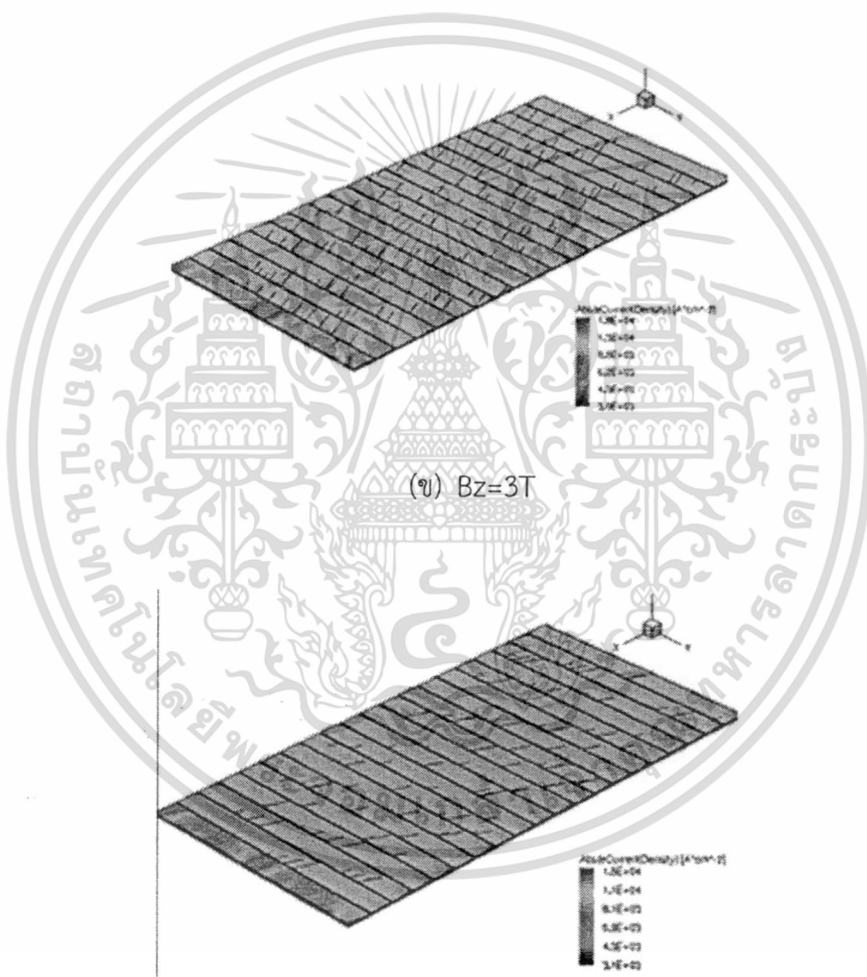
วงจรการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 โดยทำการป้อนแหล่งจ่ายกระแสคงที่ให้แก่ตัวต้านทาน จากนั้นให้สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับตัวต้านทานดูผลการเบี่ยงเบนกระแสที่ขั้วทั้งสองที่แปรผันตามความเข้มสนามแม่เหล็ก กระแส I_1 และ I_2 คือค่ากระแสที่ไหลผ่านขั้วที่ 1 และที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 วงจรการวัด

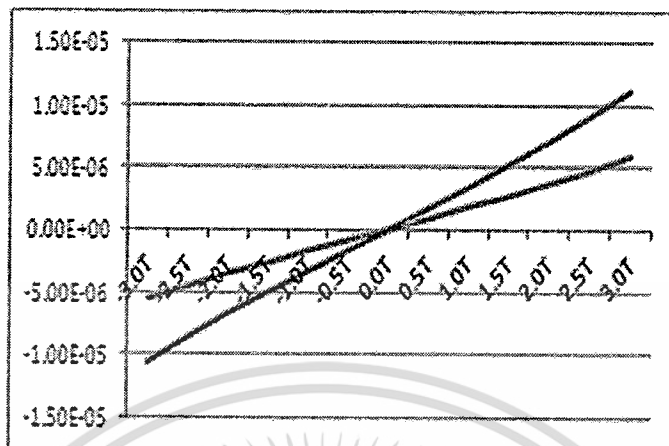
ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยแสดงเส้นกระแสที่ไหลในตัวต้านทาน รูปที่ 4.7(ก) แสดงเส้นกระแสขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสวิ่งเป็นเส้นตรงที่ขั้วทั้งสองมีค่ากระแสเท่ากัน ความหนาแน่นกระแสสามารถสังเกตได้จากสีบนตัวต้านทาน รูปที่ 4.7(ข) และ 4.7(ค) แสดงเส้นกระแสที่สนามแม่เหล็ก 3 เทสลาในทิศทาง $-Z$ และ Z โดยจะมีการเบี่ยงเบนกระแสในทิศทาง Y และ $-Y$ ตามลำดับ เกิดความแตกต่างของกระแส I_1 และ I_2 ขึ้น โดยในทิศ Y กระแส I_1 มีค่าน้อยกว่า I_2 และในทิศ $-Y$ จะตรงข้ามกันสีของความหนาแน่นกระแสจะมีความแตกต่างกันที่ขั้วทั้งสอง รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองเออร์พูทในรูปแบบความแตกต่างกระแส ($I_2 - I_1$) กับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ค่าความยาวที่แตกต่างกันเพื่อดูผลของการตอบสนองกับการอนุกรมค่าความต้านทานว่ามีผลต่อกันหรือไม่ รูปที่ 4.8(ก) เป็นกรณีความยาว $200\mu\text{m}$ ความกว้าง $100\mu\text{m}$ ที่ค่ากระแส 0.5 และ 1 mA กราฟคุณลักษณะมีความเป็นเชิงเส้นตลอดช่วงสนามแม่เหล็ก 0-3 เทสลา เมื่อให้ทิศทางสนามแม่เหล็กมีทิศทางตรงข้าม ให้ผลต่างกระแสที่ตรงข้ามกันซึ่งสามารถนำไปใช้วัดทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ ค่าความไวที่กระแส 0.5 mA มีค่า $2.872 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ และ $2.788 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ ในทิศทางสนามแม่เหล็ก $-Z$ และ Z ตามลำดับซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสมมาตร และที่กระแส 1mA มีค่าความไว $5.516 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ และ $5.34 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ รูปที่ 4.8(ข) แสดงผลตอบสนองของอุปกรณ์ความยาว $400\mu\text{m}$ กว้าง $100\mu\text{m}$ ค่าความไวของอุปกรณ์ที่กระแส 0.5 mA มีค่า $2.112 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ และ $1.96 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ และที่ 1 mA มีค่า $4 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ และ $3.712 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ ในทิศทาง $-Z$ และ Z ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

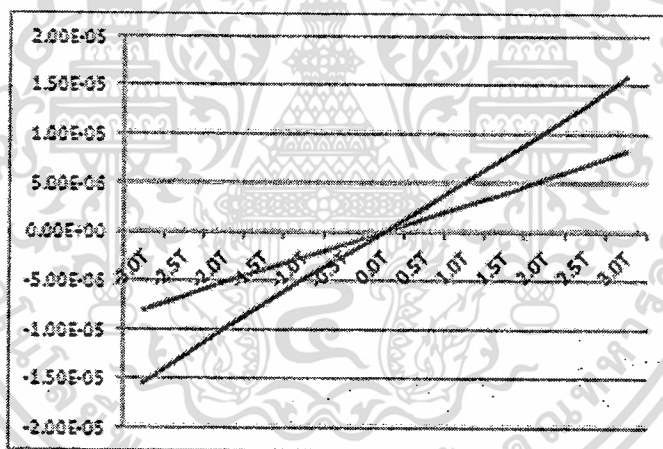
(ก) $B_z=0T$ (ค) $B_z=-3T$

รูปที่ 4.7 ผลของเส้นกระแสของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(I_2 - I_1)A$ 

(ก)

 $(I_2 - I_1)$ 

(ข)

รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองของตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสที่ค่ากระแส 0.5mA และ 1 mA

