



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบที่เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดและการสร้างอุปกรณ์ไดโอด
ตรวจจับสนามแม่เหล็กประสิทธิภาพสูง
Optimized Design and Fabrication of Magnetodiode for
High Efficiency Magnetic Sensor

นายเดิมนพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบที่เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดและการสร้างอุปกรณ์ไดโอด
ตรวจจับสนามแม่เหล็กประสิทธิภาพสูง
Optimized Design and Fabrication of Magnetodiode for
High Efficiency Magnetic Sensor

นายเต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)การออกแบบที่เอื้อใจที่เหมาะสมที่สุดและการสร้างอุปกรณ์ไดโอดตรวจจับ
.....สนามแม่เหล็กประสิทธิภาพสูง.....

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน.....

ประจำปีงบประมาณ..... 2560..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 475,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่..... 1 ตุลาคม 2559..... ถึง..... 30 กันยายน 2560.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอุปกรณ์แมกนีโตไดโอดแบบใหม่แตกต่างจากแบบที่เคยมีมาก่อนหน้านี้ อุปกรณ์มีโครงสร้างเป็นไดโอดรอยต่อพีเอ็นสองตัวขนานกันโดยขั้วหนึ่งใช้ชั้นสารกึ่งตัวนำร่วมขึ้นเดียวกัน และอีกขั้วหนึ่งของไดโอดแยกจากกันซึ่งถูกเรียกว่าแมกนีโตไดโอดแบบคู่ การทำงานใช้แรงลอเรนซ์เบี่ยงเบนกระแสทำให้เกิดความแตกต่างกระแสที่ขั้วแยกตามความเข้มสนามแม่เหล็ก การออกแบบขั้วแยกทำบนชั้นสารกึ่งตัวนำโอมมิคที่แยกจากกัน ทำให้เกิดการสูญเสียของอุปกรณ์ การศึกษานี้เสนอการออกแบบแบบใหม่ที่ทำให้ไร้ช่องว่าง โดยใช้ชั้นสารเดียวกันแต่มีคอนแทกแยกจากกันเพื่อเป็นช่องกระแสไหลเข้าหรือออก การออกแบบนี้จะลดผลการสูญเสียและทำให้อุปกรณ์มีความไวสูงสุด นอกจากนั้นได้ทำการศึกษากลไกกระแสของอุปกรณ์ขณะได้รับสนามแม่เหล็ก ซึ่งพบว่า นอกจากกระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยที่ผิดจากขั้วร่วมไปยังขั้วแยกที่ถูกเบี่ยงเบนแล้ว ยังมีกระแสรีพาหะส่วนมากจากขั้วแยกตรีฟไปยังขั้วร่วมซึ่งเป็นพาหะคนละชนิดจะถูกเบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกัน ผลของกระแสทั้งสองของไดโอดทำให้ได้ค่าความไวสุทธิของอุปกรณ์

คำสำคัญ : แมกนีโตไดโอด; เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก; แรงลอเรนซ์; รอยต่อพีเอ็น; กระแสไดโอด; TCAD

Research Title: Optimized Design and Fabrication of Magnetodiode for High Efficiency
Magnetic Sensor

Researcher:.....Toempong Phetchakul.....

Faculty:Engineering.....Department:Electronics.....

ABSTRACT

This research studies the new magnetodiode device, which is different from the previous classical one. The device is structured as a pair of two diodes parallel to each other by one terminal using the same semiconductor element and one of the diodes is a separate terminal, which is called a dual magnetodiode. The operation uses Lorentz's force deviates current causes a current difference at the separate terminals depend on magnitude and direction of magnetic field. The general design is made on separate ohmic semiconductor regions which has a gap between separate terminals. It causes some loss of device. This study proposes a new design that makes the gapless by using the same ohmic semiconductor material, but with an inner separate contact for current flow in or out. This design minimizes loss and maximizes device sensitivity. In addition, the device current was studied for the magnetic field. It was found that in spite of minority diffusion currents injected from the common terminal to the separate terminals, there is also a drift majority drift current from the separate terminals to the common terminal. Each carrier is deviated in the same direction by Lorentz's force. The effect of both currents of the diode results in the total sensitivity of the device.

Keywords : Magnetodiode; Magnetic sensor; Lorentz's force; pn junction; Diode current; TCAD

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไธ ผู้อำนวยการศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการเอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือวิจัย ขอขอบคุณคุณอนุชา เรืองพาณิชย์ ในการดูแลการสร้างและบรรจุอุปกรณ์ ขอขอบคุณคุณรัฐพงศ์ นาคาศัย คุณสวัสดีพงษ์ พูนสวัสดิ์ และคุณชลินทร์ สุทธิเนตร ในการมีส่วนร่วมการวิจัยครั้งนี้



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 อุปกรณ์ฮอลล์.....	9
2.1.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์.....	9
2.1.2 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส.....	15
2.1.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์.....	20
2.2 แมกนีโตไดโอด.....	23
2.2.1 ปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอด.....	23
2.2.2 โครงสร้างและเทคโนโลยี.....	25
บทที่ 3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD.....	27
3.1 Sentaurus TCAD.....	27
3.1.1 Sentaurus Workbench.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 Sentaurus Visual.....	29
3.1.3 Sentaurus Structure Editor.....	30
3.1.4 Sentaurus Device.....	33
3.2 แบบจำลองทางฟิสิกส์สำหรับการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์.....	37
3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	53
บทที่ 4 กระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบคู่และเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง.....	55
4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน.....	55
4.2 ทำความสะอาดผิวหน้า.....	55
4.3 กระบวนการออกซิเดชัน.....	56
4.3.1 การออกซิเดชันแบบชั้น.....	57
4.3.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง.....	58
4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	58
4.4.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์.....	60
4.4.2 การเคลือบสารไวแสง.....	60
4.4.3 วิธีการเคลือบ.....	61
4.4.4 การอบชั้น.....	63
4.4.5 การปรับชั้นมาสค์.....	63
4.4.6 การฉายแสง.....	64
4.4.7 การล้างน้ำยาไวแสง.....	64
4.4.8 การอบชั้น Hardbake.....	64
4.4.9 การกัด.....	65
4.4.10 การลอกน้ำยาไวแสง.....	65
4.5 กระบวนการแพร่สารเจือ.....	65
4.5.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....	66
4.5.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....	67
4.6 กระบวนการแพร่สารเจือ.....	67
4.7 กระบวนการสร้างเมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7.1 การออกแบบมาตรฐาน.....	69
4.7.2 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....	70
4.7.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์.....	70
4.7.4 ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างขั้วแคโทด.....	72
4.7.5 ขั้นตอนการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างขั้วแอโนด.....	72
4.7.6 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ.....	74
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	78
5.1 โครงสร้างอุปกรณ์และการออกแบบ.....	78
5.2 การทดลองและผลการจำลองแบบ.....	80
5.3 กลไกการทำงาน.....	84
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก บทความวิจัยที่ตีพิมพ์.....	92
ภาคผนวก ข สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	99
ประวัตินักวิจัย.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ bandgap narrowing สำหรับวัสดุซิลิคอน.....	39
3.2 ตารางที่ 3.2 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับโมเดลของ Masetti.....	41
3.3 ตารางที่ 3.3 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่.....	42
3.4 ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของโมเดล Conwell-Weisskopf สำหรับซิลิคอน.....	42
3.5 ตารางที่ 3.5 ตัวแปรของโมเดล Canali (ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอน).....	43
3.6 ตารางที่ 3.6 ตัวแปรการอิมิต์ของความเร็ว.....	44
3.7 ตารางที่ 3.7 ค่าตัวแปรมาตรฐานของช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับการเจือสาร.....	46
3.8 ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานของตัวแปรสำหรับช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	47
3.9 ตารางที่ 3.9 ตัวแปรของโมเดลการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH.....	52

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เซ็นเซอร์ประเภทต่างๆ.....	6
2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n.....	10
2.3 แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาว.....	14
2.4 แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน.....	16
2.5 แผ่นคอร์บิโนเป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลม.....	17
2.6 แผนภาพของสมการเวกเตอร์ (2.19), (2.21) และ (2.23).....	19
2.7 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นที่ถูกป้อนด้วยแรงดันคงที่.....	20
2.8 เส้นความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวในเนื้อสาร.....	23
2.9 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวในเนื้อสาร.....	24
2.10 แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวที่พื้นผิว.....	25
2.11 แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวที่ผิวโดยใช้เทคโนโลยี SOS.....	25
2.12 แมกนีโตไดโอดที่รอยต่อพีเอ็นได้รับไบอัสกลับทางทำให้เกิดพื้นผิวการรวมตัวสูง.....	26
3.1 ชุดเครื่องมือของ Sentaurus TCAD.....	28
3.2 Sentaurus Workbench บริเวณ Tool Flow.....	29
3.3 Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .plt.....	30
3.4 Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .tdr.....	30
3.5 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor.....	31
3.6 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor.....	32
3.7 Sentaurus Structure Editor.....	33
3.8 ผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตของ Sentaurus Device.....	34
3.9 มิติโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคาโทดแยกในการจำลองแบบ.....	53
3.10 มิติโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบอานอดแยกในการจำลองแบบ.....	54
4.1 ลำดับขั้นตอนเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	55
4.2 กระบวนการเกิดขึ้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน.....	57
4.3 กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น.....	57
4.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	58
4.5 ขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process.....	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.6 คุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด.....	60
4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์.....	62
4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์.....	62
4.9 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อขั้วอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก.....	68
4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator.....	69
4.11 (ก)-(ฉ) ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์.....	71
4.12 (ก)-(ข) ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างขั้วแคโทด.....	72
4.13 (ก)-(ฉ) ขั้นตอนการสร้างขั้วแอโนด.....	73
4.14 (ก)-(ง) ขั้นตอนการเปิดช่องสร้างขั้วโลหะ.....	74
4.15 กระบวนการสร้างขั้วชั้นโลหะ.....	75
4.16 แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน.....	76
4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ทำการขยายสัดส่วน.....	77
4.18 การเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งาน.....	77
5.1 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	79
5.2 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบไร้ช่องว่าง.....	80
5.3 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกนีโตไดโอดแบบคู่คาโทดแยก.....	81
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก B.....	82
5.5 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกนีโตไดโอดคู่แอโนดแยก.....	83
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างกระแสคาโทดกับสนามแม่เหล็กของไดโอดแบบคาโทดแยก.....	84
5.7 การเลี้ยวเบนของคัพระกอบกระแสของไดโอดคู่คาโทดแยก.....	85
5.8 การเลี้ยวเบนของคัพระกอบกระแสแบบแอโนดแยก.....	86
5.9 การเปรียบเทียบการกระจายกระแสของโครงสร้างไดโอดคู่แบบคาโทดแยก.....	86

บทที่ 1

บทนำ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการที่ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดใหม่คือแมกนีโตไดโอดแบบคู่ โดยใช้โครงสร้างไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในวงจรรวม ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาของปัญหาวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ขอบเขตโครงการวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย สมมุติฐานงานวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยโดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จากการศึกษาและวิจัยด้านอุปกรณ์เซนเซอร์แบบใหม่มาโดยตลอด โครงสร้างแมกนีโตไดโอดหรือไดโอดตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ผู้วิจัยได้ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้นมีข้อดีกว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์คือ มีการใช้งานที่ง่ายกว่า มีโครงสร้างที่สมมาตร สร้างได้ง่ายกว่าและต้นทุนต่ำกว่า ทำให้การนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆสามารถทำได้ง่ายกว่าแมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอย่างมาก และคาดว่าจะ เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่เหมาะสมในการเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบใหม่ในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ดังกล่าวยังมีการสูญเสียอยู่ ทั้งนี้เพราะปัจจัยในการออกแบบยังไม่เป็นที่ยุติในการที่จะค้นพบเงื่อนไขที่ดีที่สุด ปัจจัยการออกแบบที่สำคัญได้แก่ 1. พื้นที่หน้าตัดการฉีดพาหะหรือกระแส และ 2. ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทด จากสองปัจจัยหลักนี้เองทำให้เกิดปัญหาการสูญเสียเกิดขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ยังไม่เป็นเงื่อนไขอุดมคติ ทำให้การใช้งานยังมีข้อจำกัดอยู่

มีความเป็นไปได้อย่างยิ่งที่สามารถจะทำปัจจัยการออกแบบดังกล่าวให้ได้เงื่อนไขในอุดมคติด้วยเหตุผลเพราะว่าปัจจัยดังกล่าวเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นเราสามารถศึกษาแต่ละปัจจัยได้อย่างอิสระโดยมุ่งไปสู่ค่าที่เป็นอุดมคติของแต่ละปัจจัยแล้วนำมาประกอบรวมกันให้เป็นการออกแบบเดียว โดยแต่ละปัจจัยการออกแบบจะทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้วยตัวเอง การผสมผสานค่าอุดมคติทั้งสองทำให้ประสิทธิภาพ (การกินพลังงาน ความไวอุปกรณ์ การแปลงแม่เหล็กไปเป็นปริมาณไฟฟ้า) ของอุปกรณ์เข้าสู่อุดมคติ และเป็นค่าสูงสุดเพียงค่าเดียวที่อุปกรณ์จะสามารถเป็นได้

การหาเงื่อนไขอุดมคติในการออกแบบทำให้การออกแบบอุปกรณ์มีได้เพียงเงื่อนไขเดียว ไม่ขึ้นกับเทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น เทคโนโลยีที่เล็กกว่าไมโครเมตรที่เรียกว่า ซับไมครอน (sub-micron) เป็นเทคโนโลยีที่เล็กลงได้เรื่อยๆ จนกว่าจะถึงขีดจำกัดทางกายภาพของวัสดุ ทำให้การออกแบบ หรือปัจจัยการออกแบบต้องเล็กลงตามเทคโนโลยี แต่การออกแบบเงื่อนไขอุดมคติจะทำให้การออกแบบมีรูปแบบเดียวไม่แปรตามค่าจำกัดของเทคโนโลยี ทำให้ง่ายต่อการออกแบบที่ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์ในทุกเทคโนโลยีรวมทั้งข้ามเทคโนโลยี เช่นนาโนเทคโนโลยีซึ่งเป็เทคโนโลยีที่แตกต่างจากไมโครเทคโนโลยี ก็สามารถใช้นเงื่อนไขการออกแบบเดียวกันและได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์ที่สามารถเป็นไปได้ซึ่งอาจมีการผันแปรได้บ้าง แต่โดยหลักการจะเป็น

เพียงเล็กน้อยที่เกิดจากผิดพลาดจากกระบวนการการสร้างอุปกรณ์จริง ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์นี้ออกแบบและสร้างได้ง่าย และจะเป็นอุปกรณ์แอกทีฟที่ตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่สมบูรณ์ ซึ่งโครงสร้างไดโอดเป็นโครงสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีไมโครหรือเทคโนโลยีนาโนที่สามารถสร้างรอยต่อพีเอ็นก็สามารถที่จะสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบสนามแม่เหล็กนี้ได้ งานวิจัยนี้สามารถตอบปัญหาความหลากหลายในการออกแบบ ปัจจัยที่ดีที่สุดของการออกแบบ รูปแบบการออกแบบ เทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของอุปกรณ์ที่สามารถทำได้ทุกเทคโนโลยีและมีค่าเดียวกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.สร้างนวัตกรรมอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจสอบสนามแม่เหล็กโครงสร้างไดโอด
- 2.ต่อยอดงานวิจัย ประยุกต์และบูรณาการความรู้และศักยภาพภายในประเทศ
- 3.ผลิตนักศึกษาในสาขาเซนเซอร์อุตสาหกรรมระดับปริญญาเอก
- 4.นำงานวิจัยเผยแพร่ในรูปบทความและการประชุมวิชาการนานาชาติ
- 5.นำไปสร้างและใช้งานเชิงพาณิชย์ร่วมกับศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต่อภาคอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาการออกแบบที่ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด ทำการจำลองแบบ นำไปสร้างอุปกรณ์จริง วัดทดสอบอุปกรณ์จริง เผยแพร่ผลงานสู่สาธารณะ

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.รวบรวมศึกษาข้อมูลเพื่อนำไปสู่การออกแบบ
- 2.สำรวจและเตรียมความพร้อมประสานงาน
- 3.ออกแบบและจำลองแบบเบื้องต้นและแก้ไข
- 4.นำแบบที่ได้ไปสร้างไฟได้มากส์
- 5.ทำการสร้างต้นแบบในห้องปฏิบัติการ
- 6.วัดและทดสอบอุปกรณ์ด้วยแม่เหล็ก
- 7.นำข้อมูลมาประมวลและสรุป
- 8.เผยแพร่ผลงานวิจัย
- 9.สรุปและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

อุปกรณ์เซนเซอร์แม่เหล็กแบบไดโอดที่คิดประดิษฐ์ขึ้นนี้มีความแตกต่างจากอุปกรณ์ไดโอดที่ตรวจจับแม่เหล็กทั่วไป คือใช้โครงสร้างไดโอดคู่ที่มีขั้วอาโนดรวมกันและมีขั้วคาโทดแยกกัน ใช้หลักการทำงานโดยอาศัยการเหนี่ยวนำแรงจากสนามแม่เหล็กกระทำต่อกระแสพาหะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนกระแสทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสที่ขั้วคาโทดทั้งสอง(ΔI_D)แปรค่าอย่างเชิงเส้นตามความเข้มสนามแม่เหล็ก ทิศทางของสนามแม่เหล็กบอกได้จากค่าบวกหรือค่าลบของความแตกต่างกระแส การทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้ดีมาก ใช้งานง่าย สร้างง่าย มีความทนทาน ให้ค่าความไวของอุปกรณ์สูง แต่อย่างไรก็ตามยังมีการสูญเสียในโครงสร้างเนื่องจากการออกแบบอยู่ จึงทำให้ประสิทธิภาพคือการกินพลังงาน และการแปลงพลังงานแม่เหล็กไปเป็นพลังงานไฟฟ้ายังไม่สามารถทำได้สูงสุด และแปรตามการออกแบบและเทคโนโลยีที่ใช้สร้างอุปกรณ์

จากการทำงานและโครงสร้างอุปกรณ์ รวมถึงอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กอื่น ๆ ที่ใช้หลักการทำงานในลักษณะนี้ จะต้องมีตัวแปรในการออกแบบหลักสองประการคือ 1. พื้นที่หน้าตัดการฉีดพาหะที่ทำให้เกิดกระแส และ 2. ระยะห่างระหว่างขั้วเอาน์พุททั้งสอง เพราะปัจจัยทั้งสองนี้ทำให้โครงสร้างไดโอดสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทำให้มีความแตกต่างจากอุปกรณ์ไดโอดทั่วไปที่ใช้จานเรกติไฟร์ซึ่งไม่สามารถนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กได้

จากตัวแปรในการออกแบบอุปกรณ์ไดโอดเพื่อให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ก็เป็นตัวแปรหรือปัจจัยเดียวกันที่ทำให้เกิดการสูญเสียของอุปกรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดลง

1) ตัวแปรพื้นที่หน้าตัดการฉีดพาหะทำให้เกิดกระแสจากอาโนดไปยังคาโทดเกิดการสูญเสียของกระแสบางส่วน แม้กระแสพาหะทุกตัวจะถูกเลี้ยวเบนจากแรงที่เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กก็ตามแต่สุดท้ายก็ไม่สามารถแปลงไปเป็นความแตกต่างกระแสเอาน์พุทได้ (ΔI_D) ทำให้กระแสอุปกรณ์ปริมาณหนึ่งเป็นกระแสสูญเสียไปคือไม่สามารถแปลงเป็นปริมาณเอาน์พุทได้ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์และทำให้การแปลงปริมาณแม่เหล็กไปเป็นปริมาณไฟฟ้าไม่เต็มประสิทธิภาพ

2) ตัวแปรระยะห่างระหว่างขั้วคาโทด เป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดเอาน์พุท แต่อย่างไรก็ตามเพราะระยะห่างนี้เองทำให้มีปริมาณกระแสบางส่วนแม้จะมีการเลี้ยวเบนของพาหะ แต่ในที่สุดไม่สามารถทำให้เกิดค่าความแตกต่างกระแสเอาน์พุทจากขั้วคาโทดทั้งสองได้ ทำให้มีกระแสบางส่วนสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเราสามารถให้การออกแบบทำให้ปัญหาดังกล่าวหมดไปได้ทุกประเด็น โดยพื้นที่หน้าตัดการฉีดกระแสพาหะที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จะลดผลการสูญเสียลงซึ่งการทำให้เล็กลงนั้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการสร้างเป็นตัวกำหนด แต่เราจะให้การออกแบบค่าในอุดมคติโดยให้พื้นที่นี้มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นจุด (Point) ทำได้จากเทคนิคการออกแบบและสามารถสร้างได้ในทุกเทคโนโลยีไม่จำเป็นจะต้องเป็นนาโนเทคโนโลยี ประเด็นระยะห่างระหว่างคาโทดซึ่งเป็นปัญหาคลายกับพื้นที่หน้าตัด โดยระยะห่างนี้ถ้ามีขนาดเล็ก

ลงการสูญเสียก็จะน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้สร้างซึ่งเราสามารถทำให้เป็นศูนย์ได้คือ เป็นขึ้นเดียวกันโดยเทคนิคการออกแบบ โดยใช้การออกแบบแยกกระแสที่ช่องคอนแท็ค แทน ซึ่งจะทำให้ทุก เทคโนโลยีสามารถทำได้ ทั้งนี้ด้วยเทคนิคการออกแบบเช่นเดียวกัน

จากหลักการที่กล่าวมาเราสามารถใช้ออกแบบอุปกรณ์กับหลักการทำงานและโครงสร้างเดิมทำให้ อุปกรณ์มีการเข้าถึงประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยการออกแบบที่เงื่อนไขทางอุดมคติเพียงรูปแบบเดียว โดยไม่ขึ้นกับ เทคโนโลยี และสามารถทำอุปกรณ์ทำงานด้วยการเสียดสีของกระแสพาหะแต่ไม่ต้องขึ้นกับระยะเวลาการ เสียดสีอีกต่อไปซึ่งจะทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กตามเทคโนโลยีที่สร้างได้ หลักการการ ออกแบบนี้สามารถนำไปใช้กับการออกแบบอุปกรณ์อื่นๆได้ทั้งหมด

1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบไดโอดเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็กประเภทหนึ่ง แรกเริ่มเดิมทีมีผู้ คิดค้นโดยโครงสร้างครั้งแรกเป็นแบบฟิล์มบาง อาศัยการรวมตัวของพาหะที่พื้นผิวที่มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่ แตกต่างกันอย่างมาก อุปกรณ์นี้ไม่เป็นที่นิยม มีข้อเสียในการควบคุมพื้นผิวให้มีอัตราการรวมตัวของพาหะที่ แน่นนอนในการสร้างในแต่ละครั้ง ผู้วิจัยได้วิจัยและเสนอโครงสร้างไดโอดตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยมีโครงสร้างเป็นไดโอดคู่ที่มีอาโนดร่วมกันและมีคาโทดแยกกันเป็นครั้งแรก อุปกรณ์นี้มีโครงสร้างเหมือนไดโอดธรรมดา สร้างง่ายให้อาชีพที่ตี มีความเป็นเชิงเส้นสูง และยังเป็นอุปกรณ์ที่มีความสมมาตรทำให้ประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อบกพร่องอยู่บ้าง คือการสูญเสียของอุปกรณ์ซึ่งเกิดขึ้นโดยปกติกับอุปกรณ์ทุกประเภท การสูญเสียนี้เกิดจากการที่กระแสของอุปกรณ์ จำนวนหนึ่งไม่สามารถผลิตเป็นเอาท์พุทได้แม้จะได้รับผลจากปรากฏการณ์ทางกายภาพจากปริมาณอินพุทที่เป็น สนามแม่เหล็กก็ตาม แต่ปัญหานี้สามารถทำให้น้อยลงได้ด้วยการลดค่าตัวแปรทางมิติบางตัว ซึ่งการลดขนาดตัวแปรทาง มิตินั้นต้องขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการสร้างเป็นหลัก ทำให้อัตราการสูญเสียแปรตามเทคโนโลยี และมีค่าที่ไม่แน่นอนคงที่ซึ่ง อุปกรณ์ใดๆก็มีแนวทางเป็นเช่นที่กล่าวนี้ทั้งหมด

จากการศึกษาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้วิจัยมองเห็นการแก้ปัญหา ดังกล่าวโดยการออกแบบอุปกรณ์ขึ้นใหม่ โดยการออกแบบมุ่งสู่ค่าเดียวคือที่ค่าที่เป็นอุดมคติ ไม่ให้ตัวแปรถูกจำกัดด้วย ข้อจำกัดทางเทคโนโลยีซึ่งสามารถพัฒนาให้เล็กลงได้เรื่อยๆ ตัวแปรที่ทำการศึกษาเป็นตัวแปรหลักของอุปกรณ์ประเภท นี้ โดยหาการออกแบบที่ให้เข้าถึงค่าอุดมคติที่มีค่าเดียว ไม่ให้เป็นค่าที่ถูกจำกัดจากเทคโนโลยีการสร้าง ด้วยเทคนิคการ ออกแบบทำให้สามารถแก้ปัญหาการสูญเสียของอุปกรณ์ โดยไม่ขึ้นกับเทคโนโลยีการสร้าง และค่าการสูญเสียจะมีค่าน้อยที่สุดที่เงื่อนไขอุดมคติ และจะเป็นการออกแบบที่ทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการแปลงพลังงานแม่เหล็ก มาเป็นไฟฟ้า และมีกระแสสูญเสียที่น้อยที่สุด และสามารถที่จะนำไปสร้างด้วยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หรือนาโน อิเล็กทรอนิกส์ก็ได้

การออกแบบนี้ทำให้ผลกระทบจากความหลากหลายในการออกแบบที่มีต่ออุปกรณ์ลงให้เหลือเพียงการออกแบบเงื่อนไขเดียวเดียวที่ทำได้ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด หลักการออกแบบที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั่วไปกับอุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องได้ เป็นวิธีการที่ทำให้การออกแบบเป็นอิสระจากเทคโนโลยี

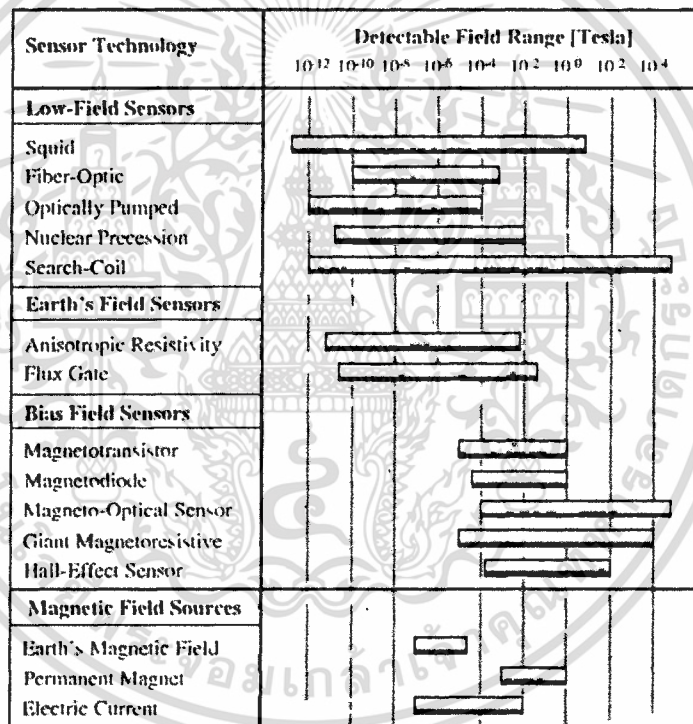
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.นวัตกรรมอุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับวัดสนามแม่เหล็กโครงสร้างไดโอด
- 2.นวัตกรรมสามารถนำผลผลิตเชิงพาณิชย์
- 3.เผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปวารสารนานาชาติ และการประชุมวิชาการนานาชาติ
4. ผลิตบัณฑิตในระดับปริญญาเอก
5. สร้างนวัตกรรมด้วยบุคลากรและศักยภาพภายในประเทศ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซ็นเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนความเข้มของสนามแม่เหล็กให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า การนำเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำไปประยุกต์ใช้งานโดยส่วนมากจะถูกนำไปใช้สำหรับวัดตำแหน่ง มุม ระยะทาง หรือ กระแสไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีคือ ทนทาน มีความน่าเชื่อถือและดูแลรักษาง่ายเมื่อเทียบกับเทคนิคการตรวจจับแบบอื่นๆ เซ็นเซอร์แม่เหล็กสามารถแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ Low-field sensor (nT), Earth's field sensor (μT), และ Bias field sensor (mT) (รูปที่ 2.1) [1]



รูปที่ 2.1 เซ็นเซอร์ประเภทต่างๆ

Low-Field Sensors

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

อุปกรณ์ที่ไวต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในกลุ่ม low-field sensor มากที่สุดก็คือ superconducting quantum interference device (SQUID) [2] โดยอาศัยการหล่อเย็นวัสดุตัวนำยิ่งยวดภายใต้การเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ ในวัสดุดังกล่าวสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าโดยไม่มีความต้านทาน และจากรอยต่อ Josephson ที่อยู่ในวงแหวนตัวนำยิ่งยวดจะทำให้กระแสเริ่มออสซิลเลตเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน ตัวเซ็นเซอร์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในระดับ 10^{-13} T

Fiber-optic magnetometer จะใช้เส้นใยแก้วสองเส้นซึ่งนำมาต่อกันแบบ Mach-Zehnder interferometer [3, 4] โดยจะมีเส้นใยแก้วหนึ่งเส้นที่ถูกเคลือบวัสดุจำพวก magnetostrictive material ซึ่งวัสดุจำพวกนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัววัสดุ เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงนี้ก็จะทำให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดที่เอาต์พุตของ interferometer ขึ้น fiber-optic magnetometer สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง 10^{-10} ถึง 10^{-3} T

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

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

Search-coil magnetometer ใช้กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ โดยการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะเหนี่ยวนำกระแสซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวด โดยทั่วไปแล้วตัวขดลวดมักจะใช้แกนเป็นวัสดุ ferromagnetic เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในระดับ 10^{-12} T ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก [6]

Earth's Field Sensors

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

ระบบนำทางแบบใช้เข็มทิศอาศัย flux gate magnetometer ซึ่งมีขดลวดที่ใช้กระตุ้นและขดลวดสำหรับวัดสัญญาณ (pick-up coil) พันอยู่รอบๆ แกนวัสดุ ferromagnetic ที่มีสภาพยอมให้แม่เหล็กซึมได้สูง (High-permeability) ผลของมันจะทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณระหว่างจุดอิมตัว สนามแม่เหล็กภายนอกจะเข้าไปรบกวนความสมมาตรของสัญญาณที่แกว่งทำให้เกิดฮาร์โมนิกที่สองขึ้นที่ขดลวดสำหรับวัดสัญญาณ ขนาดของฮาร์โมนิกที่สองจะแปรผันกับสนามแม่เหล็กที่ให้ ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง 10^{-10} ถึง 10^{-2} T [12, 13] อุปกรณ์ชนิดนี้มีทั้งแบบขนาดใหญ่ มองเห็นด้วยตาเปล่าได้ (macroscopic form) และแบบขนาดเล็กที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ [14, 15] และเมื่อเร็วๆ นี้ อุปกรณ์ชนิดนี้ได้ถูกทำขึ้นในเชิงพาณิชย์โดยใช้กระบวนการ CMOS [16]

Bias Magnetic Field Sensors

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

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

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

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

เซ็นเซอร์โจแอนท์แมกนีโตรซิสทีฟ (giant magnetoresistive sensor) จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่อาจสูงถึง 70% ซึ่งขึ้นกับสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน [27] อุปกรณ์โจแอนท์แมกนีโตรซิสทีฟประกอบไปด้วยระบบเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) และนอนเฟอร์โรแมกเนติก (non-ferromagnetic) แบบหลายชั้น ความต้านทานของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกบางๆ สองแผ่นซึ่งถูกชั้นด้วยชั้นการนำของนอนเฟอร์โรแมกเนติก สามารถถูกปรับเปลี่ยนโดยการ

เปลี่ยนแปลงแนวโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment) ของชั้นเฟอร์แมกเนติกจากที่ขนานกันแบบสวนทิศทาง (antiparallel) เป็นทิศทางเดียวกันโดยสนามแม่เหล็กภายนอก ชั้นที่มีโมเมนต์แม่เหล็กขนานกันมีความเป็นไปได้ที่จะมีการกระเจิงที่ผิวดำ ชั้นพวกนี้จะมีระยะทางก่อนการชน (mean free path) ที่ยาว ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานลดลง โดยความหนาของชั้นต้องมีค่าน้อยกว่าระยะทางก่อนการชนของอิเล็กตรอนในชั้น ซึ่งน้อยกว่า 10 นาโนเมตร [28]

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่มีการใช้ขนาดสนามแม่เหล็กที่ไม่สูงดังนั้นเช่นเซอรัฮอลล์จึงสามารถใช้แทนอุปกรณ์จางแอนแมกนีโตริซิสทีฟ [29] เซอรัฮอลล์มีความง่ายในแง่ของการใช้งานและสามารถรวมเข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ อุปกรณ์ชนิดนี้เหมาะอย่างยิ่งกับการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรซึ่งอยู่ในช่วงไม่กี่ mT หรือตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยกระแสไฟฟ้า การทำงานของมันอาศัยการเบี่ยงเบนลอเรนซ์ของพาหะซึ่งทำให้เกิดแรงดันในทิศตั้งฉากกับทิศทางกระแส เพราะฉะนั้นในการใช้งานที่ต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง mT เซอรัฮอลล์คือตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ประสิทธิภาพโดยรวม

2.1 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device)

2.1.1. ปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติก (Galvanomagnetic effect)

ปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติกทั้งหมดเป็นผลมาจากการที่แรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ในตัวกลาง แรงลอเรนซ์คือแรงที่กระทำกับอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแสดงดังสมการ

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

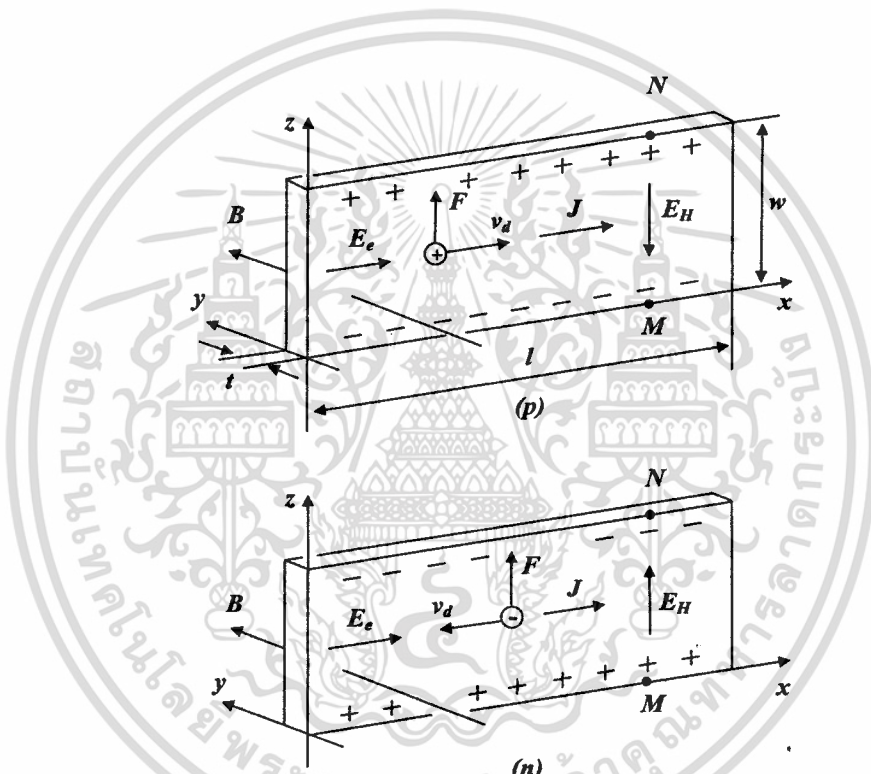
โดยที่ e แสดงถึงประจุของอนุภาค (สำหรับอิเล็กตรอน $e = -q$ สำหรับโฮล $e = q$ ซึ่ง q คือขนาดของประจุอิเล็กตรอน), E คือสนามไฟฟ้า, v คือความเร็วของพาหะ, และ B คือขนาดของสนามแม่เหล็ก เทอมแรกของฝั่งขวามือจะใช้ถึงแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และเทอมที่สองจะเป็นแรงลอเรนซ์ บางครั้งเราอาจเรียกเทอมทั้งสองว่าส่วนของไฟฟ้าและส่วนของแม่เหล็กตามลำดับ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

2.1.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์จัดเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่อยู่ในกลุ่มของปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติก ซึ่งถูกค้นพบโดย เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปี ค.ศ. 1879 [30] อุปกรณ์การทดลองของฮอลล์ดั้งเดิมนั้นจะใช้แผ่น

ตัวนำยาวซึ่งทำมาจากทอง (long gold leaf) แต่เพื่อเข้าใจการนำปรากฏการณ์ฮอลล์ไปใช้ในปัจจุบัน เราจะศึกษาปรากฏการณ์นี้บนสารกึ่งตัวซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปรากฏการณ์นี้มากที่สุด

พิจารณาการเคลื่อนที่ของพาหะในแท่งสารกึ่งตัวนำบางและยาว (รูปที่ 2.2) คำว่า “ยาว” ในที่นี้หมายความว่า ความยาวของแผ่น l มีค่ามากกว่าความกว้าง w ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเราสามารถละเลยอิทธิพลของขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่แผ่นสารกึ่งตัวนำได้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวโดยส่วนใหญ่จะมีระยะทางที่สั้นจึงส่งผลให้เกิดผลกระทบที่น้อยจนละเลยได้ เราจะให้แผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวถูกกำหนดประเภทเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p อย่างละแผ่น โดยเราจะไม่คิดผลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยในแผ่นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดเพื่อความง่ายต่อการอธิบาย



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n

ในรูปที่ 2.2 E_e คือสนามไฟฟ้าภายนอก, B คือสนามแม่เหล็ก, v_d คือความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ, F คือแรงแม่เหล็ก, J คือความหนาแน่นกระแส, และ E_H สนามไฟฟ้าฮอลล์ แรงแม่เหล็กจะผลักพาหะที่มีประจุลบและบวกไปยังขอบข้างบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ปรากฏระหว่างประจุที่ขอบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ จากรูปสมมุติว่าให้สนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ($E_e = E_x, 0, 0$) และสนามแม่เหล็กทำกับศูนย์ ดังนั้นแรงลอเรนซ์ (สมการที่(2.1)) จะมีเพียงเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งคือเทอมแรงทางไฟฟ้า แรงทางไฟฟ้าจะทำให้พาหะที่มีประจุจะลอยเลื่อน

ไปตามแผ่นในทิศทางที่ตรงข้ามกัน (แกน x และ $-x$ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ) โดยความเร็วลอยเลื่อนนั้นหาได้จาก

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

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือสภาพคล่องของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสจะหาได้ด้วย

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

ซึ่ง p และ n แทนความหนาแน่นโฮลและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ

สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำในแนวแกน y ตอนนี้พาหะที่มีประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทั้งสองส่วน เนื่องจากเราสมมติให้ความเร็วของพาหะทั้งหมดในแผ่นสารกึ่งตัวนำมีค่าสม่ำเสมอ ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p จะเป็น

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

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

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

โดยแรงที่เกิดขึ้นกับพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะอยู่ในแกน z จึงสามารถเขียนอยู่ในรูปขนาดของแต่ละแนวแกนเป็น

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

แรงนี้จะผลักพาหะไปทางขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะที่ขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของพาหะที่ขอบด้านล่างจะเริ่มลดลง ด้วยเหตุนี้ความสมดุลของประจุจะถูก รบกวนและทำให้มีสนามไฟฟ้าปรากฏระหว่างขอบด้านบนและด้านล่าง สนามไฟฟ้าที่ปรากฏนั้น (รูปที่ 2.2) จะกระทำ ต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่เช่นเดียวกับแรงทางแม่เหล็ก ซึ่งผลจากสนามไฟฟ้าจะผลักพาหะไปยังทิศที่จะลดประจุส่วนเกิน ที่ขอบ จนในที่สุดแรงทางไฟฟ้าจะมีค่ามากพอที่จะสมดุลกับแรงทางแม่เหล็ก

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

หลังจากนี้พาหะที่เคลื่อนที่ในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองจะเคลื่อนที่ในแนวขนานกับแกน x ซึ่งเหมือนกับมีแรงทางไฟฟ้า ภายนอกกระทำเพียงอย่างเดียว สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส (E_H) ซึ่งถ่วงดุลกับแรงทางแม่เหล็กจะ เรียกว่า “สนามไฟฟ้าฮอลล์”

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

จากสมการที่ (2.2) เราจะได้สนามไฟฟ้าฮอลล์เป็น

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

หากเขียนในรูปของขนาดในแต่ละแนวแกน

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

ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าและมีการตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก ส่วนแม่เหล็กของแรงมีแนวโน้มที่จะดัน ไฟฟ้าไปชิดกับขอบด้านหนึ่งของตัวอย่าง (คำว่า “การดันกระแสไฟฟ้า” หรือ “pressing electricity” เป็นแนวคิดที่ถูก ใช้โดยเอ็ดวิน ฮอลล์)

แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)

ผลกระทบที่สามารถจับต้องได้อย่างชัดเจนของสนามไฟฟ้าฮอลล์ก็คือการปรากฏแรงดันไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับทิศของ กระแสระหว่างขอบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ หากเลือกจุดสองจุด M

และ N ที่ขอบตรงข้ามกันของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ภายใต้เงื่อนไขจุดทั้งสองจะมีระนาบศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากันเมื่อ $B = 0$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถหาได้จาก

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

และสำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p จะได้ (ในที่นี้เราจะแสดงเฉพาะขนาดโดยละเลยเครื่องหมายลบไว้และ w หมายถึงความกว้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำ)

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

การสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์และแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยทั่วไปมักจะเรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ ในปรากฏการณ์ฮอลล์ยังมีคุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งนั่นก็คือ มุมฮอลล์

มุมฮอลล์ (Hall angle)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง สนามไฟฟ้าลัพท์ที่เกิดในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าว $E = E_e + E_H$ จะไม่ได้อยู่ในแนวแกนเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก E_e ในกรณีปกติกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกจำกัดทิศทางตามสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้ความหนาแน่นกระแสอยู่ในแกนเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก (รูปที่ 2.2) เนื่องจากสนามไฟฟ้าลัพท์ไม่ได้มีทิศทางร่วมกับแนวแกนของความหนาแน่นกระแส (แนวแกนของสนามไฟฟ้าภายนอก) ดังนั้นปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวจะแสดงผ่านการเอียงของสนามไฟฟ้าลัพท์ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอกและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง มุมที่เกิดจากการเอียง θ_H จะเรียกว่า “มุมฮอลล์” จากรูปที่ 2.2 สามารถหามุมฮอลล์ได้จาก