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 ผลของค่าความต้านทานอนุกรมยังมีผลต่อค่าความแตกต่างกระแสเอาต์พุท ในกรณีที่ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่ามากขึ้น ค่าความแตกต่างของกระแสเอาต์พุทยิ่งมากขึ้นเช่นกัน แสดงว่าการเบี่ยงเบนมีค่ามากขึ้นหรือถ้ามองในมุมความต้านทานคือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีค่ามากขึ้นเนื่องมาจากผลของการเบี่ยงเบนกระแสทำให้มีผลต่อค่าความแตกต่างกระแสที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท โดยเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานจะประกอบด้วย กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxidation process), การฉายแสง (Photolithography), การแพร่สารเจือ (Diffusion), การสร้างชั้นโลหะ (Metallization) เป็นต้น จากนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบมาสก์ (Mask Designs) เพื่อใช้ในขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลท ซึ่งในการผลิตอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำขึ้นมาชิ้นหนึ่งนั้น จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตแบบเดิมซ้ำกันไปมาหลายๆ รอบก่อนที่จะสร้างอุปกรณ์สำเร็จได้ ในส่วนของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทก็เช่นเดียวกัน จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการผลิตจากหลายส่วนและมีการวนลูปในบางกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับรายละเอียดของกระบวนการสร้างอุปกรณ์จะได้กล่าวถึงในข้อหัวของกระบวนการสร้างต่อไป

5.1 ทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer cleaning)

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

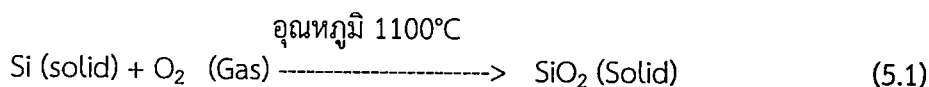
5.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

แผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้วจะเข้ากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นป้องกันการแพร่สารเจือ ชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สร้างจากการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีด้วยกัน 2 วิธี

5.2.1 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

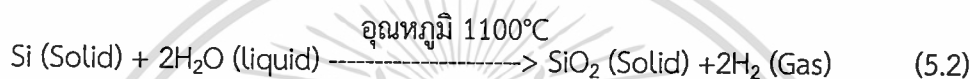
การออกซิเดชันแบบแห้งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของออกซิเจนบริสุทธิ์กับซิลิคอนใช้อุณหภูมิประมาณ 900° ถึง 1100° C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็น

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 มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่เสวกว่าแบบแห้ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น และการออกซิเดชันแบบชื้นนี้จะได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีสภาพผลึกไม่สมบูรณ์ คือเกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) หรือเกิดรูพรุนขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีอัตราการเกิดออกไซด์สูงกว่าแบบแห้งมาก

โดยการทดลองในครั้งนี้ใช้การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบ Dry-Wet-Dry ที่ $2.0\text{-}2.0\text{-}2.0$ ชั่วโมง ในการออกซิเดชันแบบแห้งใช้อุณหภูมิ 1000°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน 1200 ml/min ส่วนการออกซิเดชันแบบชื้นใช้อุณหภูมิ 1000°C อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนในการนำพาไอน้ำ 1000 ml/min เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 6000 อังสตรอม

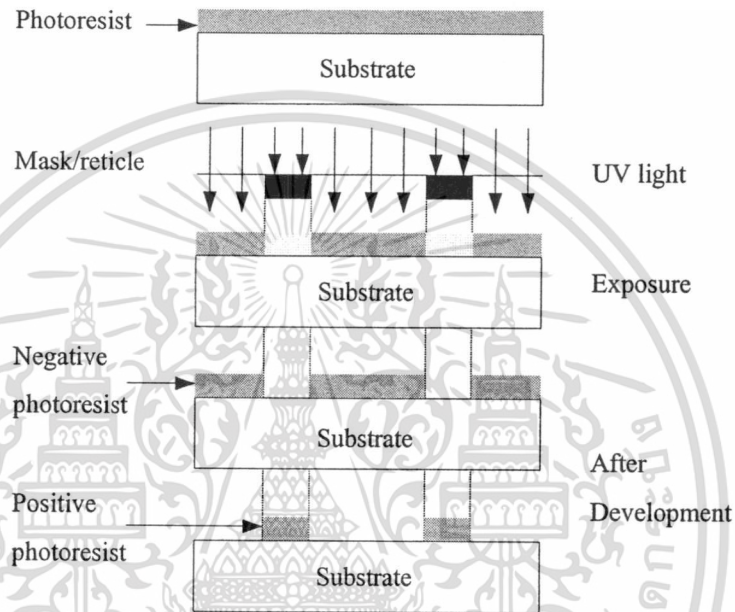
5.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายแบบตัวอย่างจากกระจกมาส์คไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อฉายแสงจะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ กระบวนการนี้ต้องทำในห้องที่มีความสะอาดเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ โดยเริ่มต้นด้วยการนำแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์มาทำการอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่จับอยู่ที่แผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก จากนั้นเคลือบพื้นแผ่นผิวฐานรองด้วยน้ำยาไวแสงโดยน้ำยาไวแสงสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

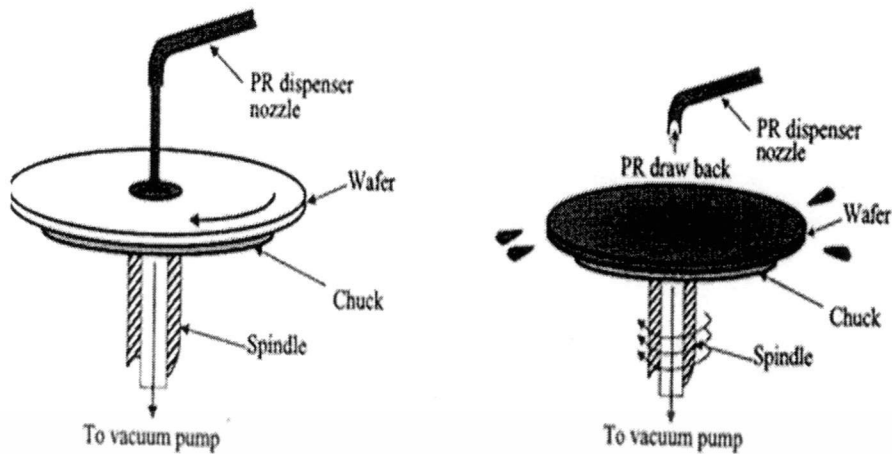
คุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสง คือ 1.Negative photoresist น้ำยาไวแสงชนิดนี้ หลังจากกระบวนการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายตรงกันข้ามกับต้นแบบ นั่นคือส่วนที่ไม่ถูกแสงจะถูกกัดออก เหลือเฉพาะบริเวณที่ถูกแสงเท่านั้น และ 2.Positive photoresist เป็นน้ำยาไวแสงที่หลังจากการฉายแสงและการ develop แล้ว จะได้ลวดลายแบบเดียวกันกับมาส์คต้นแบบ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



รูปที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 สิ่งที่เป็นในการควบคุมการ etching คือ เวลา อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารเคมีสารเจือต่อไป

5.5 การลอกชั้นไวแสงออกจากแผ่นผลึก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

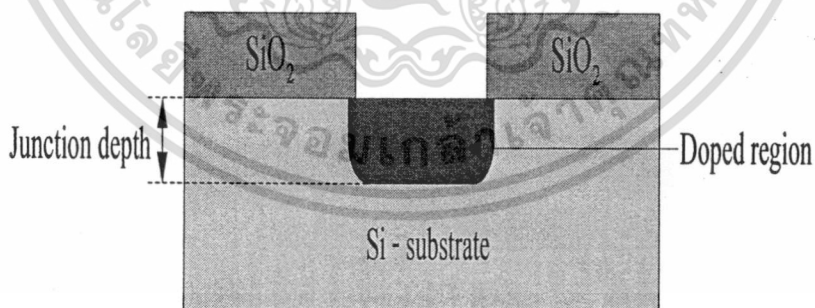
ผิวของแผ่นผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพร่สารเจือได้ ซึ่งถ้าผิวหน้าของแผ่นผลึกสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร่สารเจือ

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

5.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การแพร่ของสสารเป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่สสารจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่ทุกขณะ เช่น การแพร่ของสารเคมีในอากาศ การแพร่ของน้ำหมึกเข้าไปในของเหลวอย่างน้ำ เป็นต้น

สำหรับเทคนิคของการเติมสารเจือด้วยวิธีการแพร่สาร (Diffusion) เป็นวิธีการเจือสารซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับงานทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก ง่ายต่อการควบคุมใช้งาน สามารถทำได้ด้วยเตาความร้อนสูง (Furnace) ทั่วไป และสามารถแพร่สารเจือพร้อมกันได้คราวละหลายๆที่สำคัญคือเป็นวิธีที่ประหยัด 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) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุที่ใช้เป็นสารเจืออย่างไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มฟิล์มไม่ใช้สามารถใช้ได้ทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ใช้ธาตุแกลเลียมเป็นสารเจือชนิดพีเนื่องจากแกลเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือแกลเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ได้สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นออกไซด์ป้องกันผิวของซิลิคอนใช้ไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้ออกไซด์เป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆด้วยอย่างเช่น 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 โบรอนไตรโบรไมด์ (BBr_3) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ (BCl_3) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมโบรอนออกมาจาก B_2O_3 ที่ผิวของซิลิคอน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