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

จากสมการข้างต้นเราสามารถวัดมุมฮอลล์ได้ตามความสัมพันธ์ของทิศทางสนามไฟฟ้าทั้งหมด นอกจากนี้ยังอาจจะบุมุมฮอลล์เป็นมุมเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส J ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าลัพท์ E ตามรูปที่ 2.2 (เนื่องจากความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศทางเดียวกัน) ด้วยสมการ (2.9) และ (2.13) เราสามารถระบุมุมฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น

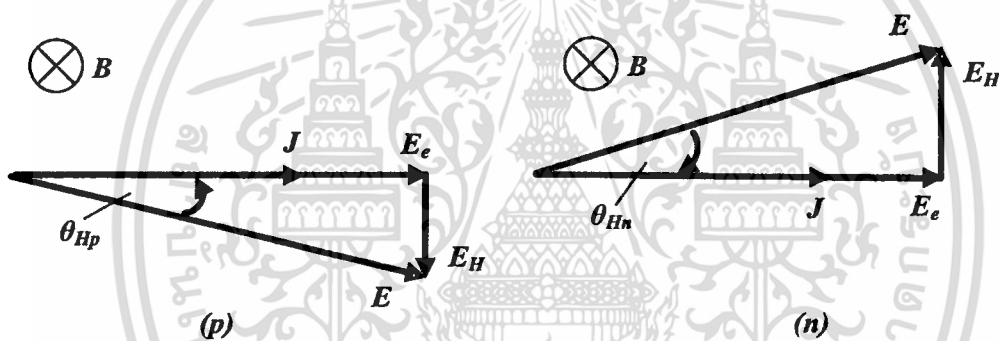
$$\tan \theta_{Hp} = \mu_p B_y \quad \tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_y \quad (2.14)$$

ค่าของมุมฮอลล์จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กและสภาพคล่องของประจุพาหะเท่านั้น เครื่องหมายของมุมฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของประจุพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำ

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)

จากสมการที่ (2.3) และ (2.9) เราสามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็น

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



รูปที่ 2.3 แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวชนิด p (p) และชนิด n (n) โดย J คือความหนาแน่นกระแส, E_e สนามไฟฟ้าภายนอก, E_H สนามไฟฟ้าฮอลล์, E สนามไฟฟ้าลัพธ์, และ θ_H คือมุมฮอลล์

จากสมการข้างต้น (สมการที่ (2.15)) สามารถเขียนใหม่เป็น

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

ซึ่ง R_H คือตัวแปรที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ สมการที่ (2.16) เป็นตัวแทนล่าสุดของบทสรุปที่ถูกสร้างโดยฮอลล์ หลังจากการทดลองของเขา

สัมประสิทธิ์ฮอลล์เป็นตัวแปรทางวัสดุ (material parameter) ที่อธิบายลักษณะความเข้มและเครื่องหมายของปรากฏการณ์ฮอลล์ในวัสดุเฉพาะ หน่วยของสัมประสิทธิ์ฮอลล์คือ $VmA^{-1}T^{-1}$ (โวลต์เมตรต่อแอมแปร์เทสลา) ซึ่ง

บางครั้งจะแสดงในรูปแบบที่กะทัดรัดมากขึ้นเป็น $\Omega m T^{-1}$ (โอห์มเมตรต่อเทลา) หรือเทียบเท่ากับ $m^3 T^{-1}$ (ลูกบาศก์เมตรต่อเทลา)

จากการเทียบสมการ (2.15) และ (2.16) เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดเป็น

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

เครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของพาหะข้างมาก และขนาดของสัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรผกผันกับความเข้มข้นของพาหะข้างมาก สำหรับการนำไปใช้จริงนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.11) และ (2.16)

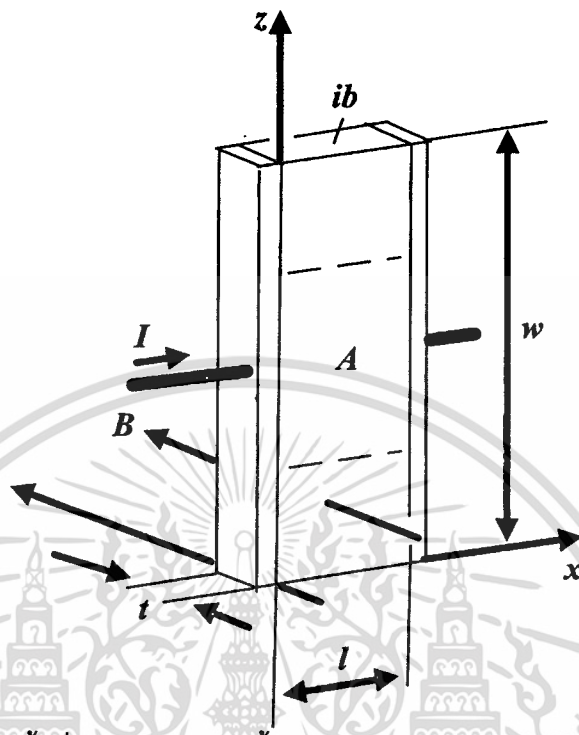
$$V_H = \frac{R_H}{t} IB_{\perp} \quad (2.18)$$

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

สมการที่ (2.18) แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของตัวอุปกรณ์ฮอลล์จะส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยอุปกรณ์ที่มีความบางจะได้ผลของแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าอุปกรณ์ที่มีความหนามากๆ

2.1.2 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส (Current deflection effect)

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

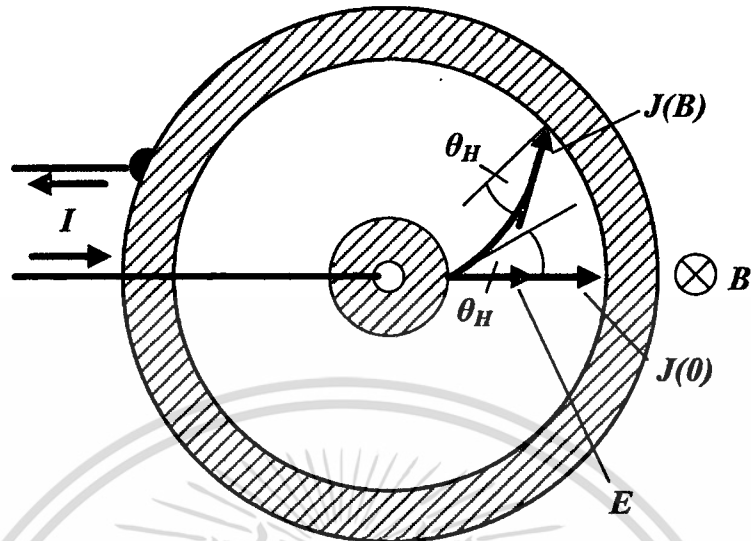


รูปที่ 2.4 แผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)

แผ่นคอบินโน (Corbino disc)

เพื่อที่จะเข้าใจลักษณะพิเศษของปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยม เราจะพิจารณากรณีพิเศษข้อแรกคือ แผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมที่มีรูปร่างเป็นวงแหวนซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 แผ่นดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “แผ่นคอบินโน” [31] แผ่นคอบินโนมีลักษณะเป็นแผ่นหรือวงแหวนของวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ เช่น สารกึ่งตัวนำ ซึ่งถูกติดด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงไว้ที่ตรงศูนย์กลางและรอบๆแผ่น ถ้าทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เส้นศักย์ไฟฟ้า (equipotential line) จะมีจุดร่วมศูนย์กลางเดียวกันและสนามไฟฟ้าจะแผ่ออกตามแนวรัศมี ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก กระแสจะไหลในแผ่นไปตามแนวรัศมีของวงกลม เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับแผ่นกระแสจะเอียงไปเมื่อเทียบกับทิศทางของรัศมี (ดูรูปที่ 2.5) ในแผ่นคอบินโนนั้นจะไม่มีบริเวณขอบที่เป็นฉนวนให้พาหะสามารถสะสมอยู่ได้เหมือนกับกรณีแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวก่อนหน้านี้ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะไม่ปรากฏออกมาทำให้ไม่มีตัวไปถ่วงดุลแรงทางแม่เหล็กส่งผลให้พาหะถูกแรงทางแม่เหล็กเบี่ยงเบนเส้นทางจากเส้นทางที่สั้นที่สุด

แผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.4 สามารถมองเป็นแผ่นคอบินโนที่มีรัศมีขนาดใหญ่ไม่สิ้นสุด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าส่วนภายในของตัวอย่าง (A) ซึ่งห่างจากขอบที่เป็นฉนวน (ib) ควรจะเหมือนส่วนของแผ่นคอบินโนจริงๆ ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมนั้นจะไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นแต่จะมีการเบี่ยงเบนของกระแสเกิดขึ้นแทน



รูปที่ 2.5 แผ่นคอร์บีโน เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลมที่มีขั้วหนึ่งขั้วอยู่ตรงกลางและอีกขั้วอยู่ล้อมรอบเส้นรอบวงของแผ่น ในแผ่นคอร์บีโนสนามไฟฟ้า E จะแผ่ตามรัศมีวงกลมโดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ส่วนความหนาแน่นกระแส J จะถูกทำให้เอียงตามมุมฮอลล์ θ_H

การที่แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ไม่ปรากฏในแผ่นสารกึ่งตัวนำสี่เหลี่ยมยังสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองวงจรไฟฟ้า ตามแบบจำลองนี้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะไม่ปรากฏเพราะแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางแม่เหล็ก (magnetic electromotive force) จะถูกตัดวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่

การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection)

ตอนนี้เราจะมาหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส เราจะใช้การประมาณค่าที่พูดไปก่อนหน้านี้อีกครั้งนั่นคือ เราจะไม่สนใจการเคลื่อนที่เชิงความร้อนของพาหะและสมมุติว่าพาหะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอภายใต้การกระทำของแรงลอเรนซ์ สมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่เป็น

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

ซึ่ง v_p และ v_n หมายถึงความเร็วโฮลและอิเล็กตรอน ที่มีสาเหตุมาจากแรงลอเรนซ์ F_p และ F_n

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

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

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

$$J_p(B) = J_p(0) + \mu_p [J_p(B) \times B] \quad (2.21)$$

$$J_n(B) = J_n(0) - \mu_n [J_n(B) \times B]$$

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

$$J_p(B) = q\mu_p p E_p = \mu_p p F_p = q p v_p \quad (2.22)$$

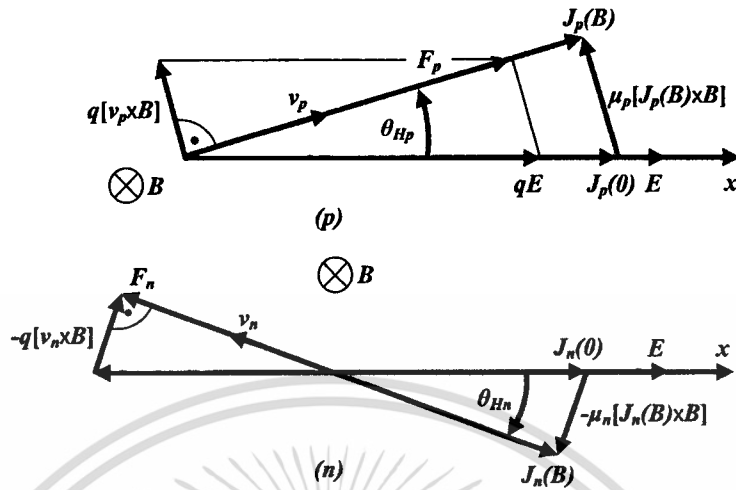
$$J_n(B) = q\mu_n n E_n = \mu_n n F_n = -q n v_n$$

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

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

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

มุมฮอลล์ (Hall angle)



รูปที่ 2.6 แผนภาพของสมการเวกเตอร์ (2.19), (2.21) และ (2.23) ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสำหรับสารกึ่งตัวชนิด p (p) และชนิด n (n)

ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสันปรากฏการณ์ฮอลล์จะแสดงออกมาในรูปการเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส $J(B)$ จากสนามไฟฟ้าภายนอก E มุมของการเบี่ยงเบนคือมุมฮอลล์ θ_H ใน extreme case ของแผ่นคอร์บิโนจะไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นเลยและสนามไฟฟ้าภายนอกจะเป็นสนามไฟฟ้าลัพท์ ดังนั้นมุมฮอลล์ก็คือมุมการเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแสเทียบกับทิศของสนามไฟฟ้าลัพท์ในแผ่นตัวอย่าง คำจำกัดความของมุมฮอลล์จะเหมือนกับที่เสนอไว้ก่อนหน้านี้ (สมการที่ (2.13)) ยิ่งไปกว่านั้นด้วยการใช้แผนภาพในรูปที่ 2.6 เราจะได้

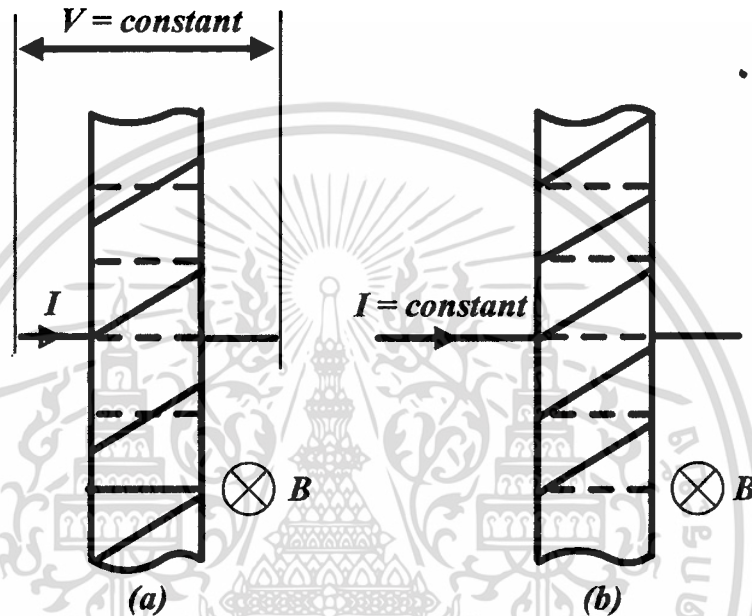
$$\tan \theta_{Hp} = \mu_p B_{\perp} \quad \tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_{\perp} \quad (2.24)$$

ความสัมพันธ์ที่กำหนดค่าและเครื่องหมายของมุมฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวและสั้นจะเหมือนกัน (สมการที่ (2.13) และ (2.24))

โปรดสังเกตว่าในการอภิปรายข้างต้นของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัน เราจะได้กล่าวถึงความหนาของแผ่น t ในรูป 2.4 นั้นหมายความว่าไม่เหมือนกรณีของปรากฏการณ์ฮอลล์ธรรมดา อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสอาจไม่จำเป็นต้องเป็นแผ่น (plate-like) เสมอไป แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่มีความบางจะทำให้มีค่าความต้านทานสูงและทำให้ต้องการกระแสในการทำงานต่ำ ด้วยเหตุผลนี้รูปร่างที่คล้ายกับแผ่นยังคงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของกระแส

2.1.3 ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

จากการตรวจสอบแผนภาพในรูป 2.6 เราจะสังเกตเห็นว่าเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแส $J(B)$ จะมีขนาดน้อยกว่า $J(0)$ นั้นหมายความว่าในแผ่นสารกึ่งตัวนำแบบสั่นสนามแม่เหล็กยังทำให้เกิดปรากฏการณ์เพิ่มเติม โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลง



รูปที่ 2.7 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่ถูกลบด้วยแรงดันคงที่ (a) และกระแสคงที่ (b) เส้นประคือเส้นกระแสที่ $B=0$ ในขณะที่เส้นทึบแสดงถึงเส้นกระแสที่ $B \neq 0$

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

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

$$J_p(B) = \sigma_{pB} E + \sigma_{pB} \mu_p [E \times B] \quad (2.25)$$

$$J_n(B) = \sigma_{nB} E - \sigma_{nB} \mu_n [E \times B]$$

โดย

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

เป็นสภาพนำไฟฟ้ายังผล (effective conductivity) ของแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ส่วน σ_{p0} และ σ_{n0} เป็นสภาพนำไฟฟ้าตอนไม่มีสนามแม่เหล็ก โปรดทราบว่าสัมประสิทธิ์ σ_B (สมการที่ (2.26)) ใช้สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น เนื่องจากเราพิจารณาแผ่นกึ่งตัวนำสั้นโดยเทียบมาจากส่วนของแผ่นคอร์บิโน ดังนั้นเราจะเรียกสัมประสิทธิ์ σ_B ว่าสภาพนำไฟฟ้าของคอร์บิโน (Corbino conductivity)

จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) เราสามารถอนุมานได้ว่ากระแสภายในอุปกรณ์จะมีค่าลดลงเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นถ้าแผ่นตัวอย่างมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุจะลดลง สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็น

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

การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าในวัสดุภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์” การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นตัวอย่างสั้นจะถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแดนซ์เชิงเรขาคณิต (geometrical magnetoresistance effect)” คำว่าเชิงเรขาคณิตสะท้อนถึงความจริงที่ว่าปรากฏการณ์เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของเส้นกระแสดังแสดงในรูป 2.7 ความไว (sensitivity) ในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันได้ตามสมการ (ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก คือค่าที่บอกความสามารถของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไปเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตได้มากน้อยแค่ไหน)

$$S_H = \frac{\Delta V_H}{\Delta B} \quad [V/T] \quad (2.28)$$

ในกรณีที่เราใช้อุปกรณ์ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่จะทำให้เราสามารถระบุความไวที่สัมพันธ์กับกระแสที่ไบอัส (current-related sensitivity) ได้ตามสมการ

$$S_{H_i} = \frac{\Delta V_H}{I(\Delta B)} \quad [V / AT] \quad (2.29)$$

หรือในกรณีที่ไบอัสอุปกรณ์ด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ เราสามารถระบุความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันเป็น

$$S_{H_v} = \frac{\Delta V_H}{V(\Delta B)} \quad [V / VT] \quad (2.30)$$

หากวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ฮอลล์ในโหมดกระแสเราอาจระบุความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเป็น

$$S_{\Delta I} = \frac{\Delta I}{\Delta B} \quad [A / T] \quad (2.31)$$

หรืออาจระบุในรูปแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการนำตัวต้านทานไปต่อที่ขั้วกระแสที่ถูกแบ่งออกเป็นสองขั้ว (CC2 และ CC3) แล้ววัดผลต่างของแรงดันที่เกิดจากความแตกต่างกระแส

$$S'_{\Delta I} = \frac{\Delta V_{\Delta I}}{\Delta B} \quad [V / T] \quad (2.32)$$

ดังนั้นความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโหมดกระแส ที่สัมพันธ์กับกระแสไบอัสสามารถระบุได้ตามสมการ

$$S_{\Delta I_i} = \frac{\Delta I}{I(\Delta B)} \quad [A / AT] \quad (2.33)$$

และความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันสามารถระบุได้ตามสมการ

$$S_{\Delta V_v} = \frac{\Delta I}{V(\Delta B)} \quad [A / VT] \quad (2.34)$$

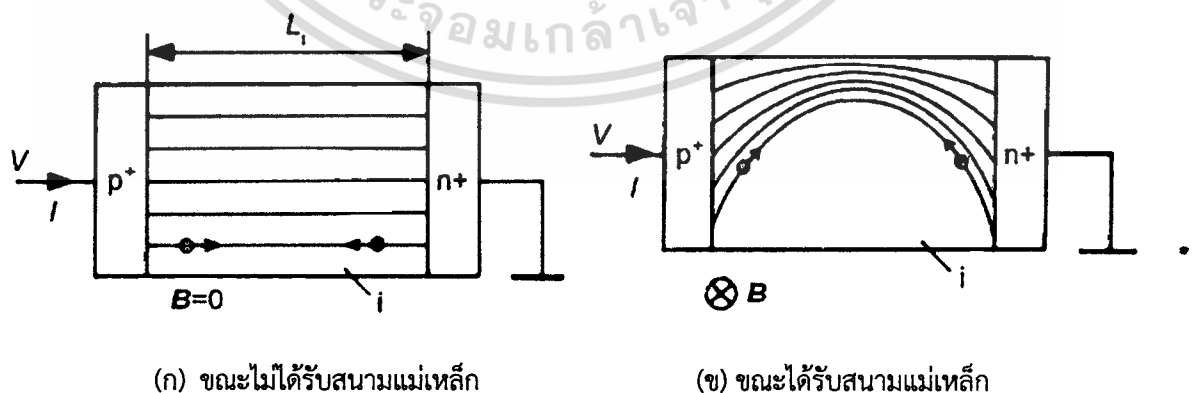
2.2 แมกนีโตไดโอด

แมกนีโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ฮอลล์สองขั้วคล้ายไดโอดไบโพลาร์มาตรฐาน คุณสมบัติกระแส-แรงดันของแมกนีโตไดโอดจะไวต่อสนามแม่เหล็ก ปรากฏการณ์ฟิสิกส์ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอด” ซึ่งถูกค้นพบโดย Stafeev ในปีค.ศ. 1958

2.2.1 ปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอด

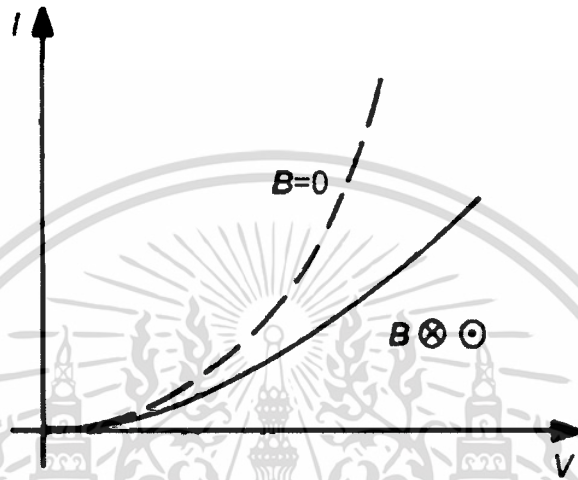
ปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอดเป็นผลของการทำงานร่วมกันของปรากฏการณ์ฮอลล์ กับปรากฏการณ์อื่นๆที่มีต่อรอยต่อพีเอ็น ปรากฏการณ์พื้นฐานคือ; การมอดดูเลตความนำไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดพาหะระดับสูง; การเลี้ยวเบนกระแส และปรากฏการณ์แมกนีโตคอนเซนเทชัน ปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอดขึ้นอยู่กับโครงสร้างไดโอดและเงื่อนไขการทำงานสามารถแบ่งได้สองประเภทคือ แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวในเนื้อสาร และการรวมตัวที่พื้นผิว

แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวในเนื้อสารเป็นไดโอดโครงสร้าง p-i-n ที่มีเบสยาว ความยาวของชั้นสารควอไซอินทรินซิก (i) L_i ถูกเลือกให้มีค่าสั้นกว่าระยะการแพร่พาหะเล็กน้อยๆ $L_i < L_N$ หรือ $L_i < L_P$ เมื่อไดโอดได้รับไบแอสไปข้างหน้า พาหะจะฉีดเข้าไปในบริเวณ i และรวมตัวที่บริเวณนี้ รูปที่ 2.8 แสดงเส้นความหนาแน่นกระแสในไดโอดขณะที่ยังไม่ให้สนามแม่เหล็กในรูป 2.8 (ก) เส้นกระแสจะเป็นเส้นตรง ในกรณีที่ให้สนามแม่เหล็กในรูป 2.8 (ข) ทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจะถูกเบี่ยงเบนไปที่บริเวณขอบที่เป็นฉนวนและเส้นกระแสจะเป็นเส้นโค้งทำให้เส้นกระแสยาวขึ้นซึ่งเสมือนว่าระยะความยาวเปลี่ยนมีค่ามากขึ้น ดังนั้นปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กจากไดโอดสั้น ($B=0$) ไปเป็นไดโอดยาว ($B \neq 0$) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกระแส-แรงดันที่สอดคล้องกับที่กล่าวมาแสดงได้ดังรูป 2.9 เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กและไม่ได้รับสนามแม่เหล็ก ตัวอย่างก็ทำตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไม่มีผลต่อปรากฏการณ์นี้



รูปที่ 2.8 เส้นความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวในเนื้อสาร

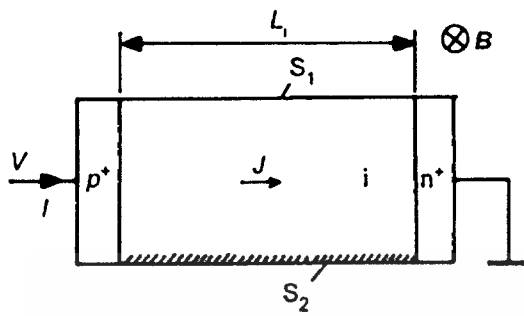
ความไวของสนามแม่เหล็กจะสูงขึ้นเมื่อเป็นการฉีดพาหะในระดับสูงด้วยเหตุผลสองประการ ประการแรกคือการฉีดในระดับสูง บริเวณเบสจะเสมือนเป็นสารอินทรีนซิก สนามฮอลล์จะมีค่าน้อย ประการที่สอง ที่การฉีดระดับสูง การมอดดูเลตความนำไฟฟ้าจะปรากฏขึ้น ปรากฏการณ์นี้จะช่วยสนับสนุนความไวของอุปกรณ์



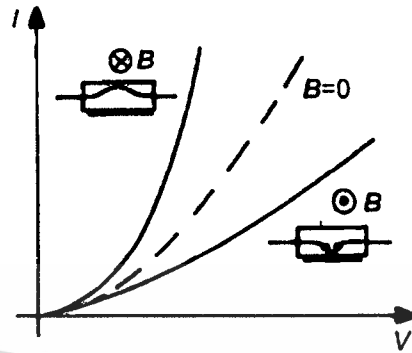
รูปที่ 2.9 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวในเนื้อสาร

กระแสแมกนีโตไดโอดลดลงเมื่อให้สนามแม่เหล็ก กระแสที่ลดลง การฉีดพาหะจะลดลง และความต้านทานบริเวณอินทรีนซิกจะเพิ่มขึ้น จะเกิดแรงดันตกคร่อมไดโอดบริเวณอินทรีนซิกมากขึ้น มีแรงดันตกคร่อมมากขึ้น การฉีดพาหะจะลดลงกระแสไดโอดจะลดลง ดังนั้นการฉีดระดับสูงจะช่วยเพิ่มความไวของอุปกรณ์ให้มากขึ้น

โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวแบบพื้นผิวแสดงได้ดังรูป 2.10 (ก) โครงสร้างจะเป็นแบบ p-i-n ไดโอด อย่างไรก็ตามความยาวของชั้นอินทรีนซิกจะสั้นกว่าระยะการแพร่พาหะอย่างมาก ดังนั้นการรวมตัวในเนื้อสารจะไม่ใช่สำคัญในโครงสร้างนี้ พื้นผิว S1 และ S2 ของชั้นสารอินทรีนซิก จะทำให้มีความเร็วการรวมตัวแตกต่างกันอย่างมาก สมมุติว่า $S1=0$ คือไม่มีการรวมตัว และ $S2 = \infty$ การทำงานของแมกนีโตไดโอดในรูป 2.10 (ก) เป็นการทำงานร่วมกันของปรากฏการณ์แมกนีโตคอนเซนเทชันและการมอดดูเลชันความนำไฟฟ้า การฉีดพาหะในระดับสูงมีความจำเป็น เพราะว่าปรากฏการณ์แมกนีโตคอนเซนเทชัน จะปรากฏเมื่อเข้าเงื่อนไขอินทรีนซิก



(ก) โครงสร้างอุปกรณ์



(ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดัน

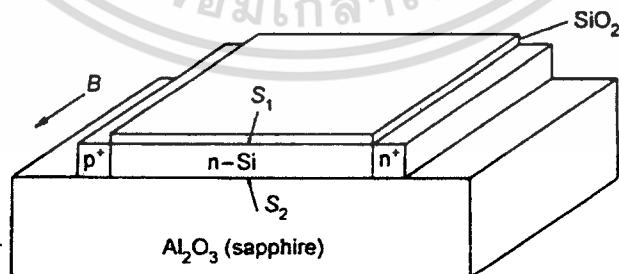
รูปที่ 2.10 แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวที่พื้นผิว

คุณสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอด การรวมตัวพื้นผิวถูกแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) ถ้าพาหะถูกเบี่ยงเบนไปยังพื้นผิวที่มีการรวมตัวสูง S_2 ความเข้มข้นในไดโอดจะลดลง และกระแสจะลดลง ถ้าพาหะถูกเบี่ยงเบนไปยังพื้นผิวที่มีการรวมตัวต่ำ S_1 ความเข้มข้นในไดโอดจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นแมกนีโตไดโอดจะไวต่อทิศทางและขนาดของสนามแม่เหล็ก

2.2.2 โครงสร้างและเทคโนโลยี

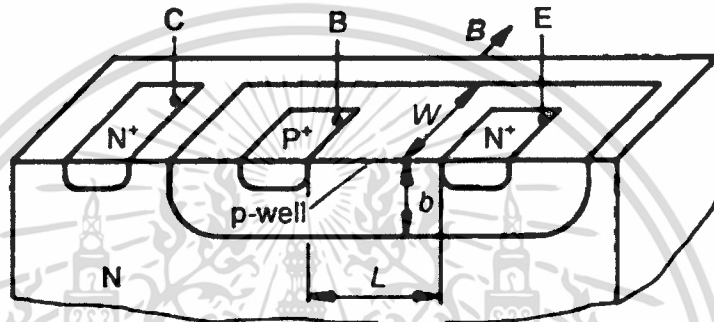
โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้จากสารกึ่งตัวนำหลายชนิดเช่น ซิลิกอน GaAs ในยุคแรกเป็นอุปกรณ์เดี่ยว แมกนีโตไดโอดแบบการรวมตัวพื้นผิวได้รับความสนใจในการพัฒนามากกว่า ความแตกต่างของความเร็วการรวมตัวสามารถทำได้โดยการกัดและการขัดพื้นผิวด้านหนึ่งและขัดพื้นผิวอีกด้านหนึ่ง

รูปที่ 2.11 แสดงแมกนีโตไดโอดในเทคโนโลยี SOS (silicon on sapphire) การบกพร่องในผลึกที่รอยต่อซิลิกอน-ซัพไฟร์ รอยต่อนี้มีความเร็วการรวมตัวสูง ส่วนรอยต่อด้านบนเป็นการออกซิไดซ์ด้วยความร้อนจะมีการรวมตัวต่ำ



รูปที่ 2.11 แมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวที่ผิวโดยใช้เทคโนโลยี SOS

รูปที่ 2.12 แสดงแมกนีโตไดโอดซึ่งการให้ไบอัสกลับทางรอยต่อพี-เอ็นจะทำให้เกิดพื้นผิวการรวมตัวสูง แมกนีโตไดโอดแบบนี้ใช้กระบวนการวางจรรยาแบบซิมอส p-well ใช้เป็นส่วนควอไซอินทรีนซิก และรอยต่อ p-well/ฐานรอง (N) คือรอยต่อคอลเลคเตอร์ อุปกรณ์มีโครงสร้างแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ อย่างไรก็ตาม คอลเลคเตอร์จะให้ไบอัสคงที่และสัญญาณจะมอดดูเลขคุณสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่ออิมิตเตอร์-เบสไบอัสไปข้างหน้า ความไวต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดมีค่าประมาณ $5 \text{ VmA}^{-1}\text{T}^{-1}$ ที่ค่ากระแส 1 mA ถึง 10 mA



รูปที่ 2.12 แมกนีโตไดโอดที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับไบอัสกลับทางทำให้เกิดพื้นผิวการรวมตัวสูง

บทที่ 3

การจำลองแบบด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD

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

ในช่วงต้นจะเปิดกรกล่าวรายละเอียดอย่างคร่าวๆ ของตัวโปรแกรม จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองแบบอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งแบบ 5 ชั้น ซึ่งประกอบไปด้วยการออกแบบโครงสร้างและการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้า โดยทั้งสองส่วนจะถูกกล่าวโดยละเอียดเพื่อให้ความเข้าใจในวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้

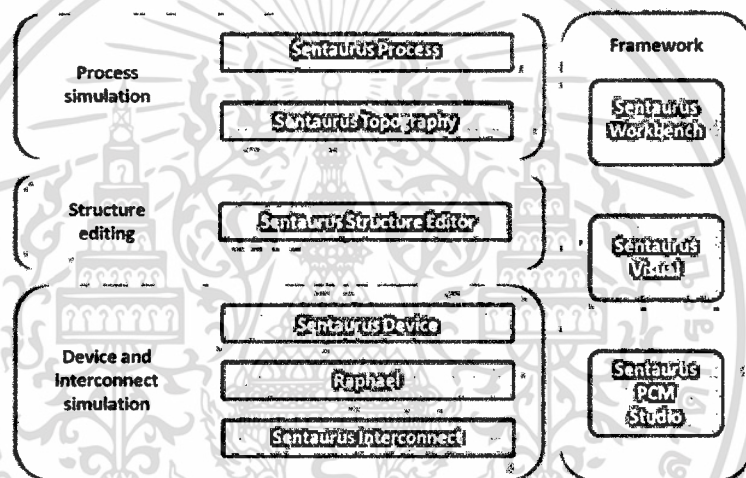
3.1 Sentaurus TCAD

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

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

การจำลองแบบด้วย TCAD ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความซับซ้อนมากและมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนที่สูง ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์แก้ไขและป้องกันข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตรวมทั้งการวิเคราะห์และออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จึงนิยมใช้ TCAD เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความน่าเชื่อถือในกระบวนการผลิตและออกแบบ

Sentaurus เป็นชุดเครื่องมือ TCAD ซึ่งจำลองกระบวนการสร้างและการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยชุดเครื่องมือทั้งหมดของ Sentaurus TCAD สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม 3 กลุ่มหลักๆตามรูปที่ 3.1 กลุ่ม Process simulation เป็นกลุ่มสำหรับจำลองกระบวนการสร้างแต่ละขั้นตอนโดยมีเครื่องมืออยู่สองตัวนั่นคือ Sentaurus Process และ Sentaurus Topography กลุ่ม Structure editing เป็นกลุ่มสำหรับใช้ขึ้นโครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างลงมีเครื่องมือคือ Sentaurus Structure editor กลุ่ม Device and interconnect simulation เป็นกลุ่มสำหรับจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์โดยใช้โมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆ ซึ่งมีเครื่องมือคือ Sentaurus Device, Raphael, Sentaurus Interconnect โดยชุดเครื่องมือทั้งหมดจะใช้งานผ่านหน้า Frame work ซึ่งประกอบไปด้วย Sentaurus Workbench, Sentaurus Visual และ Sentaurus PCM Studio



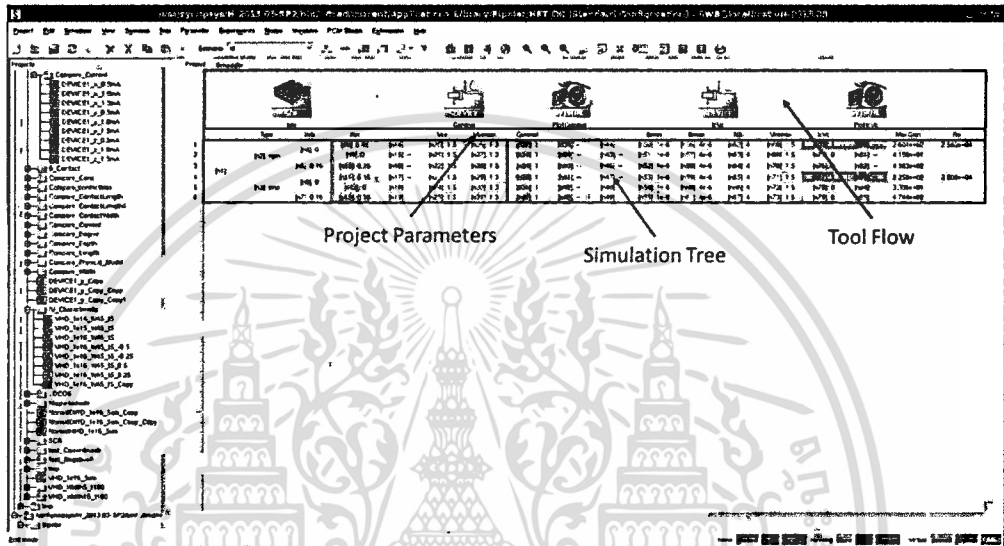
รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือของ Sentaurus TCAD

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

3.1.1 Sentaurus Workbench

Sentaurus Workbench เป็น graphical environment ของ Sentaurus TCAD ซึ่งใช้สำหรับสร้าง จัดการ และทำการจำลองแบบ ส่วนนี้จะเป็นตัวจัดการเครื่องมือและการจำลองแบบของ Sentaurus TCAD ช่วยให้ผู้ใช้สะดวกในการสร้างการทดลอง ลำดับการจำลองแบบ ดูผลการจำลอง รวมถึงการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละเครื่องมือ เพื่อความสะดวกต่อการทดลอง หน้าต่างโปรแกรมจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.2 เราสามารถเลือกใช้เครื่องมือต่าง ๆ ของ Sentaurus TCAD ผ่านส่วนของ Tool Flow และตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ผ่าน Project Parameters (ตัวแปรที่จะใช้ได้ใน

ส่วนนี้ต้องผ่านการกำหนดให้เป็นตัวแปรอิสระที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ก่อนซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป) ซึ่งเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรไปตามการทดลองที่ต้องการในส่วน Simulation Tree เมื่อกำหนดเครื่องมือและตั้งค่าการทดลองเสร็จแล้ว Sentaurus Workbench จะถูกใช้เป็นหน้าต่างสำหรับสั่ง Run การจำลองแบบ เมื่อการจำลองแบบเสร็จสิ้นจะแสดงสถานะตามสีที่ระบุอยู่บริเวณขอบล่างด้านขวาของหน้าต่าง

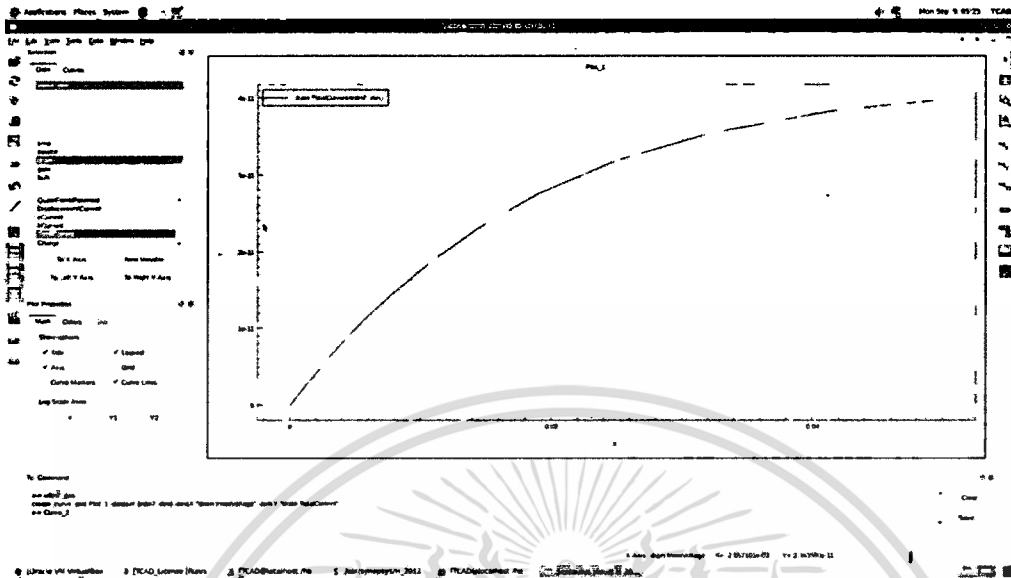


รูปที่ 3.2 Sentaurus Workbench บริเวณ Tool Flow

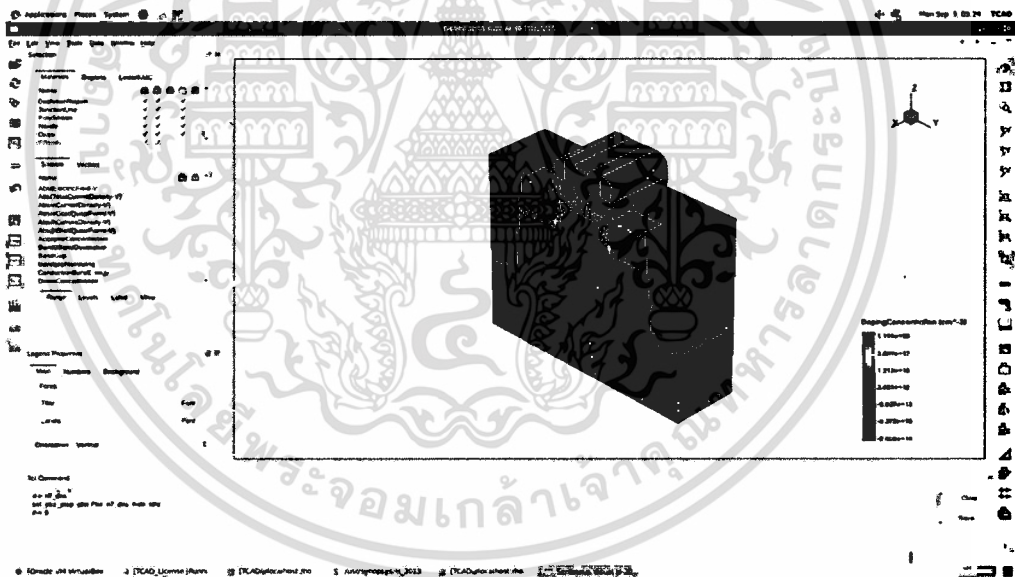
รูปที่ 3.2 ใช้สำหรับกำหนดเครื่องมือและลำดับการใช้เครื่องมือโดยเริ่มจากเครื่องมือทางซ้ายก่อน จากนั้นจะนำไฟล์เอาต์พุตจากเครื่องมือนั้นมาประมวลผลต่อ, Project Parameters ใช้สำหรับกำหนดพารามิเตอร์ที่เราสนใจเพื่อความง่ายต่อการปรับเปลี่ยน และ Simulation Tree เป็นส่วนสำหรับควบคุมการจำลองแบบและตรวจสอบผลการจำลองแบบที่ได้ โดยสีในแต่ละช่อง (node) จะบ่งบอกถึงสถานะของการจำลองแบบ

3.1.2 Sentaurus Visual

หลังจากการจำลองแบบเสร็จสิ้นลงเราสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแบบของแต่ละเครื่องมือโดยใช้ Sentaurus visual ซึ่งสามารถแสดงผลในรูปแบบของกราฟคุณลักษณะทาง ไฟฟ้ากระแสและแรงดันที่ชั่วไฟฟ้าต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ (ไฟล์เอาต์พุตจะมีนามสกุลเป็น .plt) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .plt