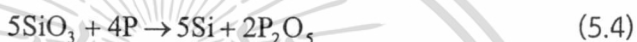
จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

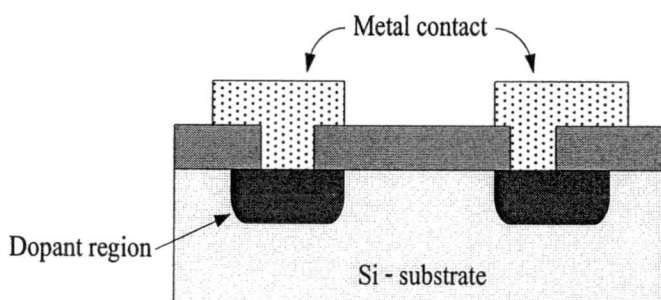
และสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นฝัง (n⁺ buried layer) ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดเอ็น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัสอาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่นในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P₂O₅) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสอ็อกซิคลอไรด์ (POCl₃) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน (PH₃) ซึ่งเป็นก๊าซพิษและอาจระเบิดได้ ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P₂O₅) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P₂O₅ ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ POCl₃ เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1200 °C ในช่วงเวลาตามต้องการในสถานะของก๊าซไนโตรเจน

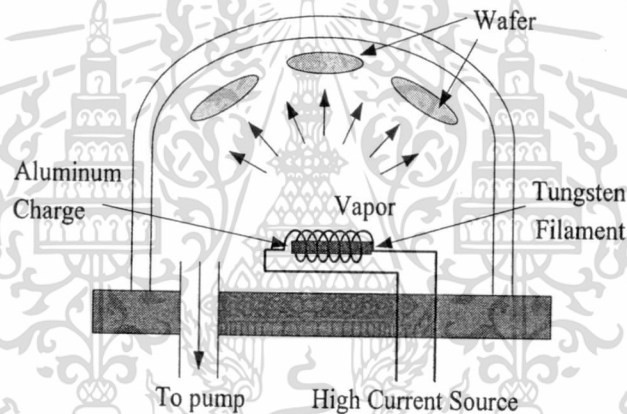
5.7 การสร้างชั้นโลหะ (Metallization)

การสร้างชั้นโลหะหรือการเมทัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก โดยโลหะที่ถูกนำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium), ทองแดง (Copper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่างเช่น ไททาเนียมซิลิไซด์ (TiSi₂) ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับกระทำเป็นขั้วโลหะนั้น แล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.4 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 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)

แต่สิ่งสำคัญของระบบการผลิตนี้คือเป็นการยากในการควบคุมความหนาของฟิล์มซึ่งในกระบวนการสร้าง VLSI และ ULSI จะไม่ใช้กระบวนการนี้เนื่องจากกระบวนการระเหยในสุญญากาศนี้จะทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) มอสเฟตสูงขึ้นและทำให้วงจรรวมถูกลดความน่าเชื่อถือโดยระบบนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงมากอยู่ที่ประมาณ 10 แอมป์ (Amp) ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ โดยโลหะที่ทำการสร้างบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ค่าความต้านทาน (Contact resistance) มีค่าต่ำหรือเป็นคอนแทคที่ดีและมีสภาพเป็นโอห์มมิกคอนแทค (Ohmic contact)
- ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เช่น ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นๆ ใต้ง่าย คุณสมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลงนั้นคือโลหะมีอายุการใช้งานนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

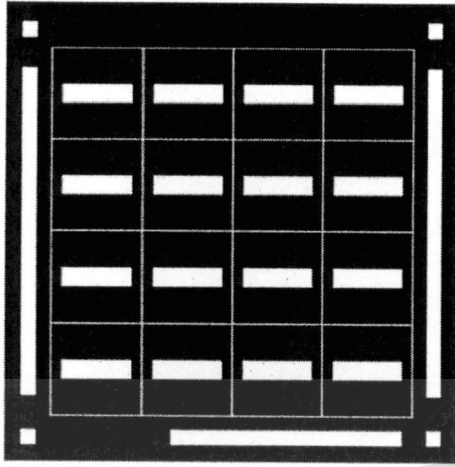
5.8 กระบวนการสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท (Series Magnetoresistance effect on Hall plate fabrication process)

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

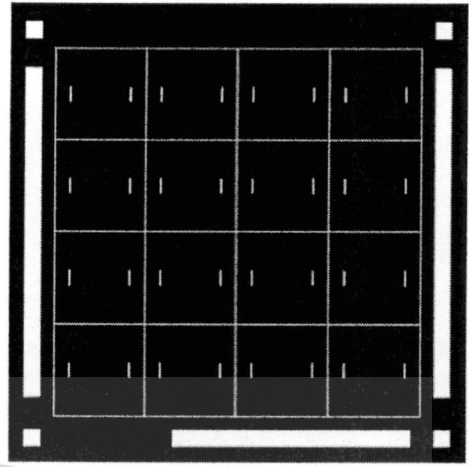
5.8.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

ในการออกแบบมาสก์ต้นแบบสำหรับใช้ในขั้นตอนการถ่ายแบบลงบนชิ้นงานสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในกระบวนการสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมโดยจะมีมาสก์ต้นแบบอยู่ทั้งหมด 4 มาสก์ ดังต่อไปนี้คือ

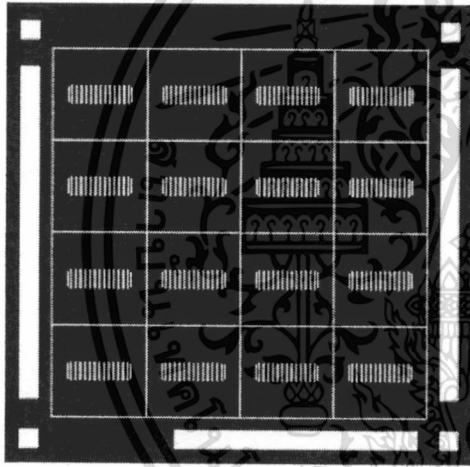
- มาสก์ 1: n-well มาสก์ (Mask # 1 n-well) แสดงดังรูปที่ 5.6(ก) เป็นมาสก์ต้นแบบที่ใช้สำหรับการสร้างบ่อ n-well ขึ้นจากแพร์สารเจือด้วยฟอสฟอรัส
- มาสก์ 2: n^+ มาสก์ (Mask # 2 n^+) ดังรูปที่ 5.6(ข) เป็นมาสก์ต้นแบบสำหรับการสร้างชั้นสารเจือชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นมากๆ จากการแพร์สารเจือด้วยฟอสฟอรัส
- มาสก์ 3: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



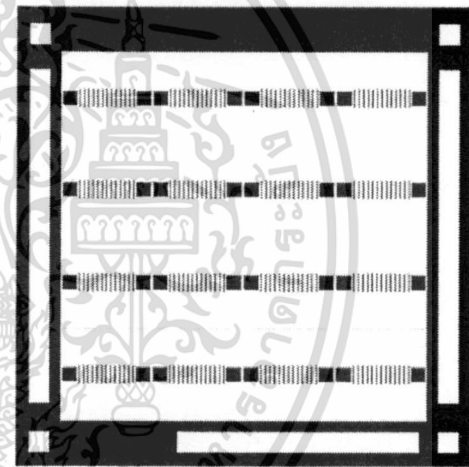
(ก) มาส์ค 1 (Mask#1 n-well)



(ข) มาส์ค 2 (Mask#2 n+)



(ค) มาส์ค 3 (Mask#3 Window)



(ง) มาส์ค 4 (Mask#4 Aluminum)

รูปที่ 5.6 มาส์คต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวม

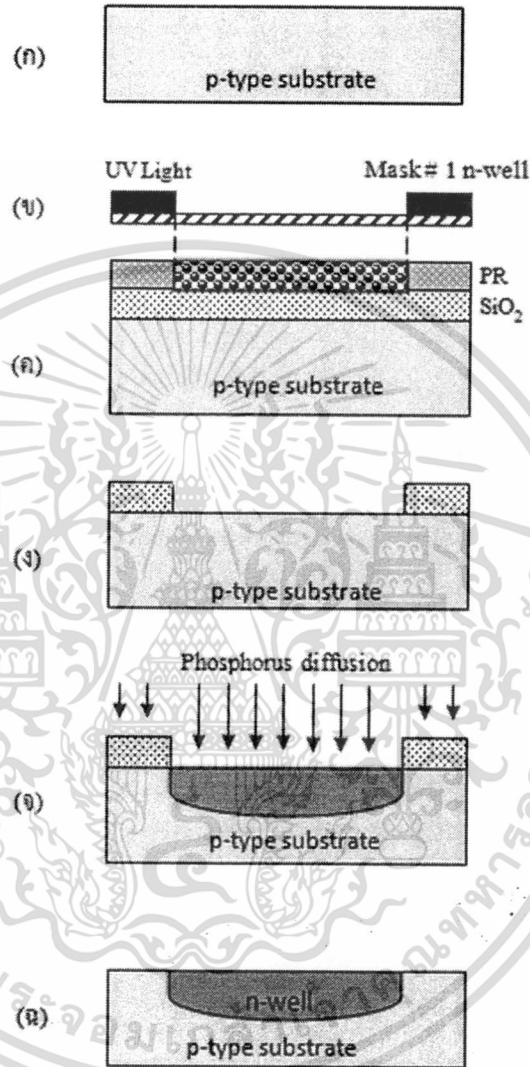
5.8.2 การสร้างโครงสร้างเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เฟลท

ขั้นตอนกระบวนการสร้างเราจะทำการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้เกิดการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เฟลท ซึ่งขั้นตอนการสร้างต่างๆจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆด้วยกันคือ 1. ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well 2. ขั้นตอนการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+) 3. ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียมกับขั้วโลหะ และ 4. ขั้นตอนการกัดชั้นอลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับการเชื่อมอุปกรณ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยขั้นตอนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8.2.1 ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแรกสำหรับการสร้างแมกนีโตริซิสแทนท์บนโครงสร้างเพื่อให้เกิดการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท คือ ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.7 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างบ่อ n-well

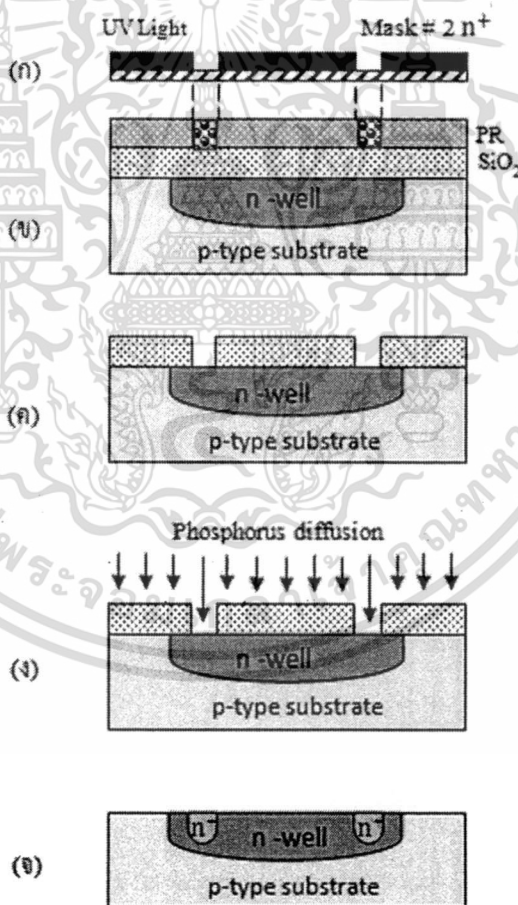
1. เริ่มต้นจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ 100 ความต้านทานแผ่น 14 - 16 โอห์ม/ซม. ทำความสะอาดผิวหน้าเพื่อเป็นการกำจัดสิ่งแปลกปลอมและคราบไขมันออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 5.7(ก)
2. ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation process) ดังรูปที่ 5.7(ค)
3. ใช้กระบวนการสร้างลวดลาย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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (UV Exposure) โดยผ่านทางกระจกต้นแบบ (Mask#1 n-well) ดังรูปที่ 5.7(ข) และ 3. ทำการล้างละลาย (Develop) สำหรับการสร้างบ่อ n-well ต่อไป
4. กระบวนการ etching ขึ้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสดังรูปที่ 5.7(ง) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
 5. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1e16$ 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



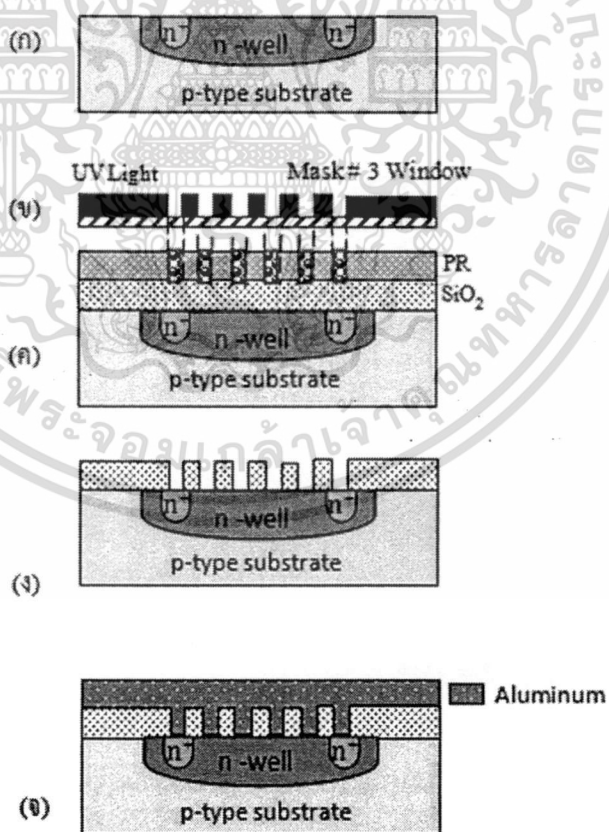
รูปที่ 5.8 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น n^+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนก่อนกระบวนการสร้างลวดลายสำหรับการสร้างชั้นเอ็นที่มีควมเข้มข้น (n^+)
2. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้ลวดลายชั้น n^+ โดยใช้กระจกโฟโตมาสค์สอง (Mask # 2 n^+) ดังแสดงในรูปที่ 5.8(ก) และ 5.8 (ข) สร้างลวดลาย (Develop) สำหรับการสร้างชั้น n^+ ต่อไป
3. กระบวนการ etching ขึ้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ดังรูปที่ 5.8 (ค) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
4. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1e^{19}$ อะตอม/ลบ. ซม. เป็นชั้น n^+ ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูงดังรูปที่ 5.8(ง)
5. หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจะได้เป็นชั้น n^+ ดังรูปที่ 5.8(จ)

5.8.2.3 ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม

ขั้นตอนก่อนถึงขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทคือ การเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



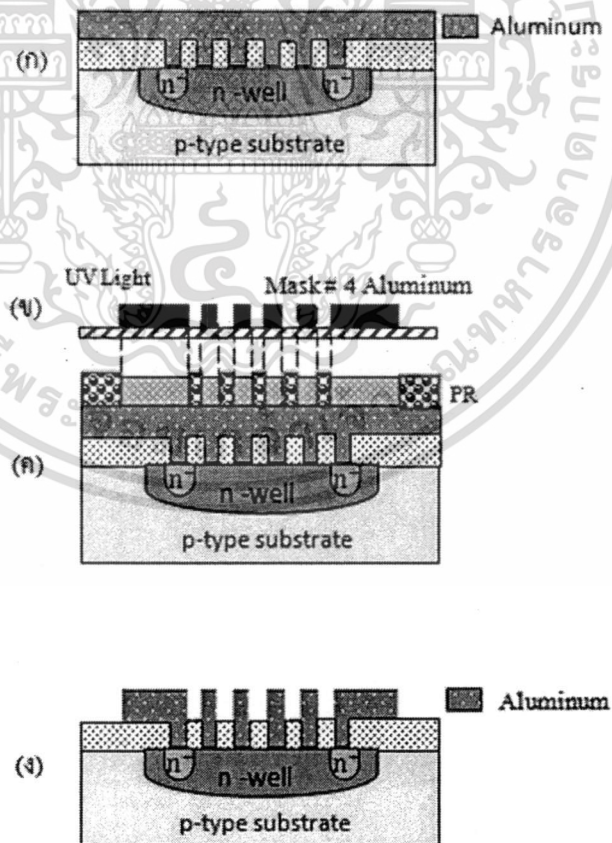
รูปที่ 5.9 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกและลวดลายที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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 ชั้นออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับใช้ในการสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียมดังรูปที่ 5.9(ง) หลังจากนั้นทำการล้างน้ำยาไวแสงออก
4. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization) ดังรูปที่ 5.9(จ)