รูปที่ 3.4 Sentaurus visual ที่เปิดด้วยไฟล์นามสกุล .tdr

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

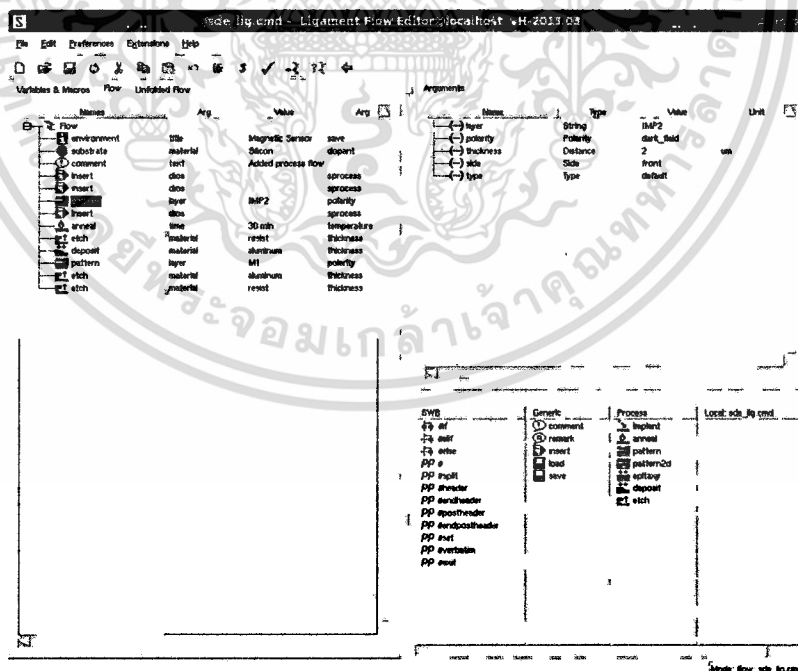
3.1.3 Sentaurus Structure Editor

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

3.1.3.1 Ligament

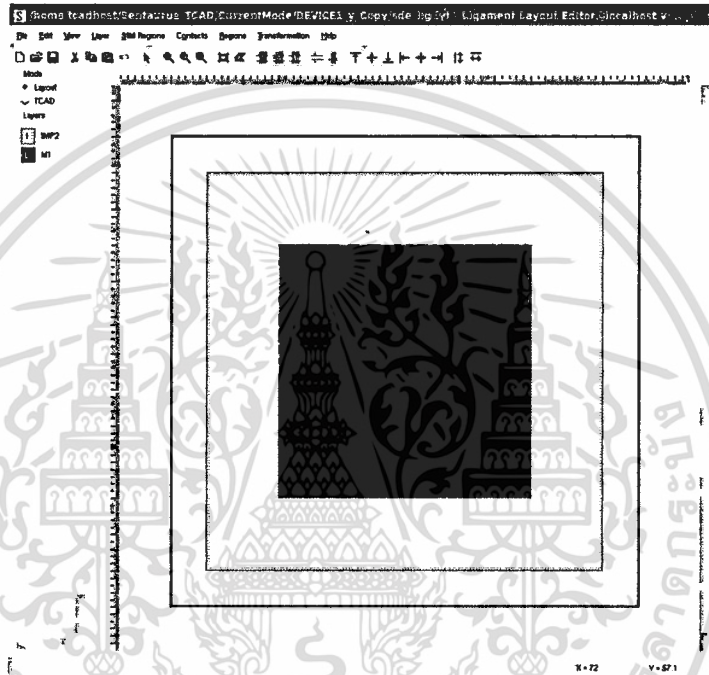
เป็นเครื่องมือย่อยที่อยู่ใน Sentaurus Structure Editor สำหรับการสร้างตัวอุปกรณ์ผ่านกระบวนการสร้างที่ถูกเลียนแบบมา โดย Ligament จะประกอบไปด้วย

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



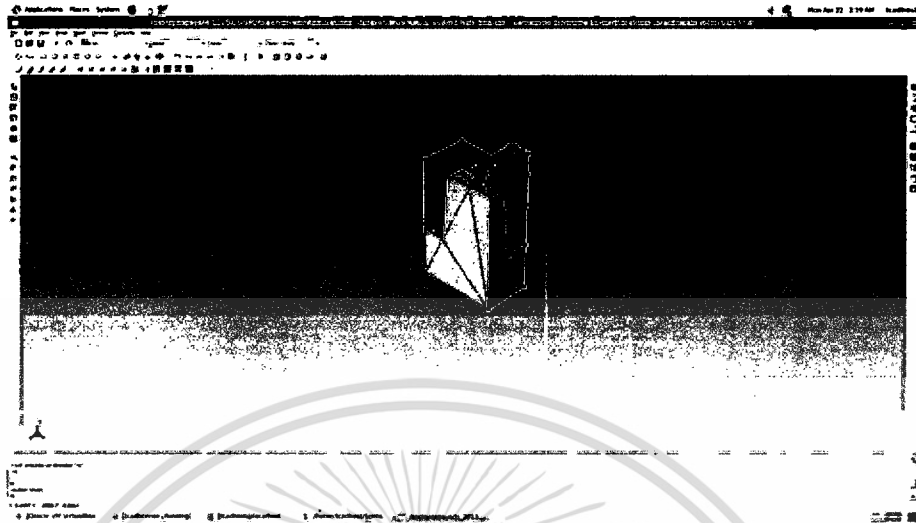
รูปที่ 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

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



รูปที่ 3.6 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor

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



รูปที่ 3.7 Sentaurus Structure Editor

3.1.4 Sentaurus Device

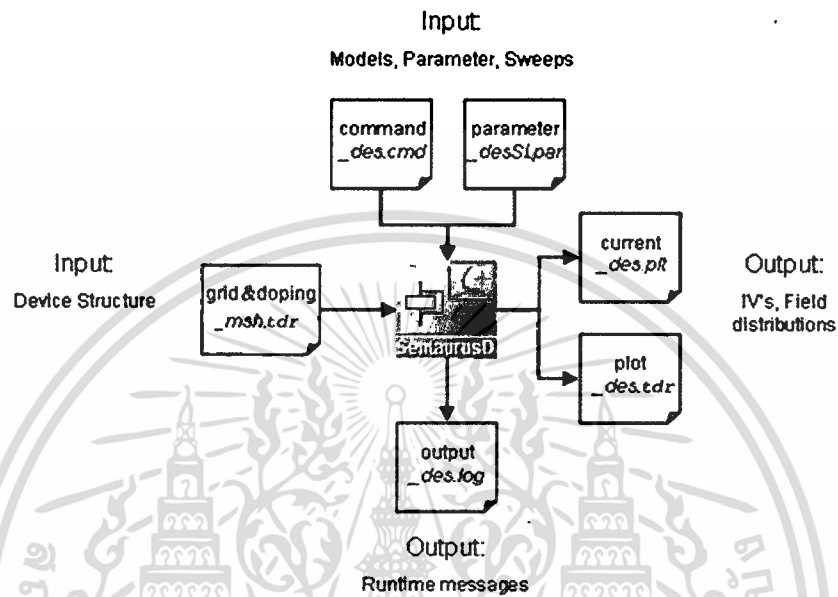
เมื่อได้โครงสร้างที่ถูกกำหนด mesh และ ขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำโครงสร้างนั้นไปจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าโดยใช้ Sentaurus Device ซึ่งจะใช้ในรูปแบบของคำสั่ง (command) เท่านั้น Sentaurus Device สามารถจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น ความร้อน แสง แม่เหล็ก เป็นต้น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

- *File* เป็นส่วนที่ระบุไฟล์อินพุตและเอาต์พุตสำหรับ Sentaurus Device

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

ในส่วนของ Input file จะเป็นไฟล์_msh.tdr ซึ่งได้จาก Sentaurus Structure Editor ไฟล์นี้เป็นไฟล์โครงสร้างที่ถูกกำหนด mesh เรียบร้อยแล้ว ส่วน Output file ของ Sentaurus Device จะประกอบไปด้วย

ไฟล์ _des.plt ซึ่งเป็นไฟล์สำหรับใช้ตรวจสอบกราฟคุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ และไฟล์ _des.plt ซึ่งเป็นไฟล์ที่ใช้แสดง contour ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 ผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตของ Sentaurus Device

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

- *Electrode* เป็นส่วนที่ใช้กำหนดขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการจำลองแบบอุปกรณ์ ในส่วนนี้เราสามารถกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่แต่ละขั้ว ค่าความต้านทานที่ขั้วไฟฟารวมถึงค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อ (barrier)

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

```
{Name="HEMTgate" Voltage=0 Schottky Barrier=0.78}
```

```
}
```

ในการกำหนดขั้วไฟฟ้า เราต้องประกาศชื่อให้สอดคล้องกับตอนที่กำหนดขั้วไฟฟ้าใน Sentaurus Structure Editor ด้วย

- *Physics* เป็นส่วนที่ใช้กำหนดโมเดลทางฟิสิกส์ที่จะถูกนำมาใช้ในการจำลองแบบอุปกรณ์ เช่น โมเดลสภาพคล่องของพาหะ โมเดลการพังทลายแบบอะวาลานซ์ โมเดลการเกิดและการผสมกลับของพาหะ โมเดลกับดักพาหะ เป็นต้น

```
Physics {
```

```
  Mobility ( DopingDep HighFieldSat )
```

```
  Avalanche (Okuto)
```

```
  EffectiveIntrinsicDensity (Slotboom)
```

```
  Recombination (surfaceSRH)
```

```
}
```

การจำลองแบบอุปกรณ์จำเป็นที่จะต้องเลือกให้โมเดลทางฟิสิกส์ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์แต่ละชนิดหากขาดโมเดลบางอย่างผลที่ได้อาจไม่แสดงพฤติกรรมบางอย่างออกมา ยกตัวอย่างเช่น การจำลองไดโอดแบบรอยต่อ p-n หากไม่ใส่โมเดลการพังทลายแบบอะวาลานซ์เข้าไป ในกรณีที่ได้โอดถูกไบอัสแบบกลับด้านอยู่ เราจะไม่พบการพังทลายแบบอะวาลานซ์ในกราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ได้หลังจากการจำลองแบบ วงเล็บข้างหลังโมเดลทางฟิสิกส์เป็นตัวบ่งบอกว่าเราใช้โมเดลรูปแบบไหน เช่น ส่วนสภาพคล่องของพาหะเราใช้โมเดลสภาพคล่องแบบที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือ (DopingDependence) และมีการอิมิตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (HighFieldSaturation) เป็นต้น

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

```
Plot {
```

```
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent
```

```
Potential SpaceCharge ElectricField
eMobility hMobility eVelocity hVelocity
Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
}
```

ส่วน Plot เราสามารถกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ที่ต้องการจะตรวจสอบหลังจากการจำลองแบบเสร็จสิ้นลง เช่น ความหนาแน่นของพาหะแต่ละชนิด สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความเร็วของพาหะ จำนวนสารเจือผู้ให้และผู้รับ เป็นต้น

- *Math* เป็นส่วนที่กำหนดตัวแปรของการคำนวณทางคณิตศาสตร์

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

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

- *Solve* เป็นส่วนที่กำหนดลำดับของผลเฉลยที่ได้รับจากตัวแก้ปัญหและกำหนดสมการที่ใช้ในการแก้ปัญห

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

{Coupled {Poisson Electron}}

}

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

3.2 แบบจำลองทางฟิสิกส์สำหรับการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

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

▪ Physics { EffectiveIntrinsicDensity (Slotboom) }

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

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

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

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

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

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

k คือค่าคงที่โบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant)

T คืออุณหภูมิ

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

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

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

E_{bgn} คือ Bandgap narrowing

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

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

ซึ่ง $E_g(T)$ คือช่องว่างพลังงานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของแลตทิซ กำหนดโดย

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

โดย $E_g(0)$ คือช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน ส่วน α และ β คือค่าคงที่ (ระบุในตารางที่ 3.1) ค่าช่องว่างพลังงานสามารถหาได้จาก

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

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

สำหรับ bandgap narrowing ที่ขึ้นกับการเจือใน Sentaurus Device มีรูปแบบดังนี้

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

ซึ่ง ΔE_g^0 จะถูกระบุโดยโมเดลที่เราเลือกใช้นั้นคือ Slotboom (Bandgap narrowing (Slotboom))

ΔE_g^{Fermi} เป็นการใช้สถิติของ Fermi แทนสถิติของ Maxwell-Boltzmann เพื่อลดข้อผิดพลาดในการคำนวณ bandgap narrowing

โดย bandgap narrowing สำหรับโมเดลของ Slotboom [42-43] คือ

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

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

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

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ bandgap narrowing สำหรับวัสดุซิลิคอน

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

และค่าช่องว่างพลังงานแคบจากสถิติของ Fermi (ประมาณค่าที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน)

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

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

N_C คือความหนาแน่นสถานะในแถบนำ (Conduction band density-of-states)

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

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

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

- *Physics* { *Mobility* (*Doping Dependence* (Masetti) *HighField Saturation* (Canali) *CarrierCarrier Scattering* (ConwellWeisskopf)) }

สภาพคล่องของพาหะจะระบุด้วยค่าสัง Mobility ซึ่งเป็นการระบุสภาพคล่องของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยในค่าสังนี้เราสามารถระบุโมเดลสภาพคล่องของพาหะได้มากกว่าหนึ่งโมเดล ถ้ามีการระบุสภาพคล่องของพาหะมากกว่าหนึ่งโมเดล สภาพคล่องของพาหะที่แตกต่างกัน (μ_1, μ_2, \dots) สำหรับเนื้อสาร (bulk), สภาพคล่องของพาหะที่ผิว (Surface mobility), และชั้นบางๆ (Thin layers) จะถูกนำมารวมกันโดยใช้กฎของ Matthiessen (Matthiessen's rule)

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

และถ้ามีการใช้โมเดลการอิมิตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High-field saturation) สภาพคล่องของพาหะขั้นสุดท้ายจะถูกคำนวณเป็นสองขั้นตอน อันดับแรกสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ (μ_{low}) จะถูกกำหนดตามสมการที่ (3.9) อันดับต่อมาสภาพคล่องของพาหะขั้นสุดท้ายจะถูกคำนวณจากสูตรที่เป็นฟังก์ชันของแรงขับ (driving force) (F_{hfs})

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

โดยโมเดลสภาพคล่องของพาหะตัวแรกที่เราเลือกใช้คือ Doping Dependence ซึ่งเป็นโมเดลการลดลงของสภาพคล่องของพาหะ (mobility degradation) เนื่องจากการกระเจิงกับสารเจือหรือสิ่งเจือปน (impurity scattering) เราจะเลือกใช้โมเดลสภาพคล่องของ Masetti ซึ่งเป็นโมเดลมาตรฐานสำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

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

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

สภาพคล่อง μ_{min1} , μ_{min2} และ μ_1 , ความเข้มข้นการเจือ (doping concentration) P_c , C_r และ C_s , และตัวยกกำลัง α และ β จะถูกกำหนดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับโมเดลของ Masetti

Symbol	Electrons	Holes	Unit
μ_{min1}	52.2	44.9	cm ² /Vs
μ_{min2}	52.2	0	cm ² /Vs
μ_1	43.4	29.0	cm ² /Vs
P_c	0	9.23×10^{16}	cm ⁻³
C_r	9.68×10^{16}	2.23×10^{17}	cm ⁻³
C_s	3.43×10^{20}	6.10×10^{20}	cm ⁻³
α	0.680	0.719	-
β	2.0	2.0	-

ส่วนสภาพคล่องของพาหะที่การเจือระดับต่ำ (low-doping mobility) μ_{const} จะถูกระบุด้วยโมเดลสภาพคล่องคงที่ (constant mobility model) ซึ่งเป็นโมเดลสภาพคล่องที่ขึ้นกับการกระเจิงจาก โฟนอนเท่านั้น (phonon scattering) ดังนั้นตัวโมเดลจึงขึ้นกับอุณหภูมิของแลตทิซเพียงอย่างเดียว

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

ซึ่ง μ_L คือสภาพคล่องของพาหะเนื่องจากการกระเจิงกับโฟนอนในเนื้อสาร (bulk phonon scattering) ค่ามาตรฐานของ μ_L และตัวยกกำลัง ζ จะถูกแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่

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

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

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

ตัวแปร D และ F จะถูกระบุในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของโมเดล Conwell-Weisskopf สำหรับซิลิคอน

Symbol	Value	Unit
D	1.04×10^{21}	$\text{cm}^{-1} \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
F	7.452×10^{13}	cm^{-2}

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

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

สำหรับโมเดลการอิ่มตัวสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High-Field Saturation) ในสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ความเร็วลอยเลื่อนของพาหะจะไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าอีกต่อไป แต่ความเร็วจะอิ่มตัวสู่ความเร็วจำกัด v_{sat} โมเดลการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะประกอบไปด้วยโมเดลย่อย 3 โมเดลคือ โมเดลสภาพคล่องจริง (actual mobility model), โมเดลการอิ่มตัวของความเร็ว (velocity saturation model) และ โมเดลของแรงขับ (driving force model) โดยโมเดลมาตรฐานของการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะเป็นโมเดลของ Canali

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

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

ซึ่ง μ_{low} หมายถึงสภาพคล่องที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ (low-field mobility) เป็นโมเดลสภาพคล่องของพาหะที่ใช้ไปก่อนหน้านี้ (μ_{dop} และ μ_n) ด้วยกำลัง β เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิเนื่องจาก

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

โดยค่าของตัวแปรในสมการที่ (3.16) และตัวแปร α ในสมการที่ (3.15) จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรของโมเดล Canali (ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอน)

Symbol	Electrons	Holes	Unit
β_0	1.109	1.213	-
β_{exp}	0.66	0.17	-
α	0	0	-

สำหรับโมเดลความเร็วอิ่มตัว v_{sat} ของโมเดล Canali (โมเดลสำหรับซิลิคอน) จะถูกกำหนดโดย

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

ซึ่งค่าตัวแปรในสมการที่ (3.17) จะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรการอิ่มตัวของความเร็ว

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

และค่ามาตรฐานสำหรับสนามที่ขับ (driving field) อิเล็กตรอนก็คือ (พิจารณาเฉพาะกรณีสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่ถูกใช้ในงานวิจัย)

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

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

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

- Physics { Recombination (SRH (DopingDependence) TrapAssistedAuger) }

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

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

โดยที่

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

และ

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

ซึ่ง E_{trap} คือผลต่างระหว่างระดับพลังงานของข้อบกพร่อง (defect level) และระดับพลังงานอินทริ-นซิค (intrinsic level) ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอนคือ $E_{trap} = 0$

สำหรับการจำลองแบบด้วยการใช้สถิติของเฟอร์มิสมการที่ (3.20) จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็น

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

โดย γ_n และ γ_p จะถูกระบุเป็น

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

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

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

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

ส่วนช่วงชีวิตพาหะ (lifetime) ของอิเล็กตรอน τ_n และโฮล τ_p จะเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับปัจจัยของการเจือสาร (doping-dependent), สนามไฟฟ้า (field-dependent) และอุณหภูมิ (temperature-dependent)

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

ซึ่ง $c = n$ หรือ $c = p$

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

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

ซึ่งค่ามาตรฐานของตัวแปรต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 3.7

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

Symbol	Electrons	Holes	Unit
τ_{min}	0	0	s
τ_{max}	1×10^{-5}	3×10^{-6}	s
N_{ref}	1×10^{16}	1×10^{16}	cm^{-3}
γ	1	1	-

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

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

หรือแสดงในรูปของเอกซ์โพเนนเชียล จะใช้คำสั่งเป็น SRH (ExpTempDependence)

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

ซึ่งค่าของตัวแปร T_α และ C จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานของตัวแปรสำหรับช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

Symbol	Electrons	Holes	Unit
T_α	-1.5	-1.5	-
C	2.55	2.55	-

ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่ขึ้นกับสนามไฟฟ้าหรือการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้า (field enhancement) ซึ่งจะลดช่วงชีวิตการผสมกลับของ Shockley-Read-Hall ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าความเข้มสูง เราไม่ควรละเลยถ้าหากสนามไฟฟ้าเกินค่าประมาณ 3×10^5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในบางบริเวณของอุปกรณ์

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

โมเดลของ Schenk จะถูกระบุในฟังก์ชันที่ขึ้นกับความเข้มของสนาม $g_c(F)$ ในสมการช่วงชีวิตของพาหะ Shockley-Read-Hall (สมการที่ (3.21)) ในกรณีของอิเล็กตรอน $g_c(F)$ จะอยู่ในรูป

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

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

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

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

สำหรับอิเล็กตรอน E , จะสัมพันธ์กับระดับพลังงานของข้อบกพร่อง (defect level) E_{trap} ของสมการ (3.21) และ (3.22) โดย

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

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

ในโมเดล Rydberg ของเดิมความหนาแน่นอิเล็กตรอน n ในสมการ (3.20) จะถูกแทนที่ด้วย

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

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

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

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

ได้ผลเฉลยโดยประมาณ

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

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

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

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

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

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

นอกจากโมเดลการผสมกลับของ Shockley-Read-Hall ที่กล่าวไปข้างต้นแล้วเรายังเลือกใช้โมเดลการผสมกลับอีกหนึ่งโมเดลนั่นก็คือ โมเดลการผสมกลับของโอเจอร์ผ่านระดับกับดัก (Trap-assisted Auger recombination (TAA)) ซึ่งเป็นโมเดลการผสมกลับผ่าน trap level เหมือนกับโมเดลของ SRH แต่จะเกี่ยวข้องกับพาหะสามตัว โดยโมเดลนี้พัฒนามาจากโมเดลการผสมกลับ SRH และ Couple defect level (CDL) อัตราการผสมกลับแบบโอเจอร์จะเหมือนกับอัตราการผสมกลับ SRH แต่ lifetime ของพาหะในสมการที่ 3.20 จะถูกแทนที่ด้วย

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

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

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

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

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

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

ดังนั้นอัตราการผสมกลับแบบ TAA จะเป็น

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

เนื่องจากในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ของจริงจะมีการสร้างชั้นออกไซด์บริเวณผิวเพื่อทำเป็นชั้นป้องกัน ดังนั้นในส่วนการผสมกลับเราจึงเพิ่มโมเดลการผสมกลับแบบ SRH ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและออกไซด์ และกำหนดหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอนและออกไซด์ของซิลิคอนเข้าไปด้วย โดยใช้คำสั่ง