5.8.2.4 ขั้นตอนการสร้างกััดชั้นโลหะ

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีตรีซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทเพื่ออนุกรมค่าความต้านทานรวมคือ การกััดชั้นโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



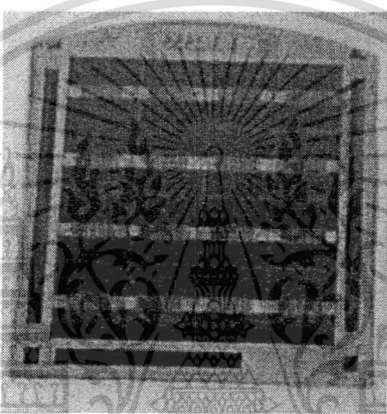
รูปที่ 5.10 แสดงขั้นตอนกระบวนการกััดชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.10(ก) เมื่อทำการเปิดช่องและทำการสร้างชั้นโลหะ aluminum ด้วยกระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metallization)

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

โดยหลังจากการกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์และทำการลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกจะทำให้ได้แผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เพลท

5.9 กระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบแยกกระแส (The fabrication process of Split-current Magnetoresistance)

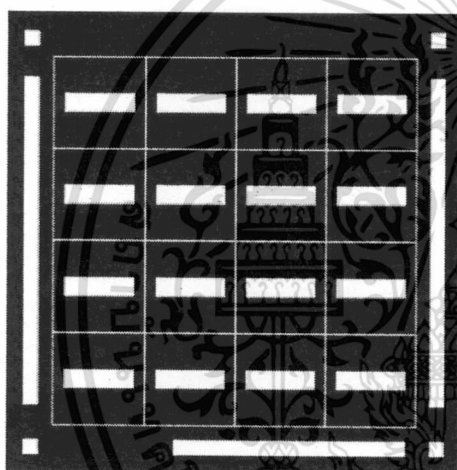
ในส่วนนี้เราจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนซ์แบบใหม่โครงสร้างฮอลล์เพลท โดยเราจะทำการออกแบบโดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทซึ่งโครงสร้างนี้จะไม่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างเกิดขึ้นจึงทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะเกิดขึ้นเต็มที่ โดยการจำลองแบบโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท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

5.9.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

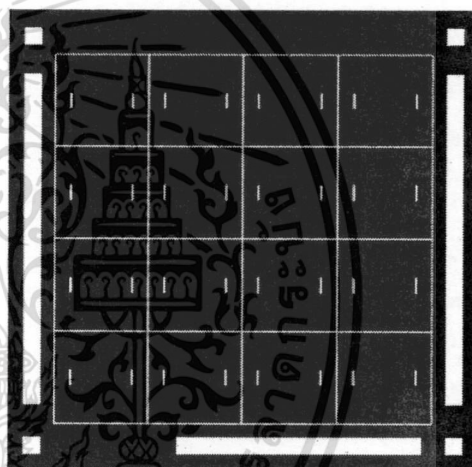
ในการออกแบบมาสก์ต้นแบบสำหรับใช้ในขั้นตอนการถ่ายแบบลงบนชิ้นงานสำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี ในกระบวนการสร้างโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทโดยจะมีมาสก์ต้นแบบอยู่ทั้งหมด 4 มาสก์ ดังต่อไปนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

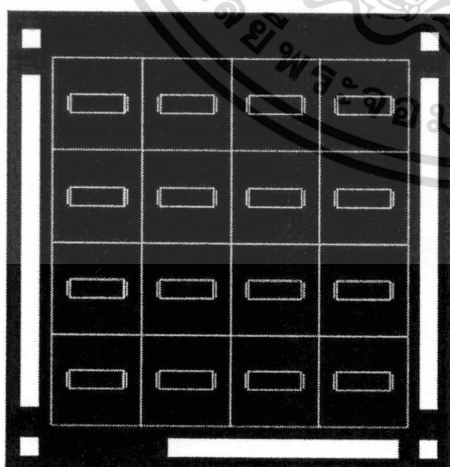
- มาส์ค 1: n-well มาส์ค (Mask # 1 n-well) แสดงดังรูปที่ 5.12(ก) เป็นมาส์คต้นแบบที่ใช้สำหรับการสร้างบ่อ n-well ขึ้นจากการแพร่สารเจือ (diffusion) ด้วยฟอสฟอรัส
- มาส์ค 2: n+มาส์ค (Mask # 2 n+) ดังรูปที่ 5.12(ข) เป็นมาส์คต้นแบบสำหรับการสร้างชั้นสารเจือชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นมากๆ จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัส
- 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)



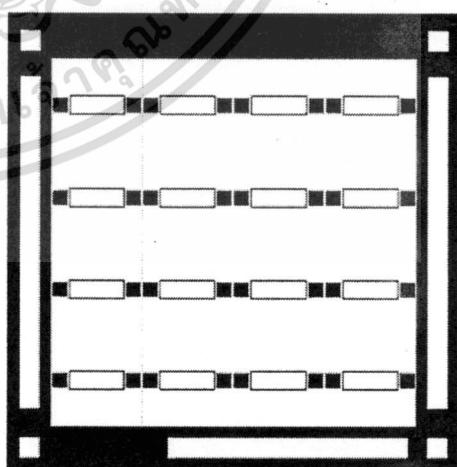
(ก) มาส์ค 1 (Mask#1 n-well)



(ข) มาส์ค 2 (Mask#2 n+)



(ค) มาส์ค 3 (Mask#3 Window)



(ง) มาส์ค 4 (Mask#4 Aluminum)

รูปที่ 5.12 มาส์คต้นแบบกระบวนการสร้างการใช้งานแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

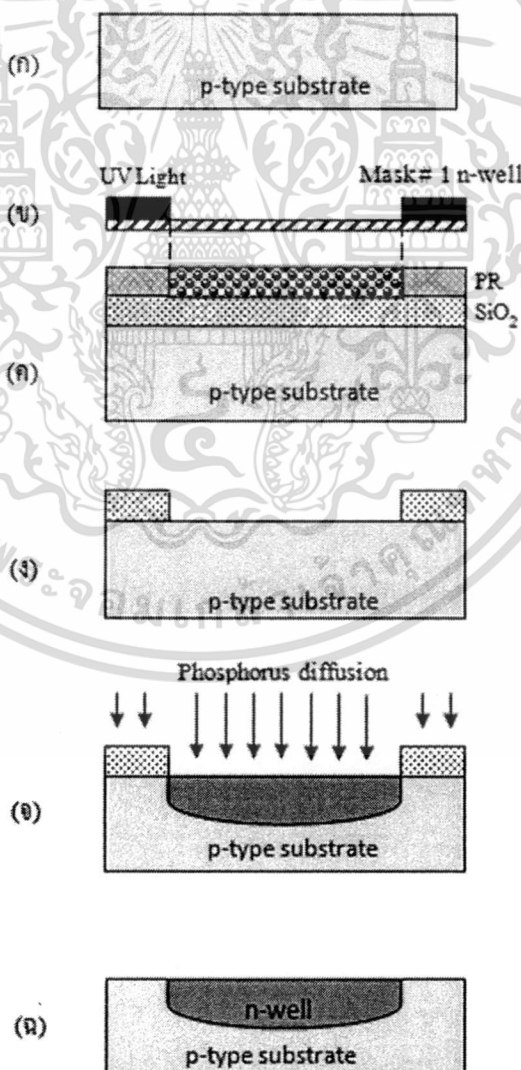
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.9.2 การสร้างโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท

ขั้นตอนกระบวนการออกแบบโครงสร้างที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทเพื่อทำลายสนามไฟฟ้าฮอลล์ทางด้านข้างของแผ่นฮอลล์เพลท 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

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแรกสำหรับการสร้างแมกนีโตรีซิสแตนท์ที่ใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลท คือ ขั้นตอนการสร้างบ่อ n-well สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5.13 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างบ่อ n-well