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

โมเดลการผสมกลับที่ผิวเป็นโมเดลที่พัฒนามาจากโมเดล SRH เนื่องจากที่ผิวหรือรอยต่อของวัสดุสองชนิดมักเกิดพันธะที่ขาดหรือข้อบกพร่องผลึกขึ้น (dangling bond or defect) ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าบริเวณเหล่านี้เป็นศูนย์กลางการผสมกลับหรือระดับกับดัก (recombination center or trap level) โดยโมเดลนี้สามารถนำไปใช้ได้กับหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ-สารกึ่งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ-ฉนวน โดยที่หน้าสัมผัสจะมีการใช้สูตรเพิ่มเติมซึ่งมีโครงสร้างสมมูลกับการผสมกลับแบบ SRH ในเนื้อสาร (bulk SRH recombination) ตามสมการ

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

ด้วย

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

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

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

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

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรของโมเดลการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH

Symbol	Electrons	Holes	Unit
s_0	1×10^3		cm/s
S_{ref}	1×10^{-3}		-
N_{ref}	1×10^{16}		cm ⁻³
γ	1		-
E_{trap}	0		eV

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

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เราจะใช้โมเดลการขนส่งพาหะแบบกัลวานิก (Galvanic transport model) ซึ่งเป็นโมเดลที่อาศัยสมการความหนาแน่นกระแสการแพร่-ลอยเลื่อนที่เพิ่มเติมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไป โดยสิ่งที่กระทำต่อสมการขนส่ง (transport equations) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์นั้น เป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ที่มีต่อพาหะ [55-57] ด้วยเหตุนี้สมการความหนาแน่นกระแสจึงสามารถเขียนเป็น

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

เมื่อ $\alpha = n$ หรือ p

μ_α คือสภาพคล่องของพาหะ

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

μ_α คือสภาพคล่องพาหะของฮอลล์ (Hall mobility)

\vec{B} คือเวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (magnetic induction vector)

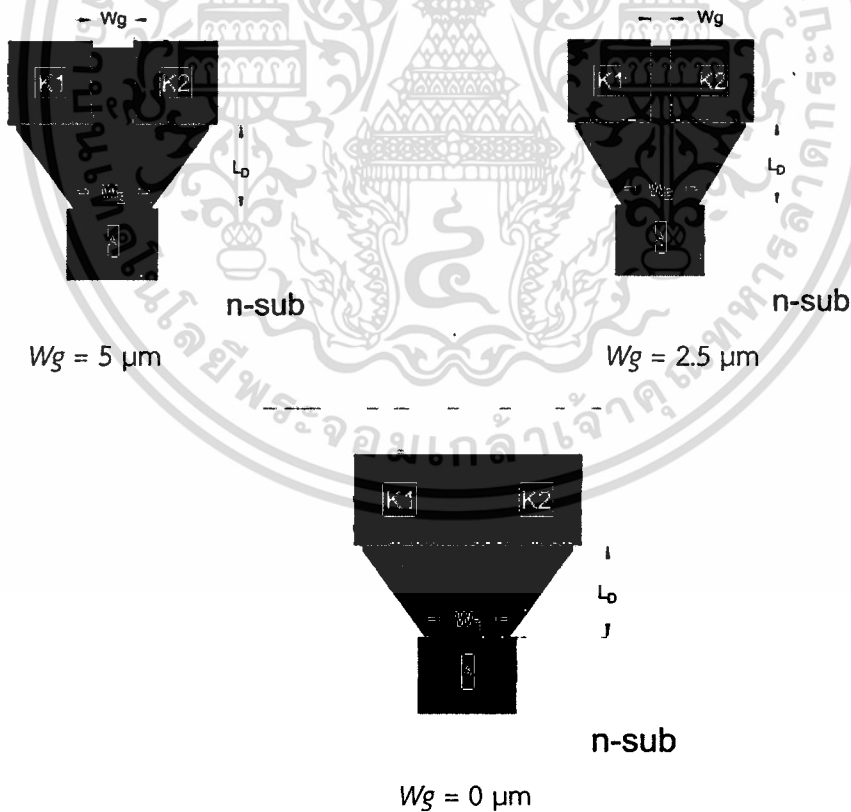
B คือขนาดของเวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

โดยสภาพคล่องของฮอลล์จะสัมพันธ์กับสภาพคล่องขณะลอยเลื่อน (drift mobility) ตามสมการ

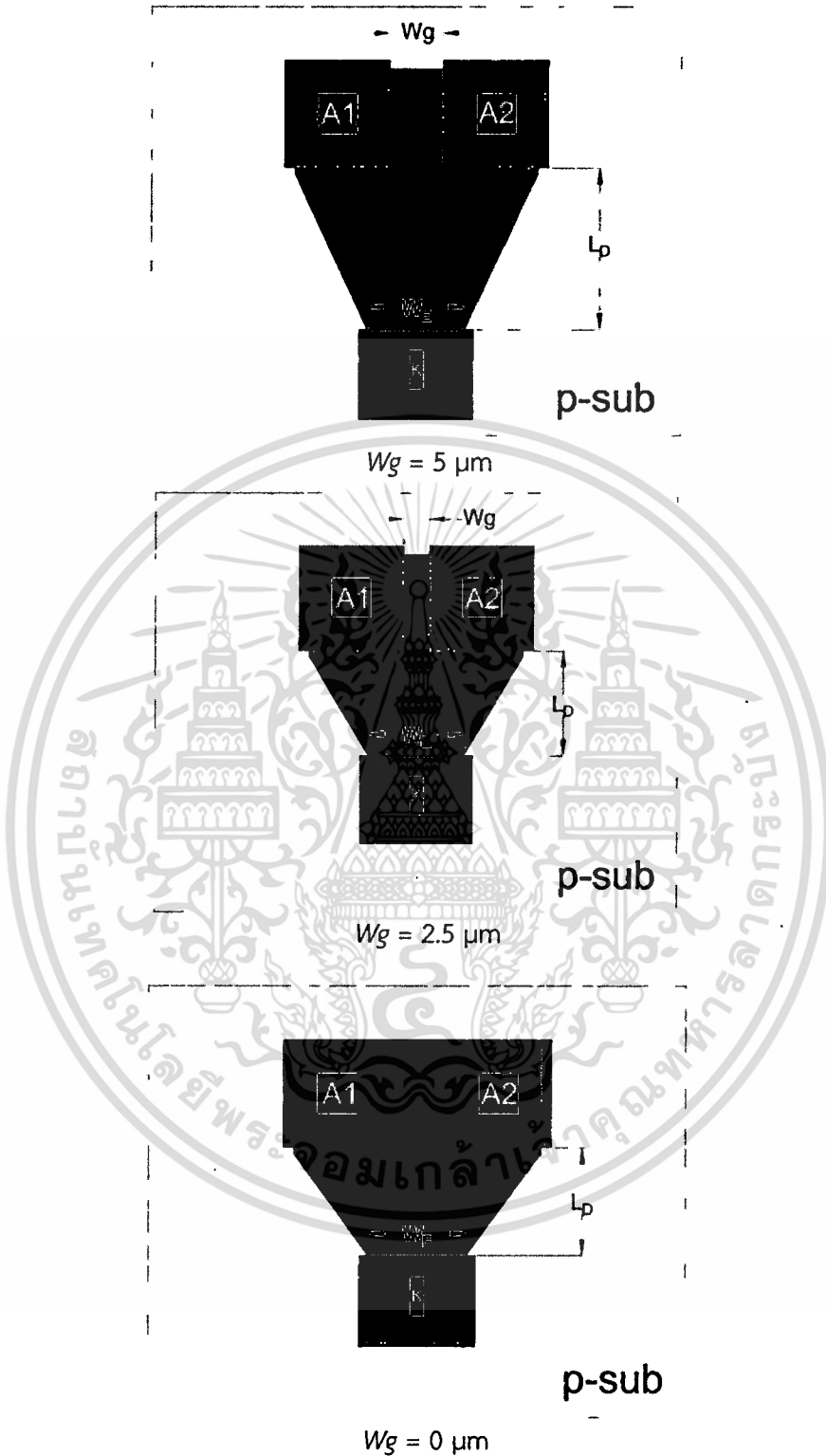
$\mu_n^* = r_n \mu_n$ และ $\mu_p^* = r_p \mu_p$ ซึ่ง r_n และ r_p คือตัวประกอบการกระเจิงของฮอลล์ (Hall scattering factors) ในกรณีของเนื้อซิลิคอน (bulk silicon) ค่าโดยทั่วไปจะเท่า $r_n = 1.1$ และ $r_p = -0.7$

3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

โครงสร้างที่ออกแบบจะเป็นโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบคาโทดแยกและแอนโนดแยกดังที่เคยกล่าวมาแล้วโดยระยะระหว่างขั้วแยก W_g จะห่างกัน 5, 2.5 และ 0 μm แผ่นฐานจะมีค่าความเข้มข้นสารเจือ 10^{15} cm^{-3} ขั้วร่วมจะมีค่าความเข้มข้น 10^{20} cm^{-3} ระยะห่างระหว่างขั้วแอนโนดถึงคาโทด L_d มีค่าคงที่ที่ 10 μm ความกว้างพื้นที่หน้าตัดฉีดพาหะจากขั้วร่วมมีค่าคงที่ที่ 8 μm โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่คาโทดแยกและแอนโนดแยกแสดงได้ดังรูป 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 มิติโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคาโทดแยกในการจำลองแบบ



รูปที่ 3.10 มิติโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบอานดแยกในการจำลองแบบ

บทที่ 4

กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่และเทคโนโลยีการผลิตที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดและเทคโนโลยีการผลิตขั้นพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยประกอบด้วย กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxidation process), กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography), การแพร่สารเจือ (Diffusion), การยิงฝังประจุ (Ion implantation), การสร้างชั้นโลหะ (Metallization) เป็นต้น และ ยังมีการออกแบบและการสร้างมาส์ค (Design and Masks) ซึ่งกระบวนการผลิตที่กล่าวมานี้จะประกอบไปด้วยกระบวนการผลิตต่างๆดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ลำดับขั้นตอนเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนที่ใช้ในกรสร้างแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Initial Wafer) ที่ใช้ในการสร้างเป็นดังนี้

- แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น หนา (100)
- ค่าพิกัดความต้านทาน 3-6 โอห์ม-เซนติเมตร
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 um
-

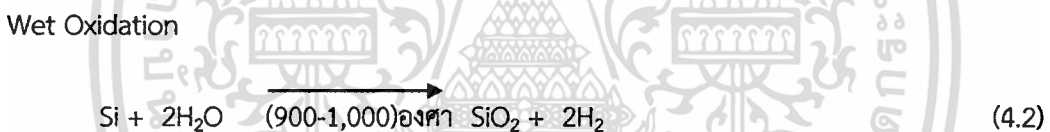
4.2 ทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean)

ก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการใดๆที่เกี่ยวกับการสร้าง จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้

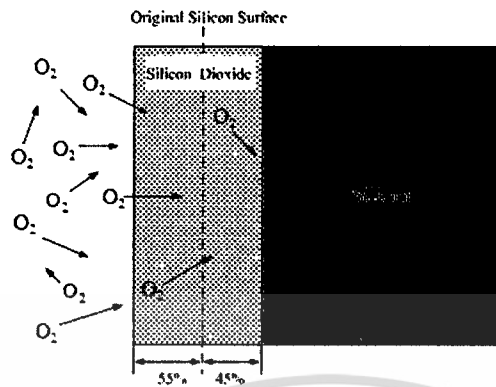
กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ออกไป ซึ่งหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยสารเคมีแล้ว ต่อจากนั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่าน้ำ ดีไอ (DI, deionized) เพื่อทำการล้างสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดผิวหน้าออกไป และขั้นตอนสุดท้ายนำไปสปินให้แห้ง

4.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการสร้างอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ โดยเป็นกระบวนการของการสร้างชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซออกซิเจน (O_2) ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์หรือออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ (H_2O) กับซิลิคอน (Si) เกิดเป็นสารประกอบ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) แสดงดังสมการดังนี้



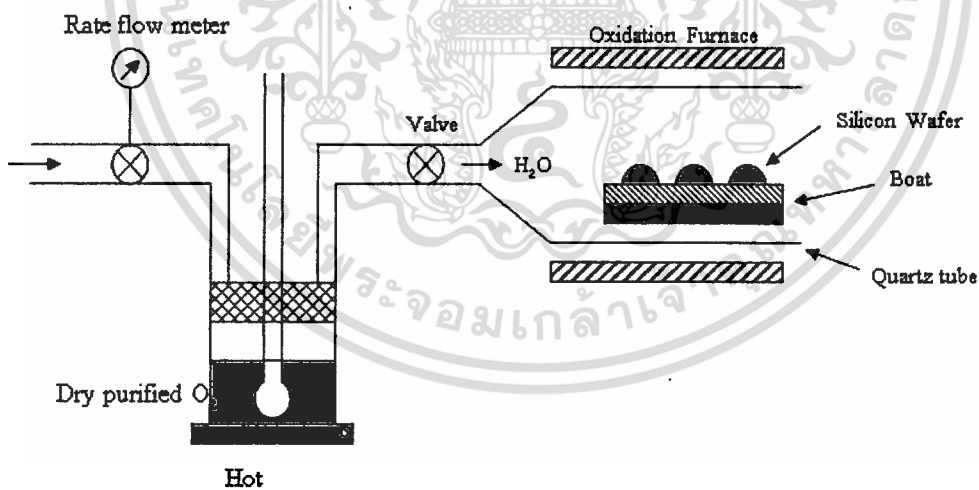
เริ่มต้นด้วยการที่ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่ผิวเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งจะปกคลุมอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) อย่างหนาแน่น โดยชั้นออกไซด์ที่ผิวจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้โมเลกุลของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนส่วนที่อยู่ลึกลงไปได้ อย่างไรก็ตาม อาจมีออกซิเจนบางส่วนที่สามารถแพร่ข้ามชั้นออกไซด์ที่ผิวเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนได้ ดังรูปที่ 4.2 ชั้นออกไซด์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่ป้องกันหรือลดการแพร่ของออกซิเจนให้ลดลง โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ขยายออกจากผิวหน้าเดิมของแผ่นเวเฟอร์ซึ่งมีความหนาประมาณ 55% และส่วนที่เกิดลึกลงไปในเนื้อซิลิคอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 45% จากผิวเดิมของแผ่นเวเฟอร์จากกลไกของการเกิดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน เกิดเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนกับซิลิคอนดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ



รูปที่ 4.2 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน

4.3.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

จากรูปที่ 4.3 เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า Dry Oxidation เนื่องจากโมเลกุลเองดังที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของอะตอมของสารเจือปนน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ



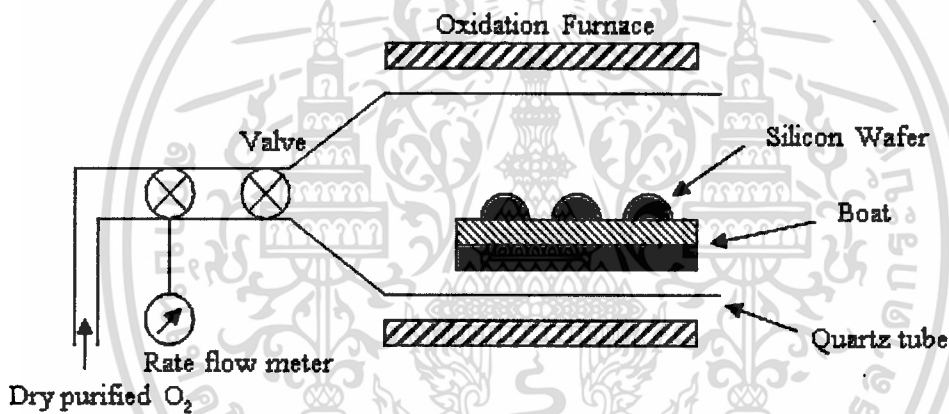
รูปที่ 4.3 กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น

4.3.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)

จากรูปที่ 4.4 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูง พื้นผิวที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่ากรณีของ Wet Oxidation แต่ ปฏิกิริยาเกิดช้าและอัตราการเกิดต่ำกว่าแต่เกิดออกไซด์ได้ช้ากว่าแสดงดังรูปที่ 4.4

ข้อดี การสร้างชั้นซิลิคอนด้วยชั้นออกไซด์ด้วยวิธีนี้ จะให้ชั้นออกไซด์ที่มีความเป็นฉนวนสูงและมีคุณภาพดี เพราะมีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถสร้างเป็น Gate Oxide

ข้อเสีย เนื่องจากขั้นตอนนี้ใช้ก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดการรวมตัวกับซิลิคอนได้ยากกว่าแบบ Wet ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นั้น จะต้องใช้เวลานานในการสร้าง จึงสร้างชั้นออกไซด์หนาได้ยาก



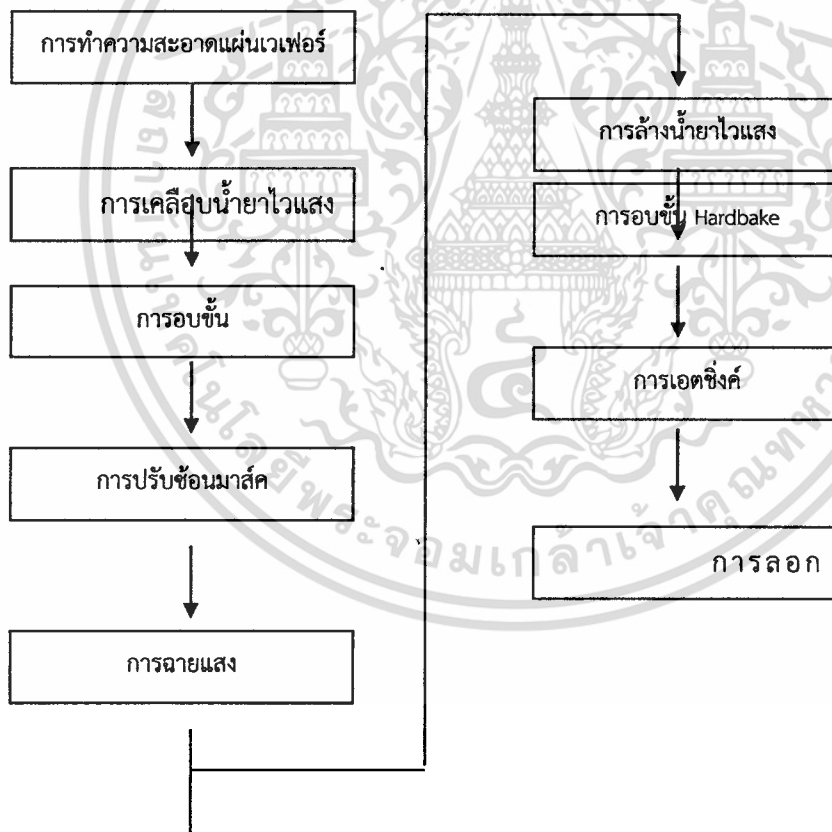
รูปที่ 4.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง

4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการถ่ายแบบ (Patterning) จากมาสก์ (mask) หรือ เรติเคิล (reticle) จากการออกแบบ ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเมื่อฉายแสงลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเริ่มแรกถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางการผลิตแผ่นวงจรรวม (integrated circuit) ต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทรานซิสเตอร์ และแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ

อย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิต IC โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างลวดลายต่างๆ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ ก่อนทำการกัด (etching), การยิงฝังประจุ (ion implantation) หรือการแพร่สารเจือ (Diffusion) เพื่อทำเป็นขั้วต่างๆ ต่อไป

โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือเริ่มต้นจากการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer clean) เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ออกจากผิวหน้า ต่อมาเป็นการเตรียมผิวหน้า (Preparation) เพื่อกำจัดความชื้นออกไป หลังจากนั้นจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist coating) และทำการอบ (soft bake) เพื่อให้น้ำยาไวแสงติดกับแผ่นเวเฟอร์ได้ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นกระบวนการฉายแสง ซึ่งเป็นการถ่ายแบบจากมาสก์ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการอบอีกรอบหนึ่ง หลังจากนั้นจะส่งต่อไปยังขั้นตอนของการกัด หรือกระบวนการยิงฝังประจุต่อไป กระบวนการ Photolithography Process จะมีขั้นตอนพื้นฐานต่างดังรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process

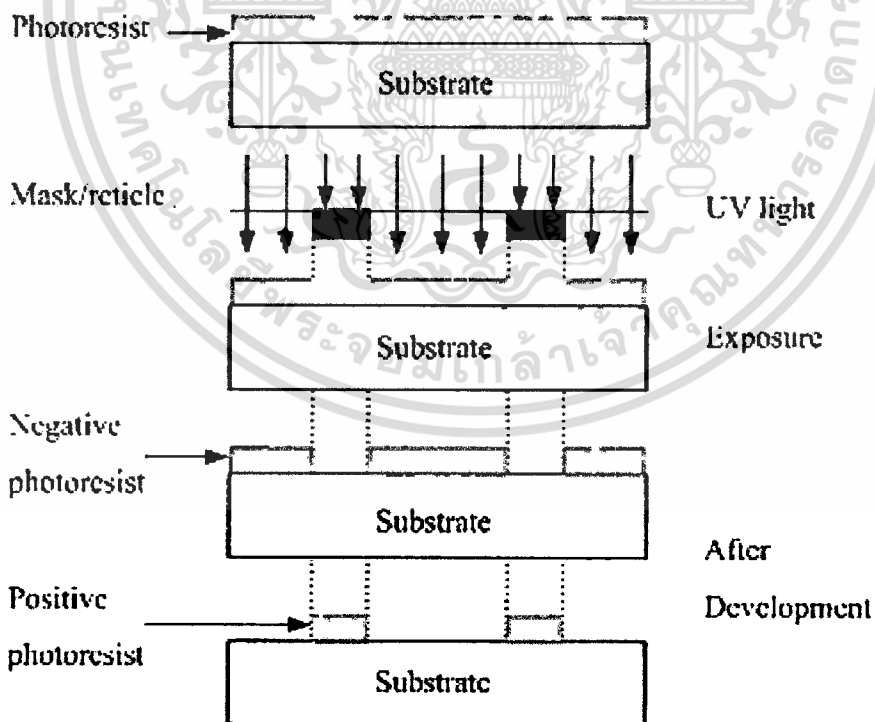
4.4.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ฝุ่นละออง สารอินทรีย์หรืออไอออนต่างๆ สิ่งสำคัญของกระบวนการ Photolithography สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อยที่สุดคือน้ำ DI(deionized) ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองฝุ่นละออง อนุภาคและสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำDI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