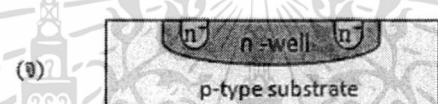
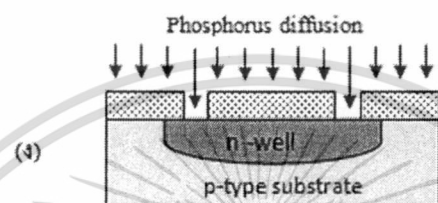
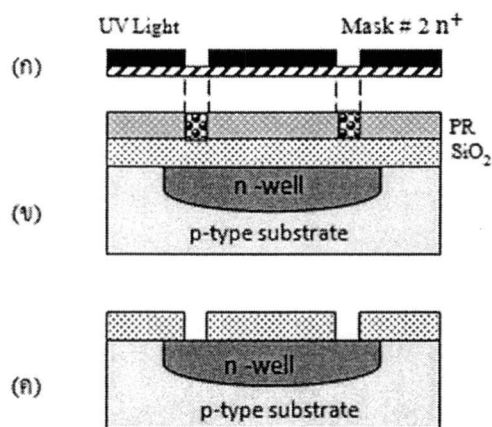
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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^+)

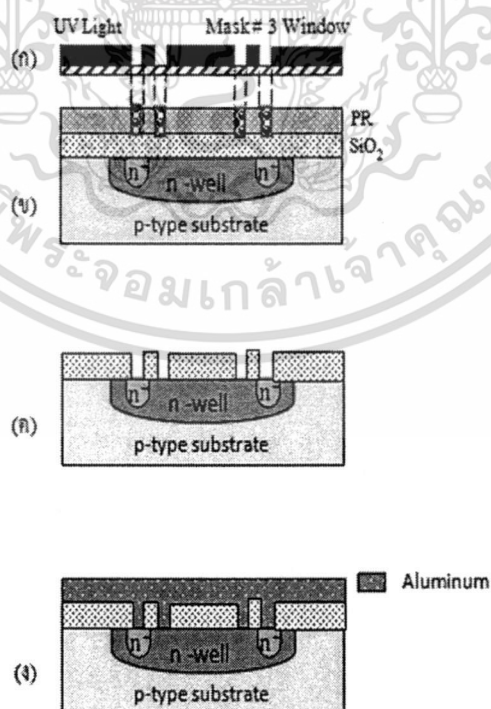
ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชั้นเอ็นที่มีความเข้มข้น (n^+) จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสเพื่อใช้ในการสร้างหน้าสัมผัสไฟฟ้าต่อไป โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

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^+ ที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสูงดังรูปที่ 5.14 (ง)
5. หลังจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสจะได้เป็นชั้น n^+ ดังรูปที่ 5.14(จ)



รูปที่ 5.14 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้น n⁺

5.9.2.3 ขั้นตอนการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายอลูมิเนียม



รูปที่ 5.15 แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนด้านการค้า

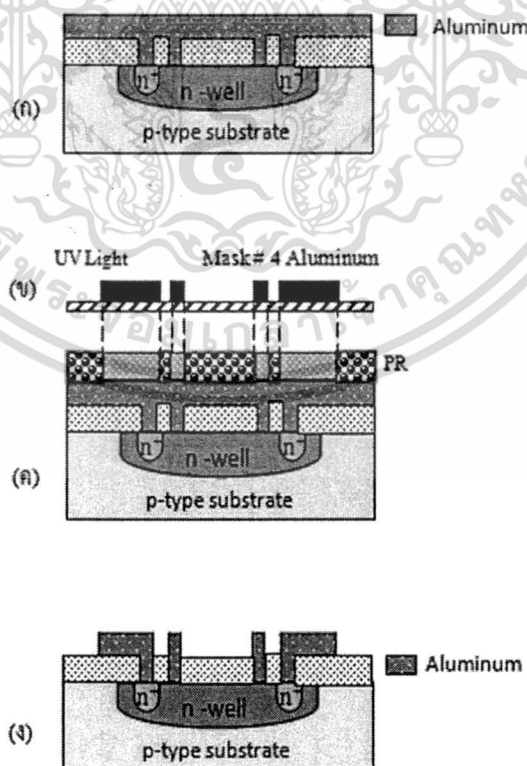
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนก่อนถึงขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตริซิสแตนท์โดยใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทคือ การเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

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

5.9.2.4 ขั้นตอนการสร้างกััดชั้นโลหะ

ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างแมกนีโตริซิสแตนท์บนโครงสร้างฮอลล์เพลทโดยการใช้วงแหวนโลหะรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เพลทคือ การกััดชั้นโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและลวดลายอลูมิเนียมที่ต้องการ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

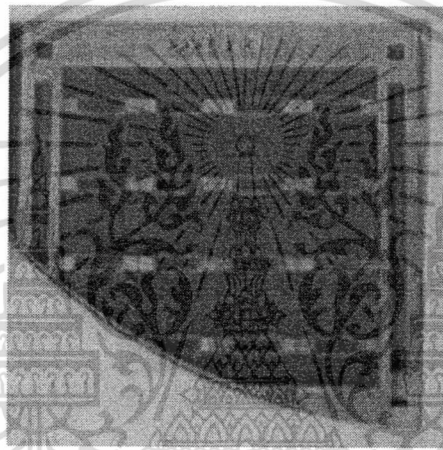


รูปที่ 5.16 แสดงขั้นตอนกระบวนการกััดชั้นโลหะเพื่อสร้างขั้วโลหะและลวดลายที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยหลังจากการกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์และทำการลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกจะทำให้ได้แผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบใหม่โดยการใช้วงแหวนอลูมิเนียมรูปสี่เหลี่ยมล้อมรอบฮอลล์เฟลทดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงโครงสร้างการอนุกรมค่าความต้านทานรวมบนโครงสร้างฮอลล์เฟลท

สรุปผลการทดลอง

โครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแส เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดกระแสที่ประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรรวมแบบโหมดกระแส โดยโครงสร้างพัฒนาต่อยอดมาจากตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบตัวต้านทานอนุกรมที่มีขั้วแยกที่ปลายด้านหนึ่งของตัวต้านทานที่สมมาตรกัน โดยใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำธรรมดาที่ไม่ใช่วัสดุสารแม่เหล็ก ทำให้สะดวกกับการใช้งานร่วมกับวงจรรวม ซึ่งการใช้งานแบบปกติของโครงสร้างแบบเก่าจะต้องอาศัยการอนุกรมตัวต้านทานจำนวนมากเพื่อที่จะให้เห็นผลการเปลี่ยนแปลงและก็ยังให้การเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าแบบที่ใช้วัสดุสารแม่เหล็กที่ทิศทางการไหลของกระแส กับสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำในวัสดุมีผลต่อค่าความต้านทานแต่อย่างไรก็ตามการใช้งานดังกล่าวมีผลตอบสนองในรูปค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง สำหรับโครงสร้างตัวต้านทานตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบแยกกระแสอาศัยการหักเหทิศทางของกระแสในตัวต้านทานที่เกิดจากแรงที่เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กตัดกับทิศทางกระแส ทำให้กระแสที่ปลายด้านที่แยกกระแสมีค่าความแตกต่างของกระแสขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านตั้งฉากกับตัวต้านทาน โดยไม่จำเป็นต้องสร้างตัวต้านทานมาต่ออนุกรมจำนวนมาก ทำให้สามารถเลือกค่าความต้านทานที่ต้องการได้โดยไม่ขึ้นกับผลตอบสนองที่ได้มากนัก แม้จากการทดลองจะมีการขึ้นแก่กันระหว่างค่าความต้านทานกับปริมาณผลตอบสนองอยู่บ้างเช่นในกรณีกรณีความยาว 200 μm ความกว้าง 100 μm ที่ค่ากระแส 0.5 mA ค่าความไวมีค่า 2.872 $\times 10^{-6}$ A/T และ 2.788 $\times 10^{-6}$ A/T ในทิศทางสนามแม่เหล็ก -Z และ Z ตามลำดับซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสมมาตร และที่กระแส 1mA มีค่าความไว 5.516 $\times 10^{-6}$ A/T และ 5.34 $\times 10^{-6}$ A/T ส่วนกรณีอุปกรณ์ความยาว 400 μm กว้าง 100 μm ค่าความไวของอุปกรณ์ที่กระแส 0.5 mA มีค่า 2.112 $\times 10^{-6}$ A/T และ 1.96 $\times 10^{-6}$ A/T และที่ 1 mA มีค่า 4 $\times 10^{-6}$ A/T และ 3.712 $\times 10^{-6}$ A/T ในทิศทาง -Z และ Z ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน อาจจะมีค่าความแตกต่างกันบ้างหรือขึ้นอยู่กัค่าความต้านทานบ้างแต่ถือว่ามีความไม่มาก ทำให้โครงสร้างแบบตัวต้านทานแบบแยกกระแสสามารถที่จะเลือกค่าความต้านทานใช้งานได้ตามต้องการและการทำงานผลตอบสนองเป็นแบบกระแสโดยตรง สามารถวัดได้ทั้งปริมาณและทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้มีความเหมาะสมที่จะใช้งานกับวงจรรวมแบบโหมดการทำงานแบบกระแส และจากการทดลองและสร้าง อุปกรณ์นี้สามารถทำงานได้เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ตามวัตถุประสงค์ซึ่งสามารถนำไปสร้างใช้งานได้ภาคอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้และหวังว่าคงจะได้รับการสนับสนุนในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] R S Popovic Swiss “Series in Sensors Hall Effect Devices Second Edition” Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)
- [2] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai “Split-current Magnetoresistor” Advanced Materials Research, Vol.739 (2013) pp. 489-492
- [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
- [12] Beer A C 1983 “Galvanomagnetic effects in semiconductors Solid State” Phys. suppl. 4, pp. 13-28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] T. Phetchakul , P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai “The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure” ECTI 2012
- [14] ประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, วิทวัส แยมวงษ์ และ อัมพร โพธิ์ไย “ผลของ แม็กนีโตรีซิสแตนซ์ในโครงสร้างของฮอลล์เพลท” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 34 (EECON-34) 30 พฤศจิกายน -2 ธันวาคม 2554 EL006 หน้า 845-848
- [15] 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
- [16] 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
- [17] 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)
- [18] 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
- [19] “Sentaurus Process Used Guide” Synopsis, Version A-2007.12, December 2007
- [20] “Sentaurus Device Used Guide” Synopsis, Version A-2007.12, December 2007
- [21] “Sentaurus Structure Editor Used Guide” Synopsis, Version A-2007.12, December 2007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300K)

คุณสมบัติทั่วไป	ซิลิคอน (Si)	เยอรมันเนียม (Ge)	แกเลียมอาร์เซไนด์ (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	5.10×10^{22}	4.42×10^{22}	4.4×10^{22}
ลักษณะโครงสร้างผลึก	Diamond	Diamond	Zincblende
จุดหลอมเหลว, : °C	1415	937	1238
ค่าคงตัวแลททิซ, 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	1.5×10^{10}	2.4×10^{13}	1.8×10^6
ความหนาแน่นสถานะที่แถบนำไฟฟ้า, N_c : cm ⁻³	2.8×10^{19}	1.0×10^{19}	4.7×10^{17}
ความหนาแน่นสถานะที่แถบวาเลนซ์, N_v : cm ⁻³	1.0×10^{19}	6.0×10^{18}	7.0×10^{18}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. T. Phetchakul , P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai “Split-current Magnetoresistor” , Advanced Materials Research, Vol. 739 (2013) pp 489-492



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Split-current Magnetoresistor

Toempong Phetchakul^{1,a}, Prateep Taisettavatkul^{1,b}, Wittawat Yamwong²
and Amporn Poyai²

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

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

^akptoempo@kmitl.ac.th, ^bpr_prateep184@hotmail.com

Keywords: Hall Effect, Current mode, Magnetic resistor, TCAD

Abstract. The split-current magnetoresistor is proposed here. The structure likes the series magnetoresistor that one end split into two symmetrical terminals, so it is the magnetoresistor with three terminals. It uses the Hall effect current mode as magnetoresistor but the output is the differential current instead of resistance. It shows good linearity and can detect the magnetic field direction. The sensitivity in the differential current of width 100 μm and length 200 μm at 1 mA is 2.788×10^{-6} A/T constantly while the conventional one in the differential resistance is varied with magnetic field. It is made of silicon non magnetic material so it is compatible with the modern low-voltage current-mode integrated circuit.

Introduction

Modern integrated circuits have been developed for low-power consumption and low supplied voltage that causes IC has to be processed in current mode [1]. The devices that use in this work should be operated in current signal instead of voltage signal. The sensor device converts the natural environment energy into electrical signal, current and voltage, and will be processed further. Magnetic sensors that use the magnetogalvanic effect are popular in magnetic devices [2-4]. The most popular one should be Hall device that induce Hall voltage from the magnetic field to balance the Lorentz's force but it is the voltage mode devices. There is also the current mode Hall effect device, magnetoresistor that use the Lorentz's force deflect the current cause the resistance change [5]. The structure is designed the very large aspect ratio width/length in series resistance for less imbalance induced Hall voltage against the Lorentz's force but the output is the resistance form that is not suitable for current mode processing.

This research proposes the split-current magnetoresistor that gives the differential current output. The structure is designed for current difference output via one side symmetrical split-terminals of resistor. The series resistor with high aspect ratio of width per length is used for bending the current by Lorentz's force is the same as conventional device. Changing the output form make it better such as the linearity and can detect the direction of magnetic field that both magnetic and non magnetic material magnetoresistance can not do it. It is compatible to modern current-mode integrated circuits. They are studied by Sentaurus TCAD program [6].

Structure

The structure of split-current magnetoresistor can be shown in Fig. 1. The structure is the series of resistor connected by aluminum strip. The total width W of device is 100 μm and the total length L are designed in two difference values 200 and 400 μm . The width between aluminum is 10 μm . The cross section in Fig. 1b shows that even though the resistors are series by aluminum strip but in the real device aluminum is deep into the surface only 0.5 μm that is in accordance with the standard process. The terminals of one side of resistor are separated symmetrically for output differential current and the other side in the same as normal resistor. The high aspect ratio resistor is for Hall effect current mode of operation that Lorentz's force is grater than induced Hall electric force.

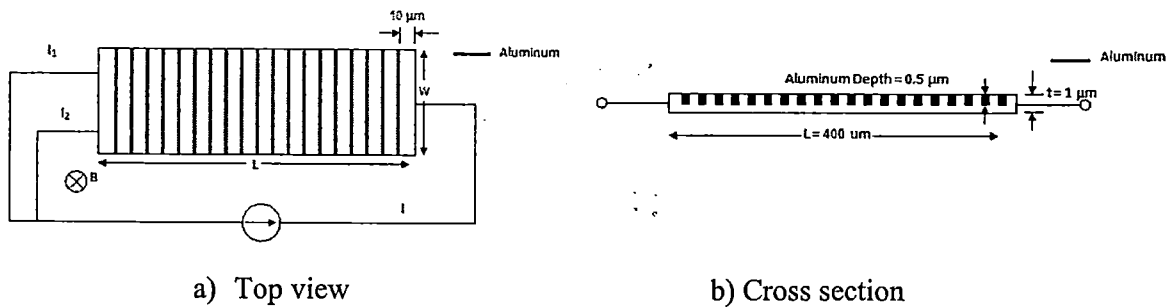


Figure 1 Structure of split-current magnetoresistor.

Experiment and results

The measurement circuit used in this experiment is shown in Fig. 2. The constant source forces the resistance to control amount of injected carriers that independence of magnetic field modulation. The current I is divided in two equal parts I_1 and I_2 . The magnetic field is applied perpendicular to the resistance surface. The output responses are the differential current between I_1 and I_2 that is $I_1 - I_2$.

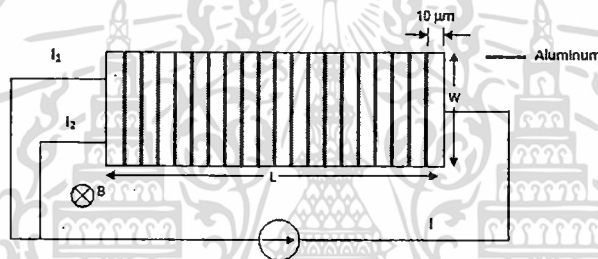


Figure 2 Measurement circuit.

Figure 3 shows the current line of bias current. Figure 3a shows the current line at no magnetic field condition. It shows the straight line of current along the distance. The current density can be observed by the color shade at the end of split-terminals which show the same current density. Figure 3b shows the current when applied magnetic field 3 T in $-Z$ direction. In this case, the Lorentz's force is induced upon the carriers in Y -direction. Now the current line deviates in Y -direction. The current density I_2 is greater than I_1 by observing the color shade at terminals. Figure 3c shows the current line when applied magnetic field 3 T in Z -direction. The Lorentz's force is induced upon the carriers in $-Y$ -direction. The current line deviates in $-Y$ -direction. Now the current density I_2 is less than I_1 by observing the color shade at terminals.

Figure 4 shows the output responses in the form of differential current ($I_2 - I_1$) versus magnetic field. Figure 4a shows the result of split-current magnetic resistor length $200 \mu\text{m}$ and width $100 \mu\text{m}$. It shows good linearity that conventional magnetic resistance does not. When the applied magnetic field reverses the direction, the output shows the same with the reverse direction. It means that this device can detect the direction of the field that conventional one cannot. The sensitivities at 0.5 mA are $2.872 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ and $2.788 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ at $-Z$ and Z direction respectively and at 1 mA are $5.516 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ and $5.34 \times 10^{-6} \text{ A/T}$. Figure 4b shows the output responses of device length $400 \mu\text{m}$ and width $100 \mu\text{m}$. The output shows the same tendency with the sensitivities at 0.5 mA are $2.112 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ and $1.936 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ and at 1 mA are $4 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ and $3.712 \times 10^{-6} \text{ A/T}$ in $-Z$ and Z direction respectively. The sensitivity both direction are nearly the same. The high current bias increases the amount of deflection carrier reflected in the higher sensitivity. Increasing bias current twice, sensitivity nearly increases twice. The increase in resistance tends to decrease the sensitivity but is not linear dependency.

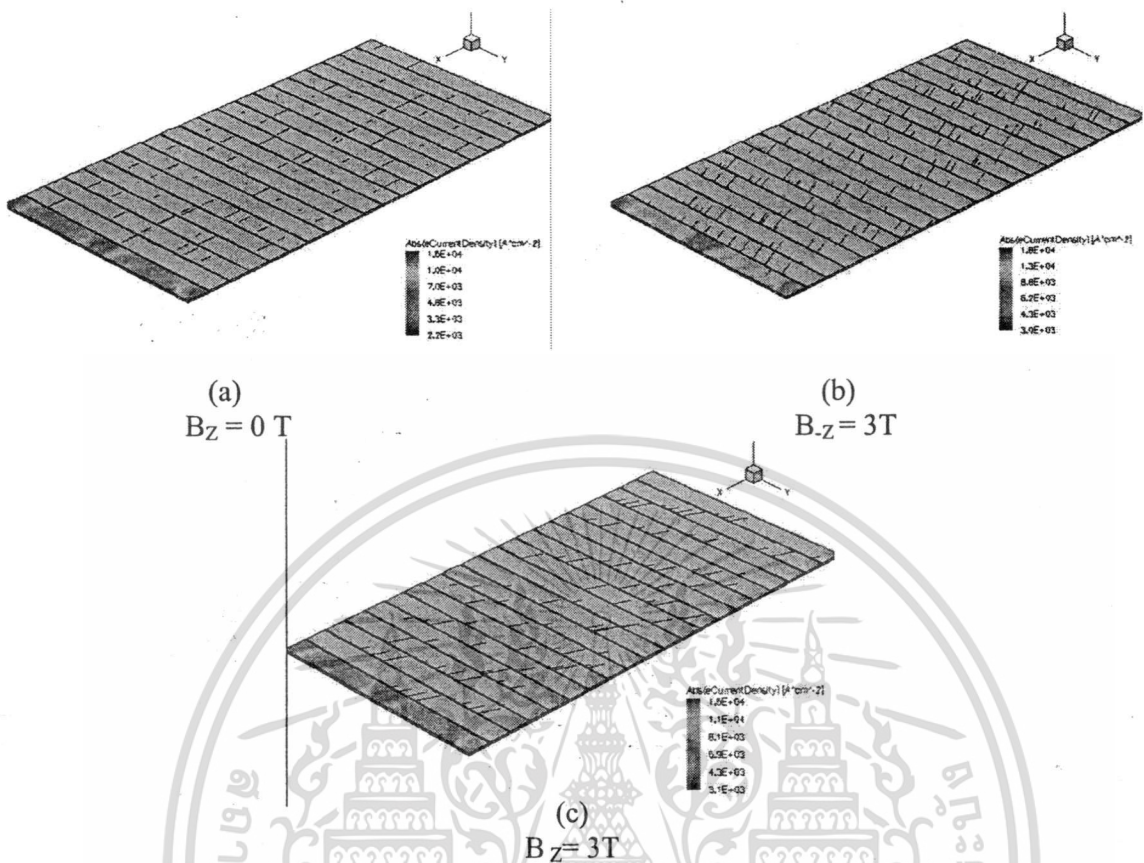


Figure 3 Simulation results of current line of split-current magnetic resistor.

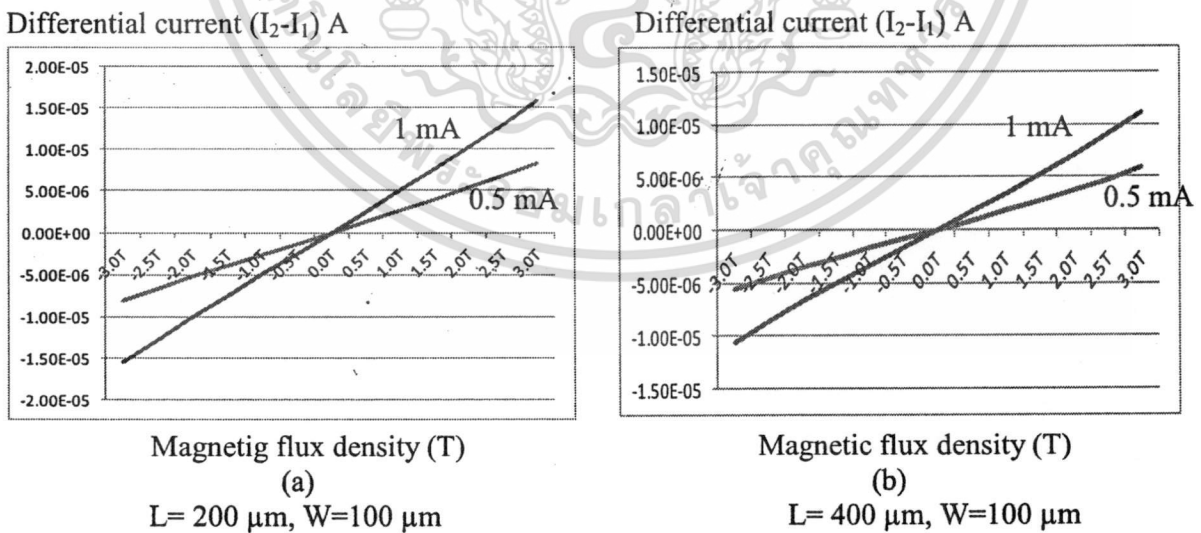


Figure 4 Simulation results of split-current magnetic resistor, bias currents are 0.5, 1 mA.

Conclusions

The split-current magnetic resistor is proposed and studied for magnetic current-mode sensor. The structure is two terminals series magnetic resistor that split one side in two equal terminals for differential current output. The deflection current from Lorentz's force is linearly depended on the magnetic flux density. The deflection current from Lorentz's force is linearly depended on the magnetic flux density.

magnetic flux density. The devices can detect both in quantity and direction of field which is so far difference from magnetic resistance that is very nonlinearly and cannot detect the direction. The bias current can increase the number of carrier deflection reflected directly to sensitivity. This device is fabricated with silicon that is not ferromagnetic material which operates in current mode fully. It is suitable for modern current mode integrated circuit.

Acknowledgement

The authors would like to thank Faculty of Engineering of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial support. We would like to thank microelectronic laboratory at electronics department, faculty of engineering KMITL and Thai Microelectronics center of NECTEC for Sentaurus TCAD simulation program.

References

- [1] F. Toumazou and D. Haigh: Analog IC Design; The current-Mode Approach, Peter Peregrinus Ltd., London (1990).
- [2] J. Lenz and A. Edelstein: Magnetic Sensors and Their Application, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 6, No. 3 (2006).
- [3] C. Roumenin: Handbook of Sensors and Actuator 2: Solid State Magnetic Sensors, Elsevier Science, Amsterdam (1994).
- [4] M. Epstein: Hall effect devices, IEEE Transaction on Magnetic, 3 (1967).
- [5] T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai,: The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure, 9th International conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON), (2012).
- [6] TCAD Sentaurus Manual, Synopsis, Version A-2007.