4.4.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนการเคลือบชั้นฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงที่ผิวด้านบนของแผ่นเวเฟอร์ โดยน้ำยาไวแสงจะมีด้วยกันสองแบบคือ แบบ Positive และแบบ Negative ซึ่งมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะมีด้วยกันหลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมของการนำไปใช้งานสารไวแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารไวแสงแบบลบ (Negative Photoresist)
2. สารไวแสงแบบบวก (Positive Photoresist)



รูปที่ 4.6 คุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

สารไวแสงทั้งสองชนิด จะให้ผลของการทำงานที่ตรงกันข้ามกัน กล่าวคือถ้าหากใช้ Negative Photoresist ส่วนที่ถูกแสงจะไม่ลอกออกเมื่อถูก Development ส่วน Positive Photoresist ส่วนที่ถูกแสงจะลอกออกเมื่อถูก Development แสดงดังรูปที่ 4.6

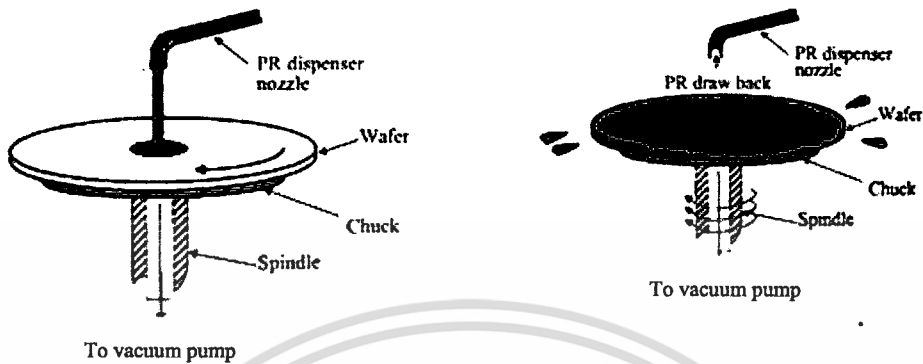
สิ่งสำคัญก่อนเคลือบสารไวแสงคือแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบในตู้ประมาณ 30-60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดออกได้ง่าย

4.4.3 วิธีการเคลือบ (Coating)

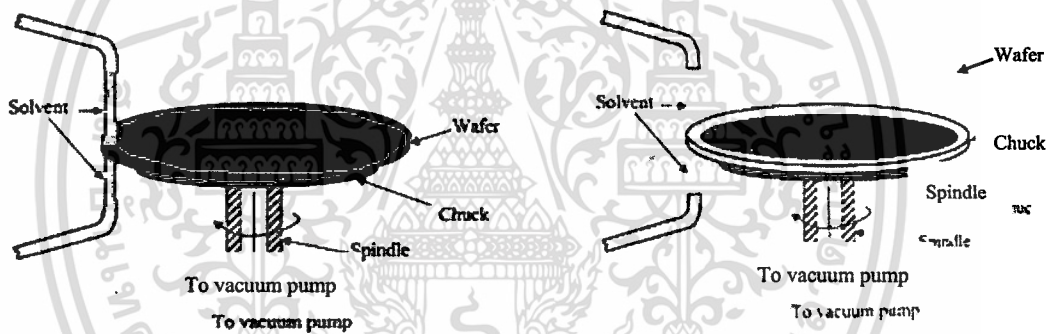
การเคลือบนำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกหรือแผ่นเวเฟอร์ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุ อื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้ด้วยวิธีด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

- แบบสปินเนอร์ (Spinner coating)

เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด สำหรับการเคลือบนำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกแบบวงกลม ซึ่งการเคลือบนำยาไวแสงด้วยวิธีนี้ จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวหมุน หรือสปินเดิล (Spindle) โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วรอบสูง แผ่นผลึกจะถูกวางลงบนแท่นหมุน และทำให้ยึดติดได้ด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นนำยาไวแสงจะถูกหยดลงบริเวณตรงกลางของแผ่นผลึก ด้วยปริมาณที่พอเหมาะ เมื่อแผ่นผลึกถูกหมุน (spin) ด้วยความเร็วรอบราว 3000-6000 rpm/min ใช้เวลาประมาณ 10-30 วินาที นำยาไวแสงจะถูกแรงเหวี่ยง ทำให้กระจายออกไปโดยรอบ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนผิวของแผ่นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยความหนาของฟิล์มบางไวแสงที่ได้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 1000- 2000 อังสตรอม ถ้าหากความเร็วรอบต่ำเกินไป จะได้ชั้นของฟิล์มไวแสงที่หนามาก ในขณะที่ถ้าความเร็วรอบสูงๆ ความหนาของชั้นฟิล์มจะไม่เท่ากัน โดยบริเวณขอบของแผ่นผลึกจะหนามากกว่าส่วนอื่นๆ หลังจากเคลือบนำยาไวแสงที่ผิวของแผ่นผลึกเรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องมีการลอกฟิล์มที่บริเวณขอบแผ่นออก เพื่อไว้ใช้สำหรับการจับหรือเคลื่อนย้ายแผ่นผลึก ดังในรูปที่ 4.8 โดยขั้นตอนกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ต้องมีการระมัดระวังฝุ่นละอองเป็นพิเศษ ดังนั้นต้องทำภายในห้องสะอาดที่มีการควบคุมปริมาณของฝุ่นละออง หรือ Clean room ซึ่งฝุ่นละอองในอากาศในห้องนี้ จะถูกควบคุมให้มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้ระบบกรองฝุ่นประสิทธิภาพสูง (HEPA Filter)



รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์



รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์

▪ แบบสเปรย์ (Spray coating)

วิธีการเคลือบน้ำยาไวแสงแบบสเปรย์ น้ำยาไวแสงจะถูกฉีด หรือพ่นออกมาให้เป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึก และยึดเกี่ยวกันเป็นแผ่นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่าย และสะดวกแต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท ซึ่งการควบคุมความหนาของฟิล์มที่ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอนซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกัน ชั้นออกไซด์ ด้านล่างของแผ่นผลึก

▪ แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีแบบใช้ลูกกลิ้ง จะนิยมใช้ในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นชิพ (Chip) โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ทั้ง 2 ด้านเพื่อป้องกันเศษฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกอื่นที่จะเกิดขึ้น ขณะทำการตัดแยกชิพ ด้วยเลื่อย (sawing) หรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก

4.4.4 การอบขึ้น

ภายหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงแล้ว จะต้องนำแผ่นผลึกไปอบเพื่อให้ชั้นของน้ำยาไวแสงแห้งสนิท ก่อนจะนำไปทำขั้นตอนต่อไป การอบในขั้นนี้ เรียกว่า Prebake หรือ Soft bake ซึ่งใช้อุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ และถ้าเป็นน้ำยาไวแสงชนิดบวกจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเล็กน้อยคือที่ประมาณ 80-90 °C สำหรับการอบที่ใช้เวลานานเกินไป หรือใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นน้ำยาไวแสงได้ เช่น เกิดมีปฏิกิริยาเคมี - ความร้อน หรืออาจทำให้ไหม้ได้ การอบมีหลายวิธีที่สามารถกระทำได้ เช่น ใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection Oven) ซึ่งในตู้อบจะมีพัดลมช่วยพัดไอร้อนจากขดลวดความร้อน หรือฮีตเตอร์ (heater) ขึ้นมาผ่านแผ่นผลึกทำให้แผ่นผลึกร้อน การอบสามารถทำได้จำนวนหลายแผ่นพร้อมๆ กันโดยแผ่นผลึกจะถูกเก็บไว้ในกล่องคาสเซ็ทพิเศษ ซึ่งวิธีการให้ความร้อนด้วย

วิธีนี้แผ่นผลึกจะได้รับความร้อนจากผิวรอบนอกเข้าไปด้านใน วิธีการนี้อาจทำให้ผิวหน้าของชั้นน้ำยาไวแสงได้รับความร้อนก่อน ที่อาจเป็นสาเหตุของการแข็งตัวและป้องกันไม่ให้ความชื้นที่อยู่ด้านในออกมาภายนอกได้ซึ่งถือเป็นข้อเสียและไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับงานที่มีความละเอียดสูง สำหรับในสายการผลิตวงจรรวมในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมอบแผ่นผลึกทีละแผ่น โดยเคลื่อนอยู่บนสายพาน ซึ่งถูกฉายด้วยรังสีอินฟราเรด วิธีการนี้ฐานรองที่เป็นแผ่นผลึกซิลิคอนจะได้รับความร้อนก่อนเพราะซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าชั้นของน้ำยาไวแสง ดังนั้นความร้อนจึงเริ่มจากฐานรองแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วขึ้นไปสู่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งทำให้สามารถไล่ความชื้นออกมาได้โดยไม่เกิดปัญหา วิธีให้ความร้อนเช่นนี้ เรียกว่า “Bottom up heating” นอกจากนี้อาจใช้วิธีการแบบแผ่นร้อน (Hot Plate) โดยนำแผ่นซิลิคอนไปวางบนแผ่นร้อน หรืออาจใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนก็สามารถทำได้เช่นกัน

4.4.5 การปรับซ้อนมาร์ค (Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยการนำกระจกโฟโตมาส์ควางทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโตมาส์คชั้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มี การปรับซ้อนมาร์ค ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใด

ของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเหลวแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 เป็นต้นไปก่อนที่จะฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับซ้อนมาส์ค เพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาส์คซ้อนทับกับลวดลายที่อยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ขบวนการโฟโตกราฟีสามารถเปิดชั้นออกไซด์ได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับซ้อนจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับซ้อนมาส์ค ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆ คือ นำแผ่นผลึกวางและติดกับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับเลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาส์คจะถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือผลึกเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนแผ่นโฟโตมาส์คพร้อมกับทำการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่บนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาส์คซ้อนทับกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นทำการปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาส์คดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

4.4.6 การฉายแสง (Exposure)

การฉายแสง (Exposure) คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับซ้อนมาส์ค (Alignment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเล็ตเอ็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาส์คที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ ส่วนที่ผ่านได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตริซิสบนผิวซิลิคอน การเอ็กโพสหรือฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตริซิสอย่างสมบูรณ์

4.4.7 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop ส่วนที่ถูกแสงจะละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

4.4.8 การอบชั้น Hardbake

หลังจากการฉายแสงและทำการ Development ขั้นตอน Hardbake จะช่วยทำให้โฟโตริซิส ติดกับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ดีขึ้น ขั้นตอนนี้จะอบในเตาที่อุณหภูมิ 120 องศา ถึง 180 องศา เป็นเวลา 20 ถึง 30 นาที

4.4.9 การกัด (Etching)

การแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ กัดด้วยสารละลายทางเคมี (Wet chemical etching) และการกัดโดยใช้ก๊าซหรือการกัดแบบกัดแห้ง (Dry etching)

การกัดคือการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องหรือพื้นที่ให้ได้ตามต้องการ สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีส่วนผสมหลักคือกรดไฮโดรฟลูอริกหรือ HF จะเป็นสารละลายที่ใช้กัดซิลิคอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการกัดอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ ที่ 25 องศา เราต้องคำนวณหาความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ให้เหมาะสมเพราะสารละลายทางเคมีจะกัดทุกทิศทุกทางเท่ากันหมดถ้าเราปล่อยให้กัดในเวลาที่มากไปจะทำให้เกิดการกัดที่ด้านข้างทำให้ลวดลายเสียหายได้ หลังจากกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เราจะได้ช่องหรือลวดลายตาม มาส์คบนผิวหน้าซิลิคอนไดออกไซด์แล้ว

4.4.10 การลอกน้ำยาไวแสง

การลอกน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นผลึกเป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงไปใต้น้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พลาสมาเพื่อทำให้ผิวผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพร์สารเจือได้ ซึ่งถ้าบนผิวหน้าของซิลิคอนมีความสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร์สารเจือ

เมื่อลอกชั้นไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscope) เพื่อดูว่ามี การกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดที่มากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

4.5 กระบวนการแพร์สารเจือ (Deposition)

กระบวนการแพร์สารเจือเป็นการแพร์สารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพร์ด้วยอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (Source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้น

ขั้นตอนการแพร์สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งเป็นแหล่งเจือโบรอน (Boron Source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และฟอสฟอรัสใช้สร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจือทำให้อะตอมของสารเจือเคลื่อนที่เข้าไปยังฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิตลอดจนระยะเวลาในการแพร์ที่มีผลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร์ ใน

ขบวนการแพร่สารเจือแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การแพร่สารเจือ ขั้นต้น (Pre-deposition)และการขับลึก (Drive-in)

4.5.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

ธาตุที่สามารถนำมาใช้ในการแพร่สารเจือชนิดพี (p-type) ในงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอน ได้แก่ แกลเลียม (Gallium), อะลูมิเนียม (Aluminium), โบรอน (Boron) และอินเดียม (Indium) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงๆ นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกธาตุที่ใช้เป็นสารเจืออย่างพิถีพิถัน ไม่ใช่สามารถใช้ได้ทุกกรณี ตัวอย่างเช่น จะไม่ใช้ธาตุแกลเลียมเป็นสารเจือชนิดพีเนื่องจากแกลเลียมสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดี หรือก็คือ แกลเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นออกไซด์ที่สูงนั่นเอง ทำให้การใช้ชั้นออกไซด์ป้องกันผิวของซิลิคอนใช้ไม่ได้ผล นอกจากนี้แล้วการเลือกใช้อะลูมิเนียมเป็นสารเจือยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ด้วย อย่างเช่น อะตอมของโบรอนจะทำให้เกิดโฮลได้ดีกว่าอะตอมของอินเดียม เนื่องจากระดับพลังงานผู้รับของโบรอนอยู่ที่ 0.01 eV ขณะที่ของอินเดียมอยู่ที่ระดับ 0.16 eV ส่วนอะลูมิเนียมมีข้อเสียคือ สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ทำให้กลายเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ง่ายจากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมานี้ จึงทำให้โบรอนเป็นธาตุที่นิยมนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดพีมากที่สุด โดยโบรอนมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่อยู่ที่ประมาณ $10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิ $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ ทำให้สามารถควบคุมการแพร่ได้สะดวก

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



จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่ แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ $900 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไน

ไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ในสถานะของก๊าซไนโตรเจน)

4.5.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

ธาตุที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus), พลวง (Antimony) และสารหนู (Arsenic) การจะเลือกธาตุที่จะนำไปเป็นสารเจือทำได้โดยไม่จำกัด ซึ่งต่างจากกรณี สารเจือชนิด p กล่าวคือ ธาตุเหล่านี้ใช้งานได้ดี ในแต่ละลำดับชั้น ตัวอย่างเช่น พลวงและสารหนู ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำมักใช้เป็นสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างชั้นพ้ง (buried layer) n+ ซึ่งเป็นการแพร่ครั้งแรกในงานสร้างวงจรรวม ส่วนการแพร่อื่นๆ โดยทั่วไปนิยมใช้ธาตุ ฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดเอ็น เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของฟอสฟอรัสสูงกว่าพลวงและสารหนู ดังนั้นจึงนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อความประหยัด คือสามารถแพร่ได้เร็วในช่วงเวลาอันสั้น การแพร่ฟอสฟอรัสสามารถกระทำให้ 3 ลักษณะเช่นเดียวกันคือ ฟอสฟอรัส อาจนำมาได้จากสารประกอบ 3 ชนิด เช่น ในสถานะของแข็งได้แก่ ฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) หรือในสถานะของเหลวคือ ฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์ ($POCl_3$) หรือในสถานะก๊าซคือ ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ซึ่งเป็นก๊าซพิษ และอาจจะเปิดได้ปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์ (P_2O_5) และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของฟอสฟอรัสออกจาก P_2O_5 ที่ผิวของซิลิคอน ซึ่งเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้



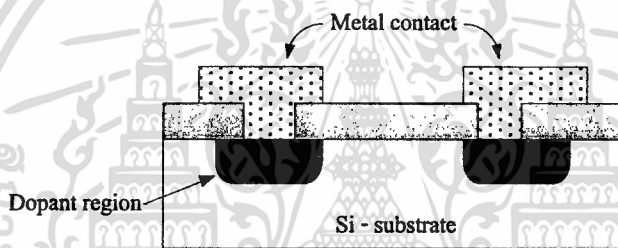
โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ $POCl_3$ เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลาตามต้องการในสถานะของก๊าซไนโตรเจน

4.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalization Process)

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ละส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จึงจำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalization Process) ก่อน

การสร้างชั้นโลหะหรือ การเมทัลไลเซชัน (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายนอกเข้า โดยโลหะที่นำมาใช้จะมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium) ทองแดง (Copper), หรือโลหะผสมระหว่าง อะลูมิเนียมกับทองแดง (Al-Cu) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) หรือสารประกอบของซิลิคอนกับธาตุอื่นอย่าง ไททาเนียมซิลิไซด์ ที่มีความต้านไฟฟ้าน้อยกว่าโพลีซิลิคอน โดยการเลือกใช้โลหะสำหรับการทำเป็นขั้วโลหะนั้น แล้วแต่คุณสมบัติและความเหมาะสมต่องานที่นำไปใช้

สำหรับโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

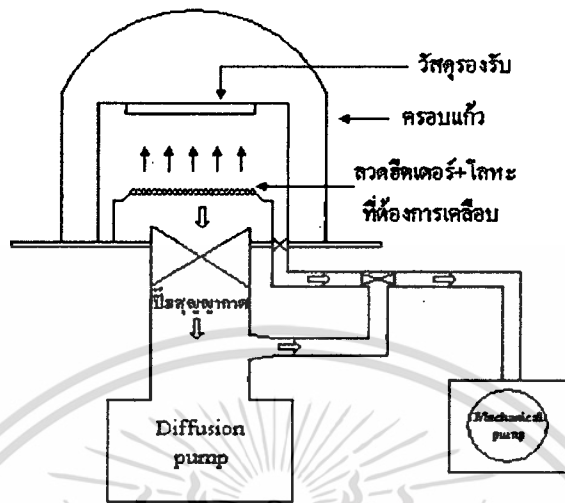


รูปที่ 4.9 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อตัวอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก

เทคนิคในกระบวนการเมทัลไลเซชันใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศโดยใช้เทคนิคกระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลต่อการแพร่กระจายไอออนแต่มีข้อเสียตรงอายุการใช้งานของไส้หลอดจะสั้น สำหรับการเคลือบโลหะทำได้โดยการทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ที่ทำจากทังสเตน (Tungsten) หรือ (Molybdenum)

เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ

เมื่อไส้หลอดถูกทำให้ร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะถูกควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้จนเป็นของเหลวที่ติดกับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางไว้ใน Chamber



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจะแยกกลายเป็นไอก่อน ธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้วัสดุต้องเลือกให้มีขนาดที่พอเหมาะสมกับสารที่ใช้ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร Al, Au, Ag, Pd เป็นต้น

4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

ในกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ สามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ คือ 1. ขั้นตอนการออกแบบมาสก์ (Mask) เพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนของการถ่ายแบบลงบนชิ้นงาน และ 2. ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ เป็นขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยรายละเอียดของกระบวนการสร้างสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.7.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

- มาสก์ที่ 1: Ohmic Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ โดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (N^+) เพื่อสร้างรอยต่อ Ohmic ให้กับขั้วแคโทด Cathod ซึ่งจะมีสองรอยต่อที่สมมาตรกัน

- **มาตรฐานที่ 2:** Diode Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ และแพร่อะตอมสารเจือโบรอน (P+) ที่ใช้สำหรับสร้างรอยต่อ P-N เป็นขั้วแอโนด
- **มาตรฐานที่ 3:** Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้ ด้วยการเปิดช่องบริเวณที่จะ สร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม
- **มาตรฐานที่ 4:** Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า

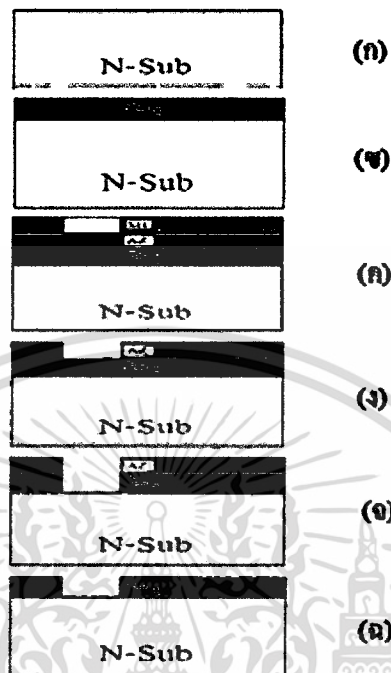
4.7.2 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

ขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ด้วยกัน ดังต่อไปนี้คือ 1. ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์ 2. ขั้นตอนการสร้างขั้วแคโทด 3. ขั้นตอนการสร้างขั้วแอโนด และ 4. ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะสำหรับการใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยขั้นตอนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.7.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์

ขั้นตอนกระบวนการผลิตส่วนแรกสำหรับการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ คือขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังป้องกันการรั่วไหลของกระแสพาหะ และบังคับให้พาหะไหลได้เฉพาะบริเวณที่เป็นช่องเปิดนั้น สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆอย่างละเอียดดังนี้

1. การสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่า Resistivity ความหนา ได้ 19-25 Ω -cm ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ 400 μm เริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนโดยการต้มใน Piranya ($3\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$) 10 นาที และทำการล้างในน้ำ DI (ให้น้ำไหลผ่าน) 5 นาที ต่อจากนั้นต้มใน Trichloethylenc 5 นาที Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที แล้วทำการล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาทีและล้างในน้ำ DI แก้วที่สองประมาณ 4 วินาทีจบด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน N_2 จะได้โครงสร้างดังรูปที่ 4.11 (ก)



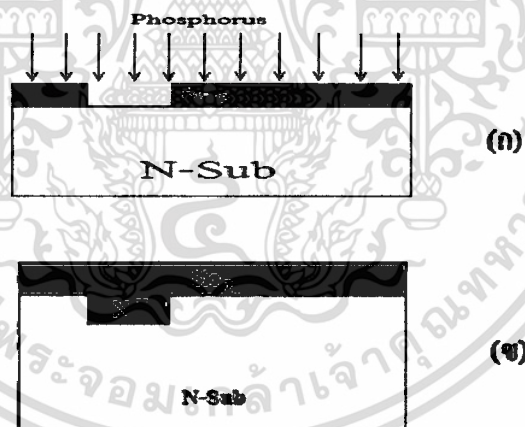
รูปที่ 4.11 (ก)-(ฉ) ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์

2. จากนั้นเป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จากกระบวนการออกซิเดชันทำการ dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที ต่อด้วย wet oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาทีจากนั้นก็กลับมาทำ dry oxidation ที่อุณหภูมิ 1,100 °C 1 ชั่วโมง 30 นาที แสดงโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.11 (ข)
3. ใช้กระบวนการสร้างลวดลาย (Photolithography) ของมาส์คที่ 1 เพื่อสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์โดยทำการถ่ายมาส์คที่ 1 ไปยังผิวน้ำของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 °C ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับซ้อนมาส์ค (Alignment M 1)และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้ก็จะต้องด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน N₂ และอบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที แสดงดังรูปที่ 4.11 (ค) และ (ง)
4. กระบวนการกัดชั้นซิลิคอน ด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.11 (จ) และ (ฉ)

4.7.4 ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นแคโทด

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชั้นแคโทด จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้เป็นสารชนิดเอ็นแบบเข้มข้น โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการเปิดช่องออกไซด์เป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะต่อกับกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส Diffusion ไนโตรเจน N_2 ที่ 800 cc/min ใช้เวลา 25 นาที ตามด้วยออกซิเจน O_2 1200 cc/min เป็นเวลา 10 นาทีต่อจากนั้นทำการจุ่มในสารละลาย HF 5 % และล้างออกด้วยน้ำ DI ทั้งสองแก้วตามด้วยเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน N_2 แสดงดังรูปที่ 4.12 (ก)
2. หลังจากนั้นทำการกระบวนการ drive in ทำอยู่ที่อุณหภูมิที่ $1100^{\circ}C$ โดยการ Dry Oxidation ด้วยออกซิเจน O_2 ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที ต่อกับ Wet Oxidation ด้วยออกซิเจน O_2 ที่ 1,200 cc/min เวลา 30 นาที แล้วต่อกับ Dry Oxidation อีกครั้งด้วยออกซิเจน O_2 ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข)

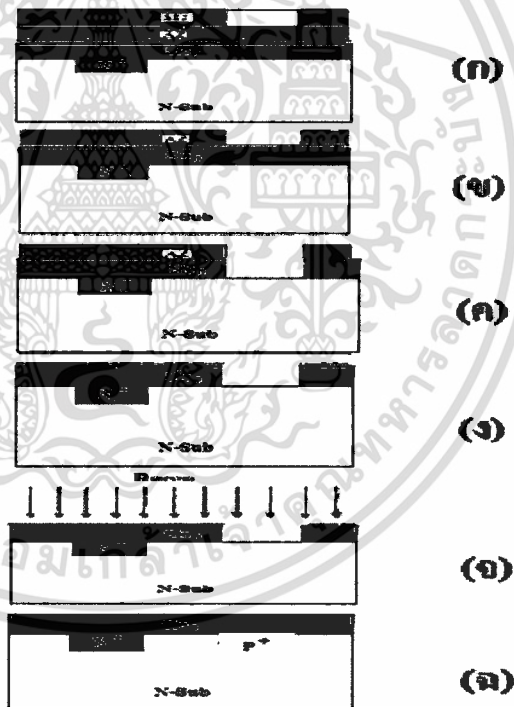


รูปที่ 4.12 (ก)-(ข) ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นแคโทด

4.7.5 ขั้นตอนการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นแอนโนด

ขั้นตอนนี้เป็น การเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารโบรอนที่จะให้ได้เป็นสารชนิดพีแบบเข้มข้น โดยขั้นตอน รายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสค์ที่ 2 เพื่อสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์โดยทำการถ่าย มาสค์ที่ 2 ไปยังผิวหน้า ของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่ตู้อบอุณหภูมิ 95 °C ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับชั้นมาสค์ (Alignment M2) และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้จะต่อด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีก สองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน N₂ และอบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ก)-(ข)



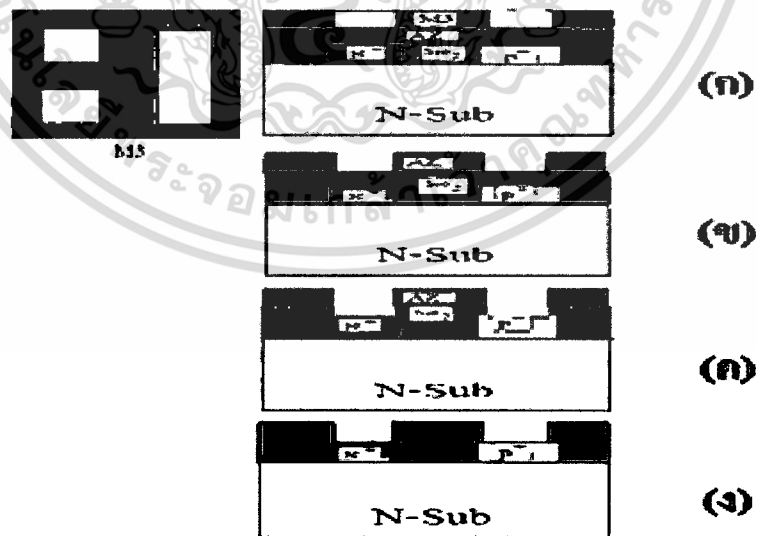
รูปที่ 4.13 (ก)-(ด) ขั้นตอนการสร้างชั้นแอโนด

2. กระบวนการกัดชั้นซิลิคอนด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที และล้างน้ำยา ไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 (ค)-(ง)

3. เมื่อทำการเปิดช่องออกไซด์ที่เป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะต่อด้วยกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนด้วยวิธี Activate ผ่าน B_2O_3 กับออกซิเจน O_2 ที่ 1200 cc/min เป็นเวลา 25 นาที ตามด้วยออกซิเจน O_2 1200 cc/min อีก 10 นาที ต่อจากนั้นทำการจุ่มในสารละลาย HF 5 % และล้างออกด้วยน้ำ DI ทั้งสองแก้วตามด้วยเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน N_2 แสดงดังรูปที่ 4.13 (จ)
4. หลังจากนั้นทำการกระบวนการ drive in ทำอยู่ที่อุณหภูมิที่ $1100^\circ C$ โดยการ Dry Oxidation ด้วยออกซิเจน O_2 ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที ต่อด้วย Wet Oxidation ด้วยออกซิเจน O_2 ที่ 1,200 cc/min เวลา 30 นาที แล้วต่อด้วย Dry Oxidation อีกครั้งด้วยออกซิเจน O_2 ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.13 (ฉ)

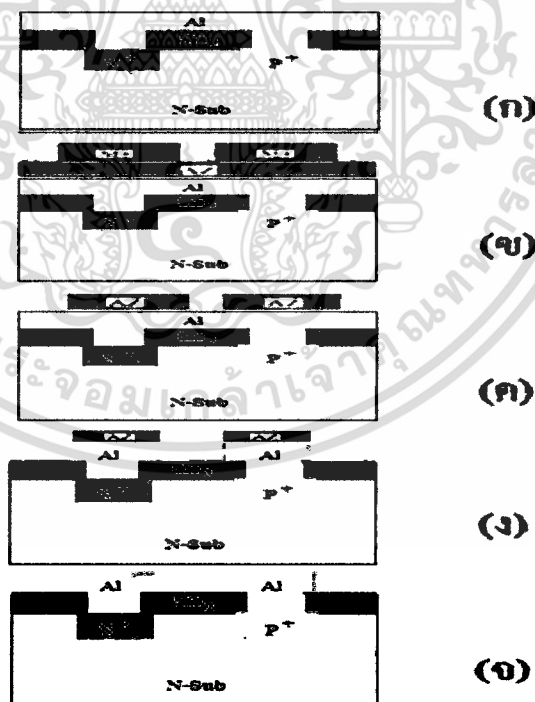
4.7.6 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ

1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 3 เพื่อสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์โดยทำการถ่ายมาสก์ที่ 3 ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ $95^\circ C$ ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับชั้นมาสก์ (Alignment M3) และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้จะต่อด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน N_2 และอบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 20 นาที แสดงได้ดัง รูปที่ 4.14 (ก)-(ค)



รูปที่ 4.14 (ก)-(ง) ขั้นตอนการเปิดช่องสร้างขั้วโลหะ

2. กระบวนการกัดชั้นซิลิคอน ด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 (ง)
3. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporator แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 (ก)
4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์ที่ 4 (AL) เพื่อสำหรับการเปิดชั้นโลหะอลูมิเนียมโดยทำการถ่ายมาสก์ที่ 4 ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่ตู้อบอุณหภูมิ 95 °C ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับชั้นมาสก์ (Alignment M4) และฉายแสง(UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้ก็ต่อด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน N₂ และอบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 (ข)-(ค)



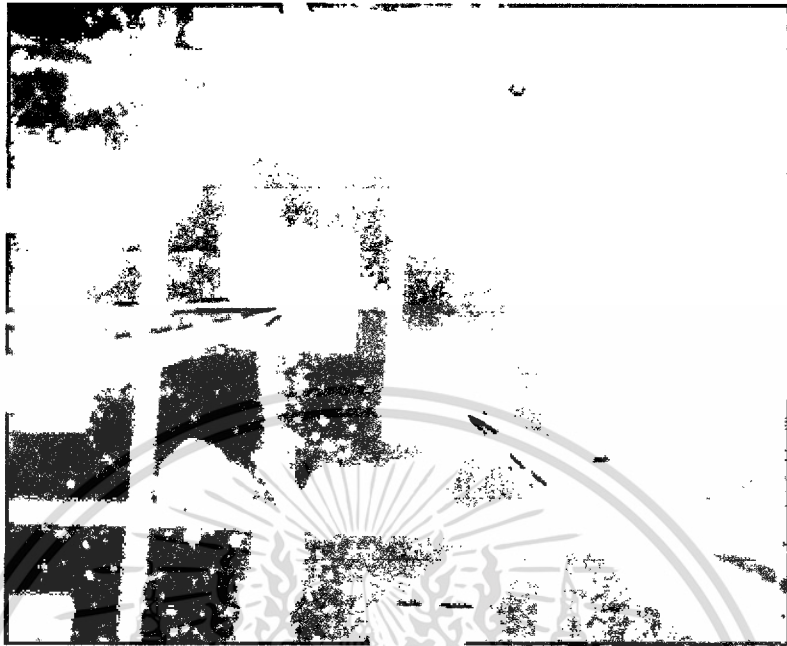
รูปที่ 4.15 กระบวนการสร้างชั้นโลหะ

5. กระบวนการกัดชั้นโลหะอลูมิเนียม ด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Phosphoric Acid และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายทำการซินเตอร์ลิ่งที่อุณหภูมิ 450 °C ในเวลา 5 นาทีแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 (ง)-(จ)

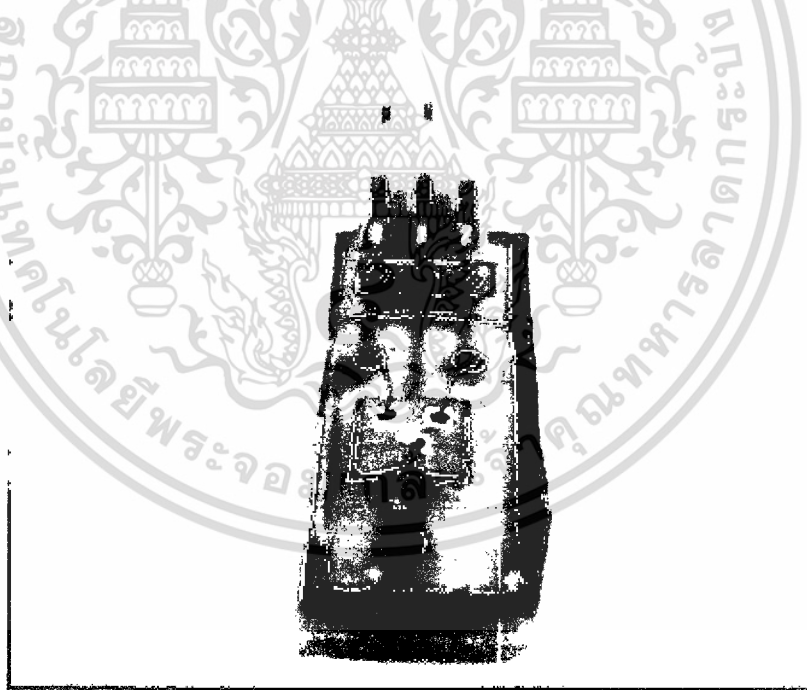
จากรูปที่ 4.16 แสดงแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่น ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 16 ตัว ขณะที่ในรูปที่ 4.17 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ขยายสักส่วน เพื่อแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ และรูปที่ 4.18 แสดงการเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งาน และการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) โดยการเคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซินเพื่อความสวยงามและป้องกันผลกระทบต่างๆ จากสิ่งแวดล้อม ก่อนการนำไปใช้งาน



รูปที่ 4.16 แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ทำการขยายสัดส่วน



รูปที่ 4.18 การเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งาน

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบอุปกรณ์ เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพและความไวของอุปกรณ์ดีที่สุดในโครงสร้างไดโอดคู่ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่การออกแบบอุปกรณ์ ผลการจำลองแบบ และขั้นตอนการนำอุปกรณ์ไปสร้างออกมาเป็นอุปกรณ์เพื่อนำไปใช้งานจริง ซึ่งจะใช้เทคโนโลยีที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

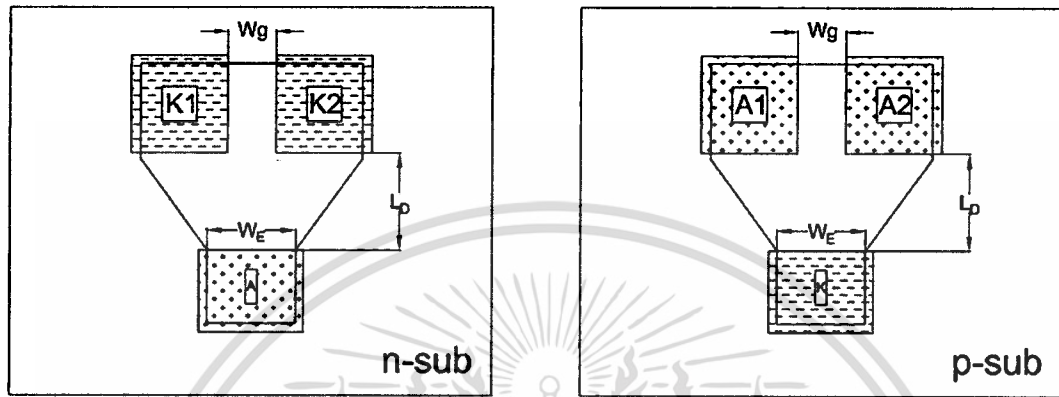
5.1 โครงสร้างอุปกรณ์และการออกแบบ

การตรวจจับสนามแม่เหล็กมีหลักการตรวจจับได้หลายแบบ หลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นหลักการที่ได้รับความนิยมสูง สามารถใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก(non-ferromagnetic) เช่น สารกึ่งตัวนำและโลหะ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะสร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเป็นวัสดุหลัก ดังนั้น หลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์จึงเหมาะสมและง่ายต่อการประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรรวมการทำงาน อุปกรณ์มีสองโหมดการทำงาน คือโหมดแรงดันและโหมดกระแส โดยในการศึกษาครั้งนี้เรามุ่งเน้นไปที่อุปกรณ์ในโหมดกระแสเป็นหลัก ซึ่งในโหมดการทำงานนี้มักประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่มีโครงสร้าง มอสเฟต ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ส่วนโหมดแรงดันมักประยุกต์ในรูปแบบฮอลล์เพลต หรือแผ่นวัสดุโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ

ในอุปกรณ์โหมดกระแสใช้แรงลอเรนซ์ (Lorentz's force) ทำให้กระแสหักเห เบี่ยงเบน ดังนั้นอุปกรณ์ในโหมดนี้ที่ขั้วเอาต์พุตจะต้องมีสองขั้วในการรับกระแสที่เบี่ยงเบนจากสนามแม่เหล็ก เกิดเป็นผลต่างของกระแส ΔI ที่ขั้วเอาต์พุตทั้งสอง ตัวอย่างโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ แมกเฟต จะต้องมีขาเอาต์พุตคอลเลคเตอร์สองขา หรือขาเดรนสองขา เพื่อรองรับความแตกต่างของกระแสเอาต์พุตที่เกิดขึ้น การออกแบบขั้วเอาต์พุตที่เดิมอุปกรณ์เหล่านี้เมื่อไม่ได้ใช้วัดสนามแม่เหล็กจะมีขั้วเดียวเท่านั้น แต่เมื่อประยุกต์มาใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมีสองขั้วทำให้เกิดช่องว่างระหว่างขั้วได้ และช่องว่างนี้เองจะทำให้ค่าประสิทธิภาพมีค่าลดลง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะทำการออกแบบให้ช่องว่างมีค่าน้อยที่สุด คือไม่ให้มีช่องว่างระหว่างขั้วเอาต์พุตเลย แต่จะมีคอนแทกแยกอยู่ในชั้นวัสดุที่เป็นขั้วเอาต์พุตแทน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้โครงสร้างไดโอดคู่หรือ dual magnetodiode โครงสร้างที่ภูวนาเสนอจากผู้วิจัยในหลายปีก่อน ซึ่งโครงสร้างแมกนีโตไดโอดชนิดนี้จะแตกต่างจากแมกนีโตไดโอดทั่วไปที่นำเสนอก่อนแล้ว ซึ่งทั้งโครงสร้างและหลักการทำงานแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีข้อดีคือโครงสร้างเหมือนไดโอดทั่วไป สร้างง่าย มีความหนาสูงสามารถสร้างด้วยเทคโนโลยีใดๆได้ จึงสามารถเข้าไปแทรกซึมในวงจรรวมประเภทต่างๆ ได้ โครงสร้างโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 เป็นโครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ประกอบด้วยไดโอดสองตัว โดยที่ขั้วหนึ่งจะแยกจากกันเป็นสองขั้ว แต่อีกขั้วหนึ่งจะร่วมกันเป็นขั้วเดียวกันเรียกโครงสร้างนี้ว่าแมกนีโตไดโอดแบบคู่



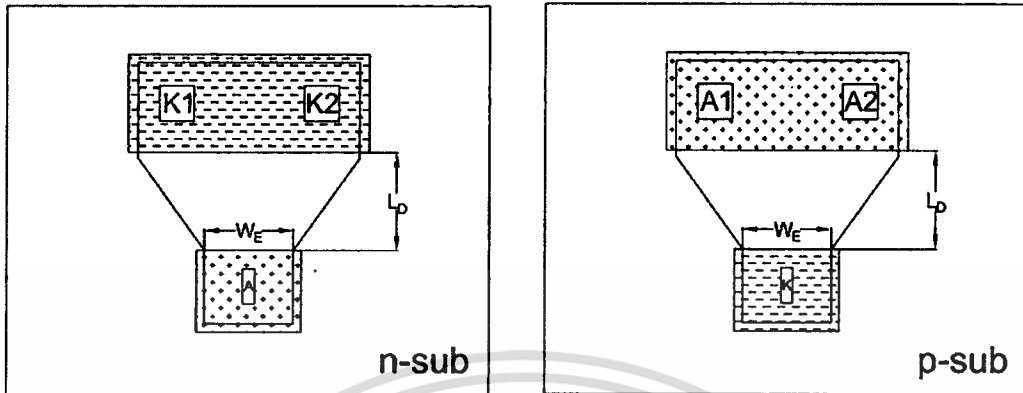
(ก) โครงสร้างแบบแยกคาโทด

(ข) โครงสร้างแบบแยกแอนโนด

รูปที่ 5.1 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่

จากรูปที่ 1(ก) เป็นโครงสร้างไดโอดคู่ที่สร้างบนฐานรองชนิดเอ็น (N-substrate) ขั้วแอนโนดเกิดจากการแพร่สารเจือชนิดพีลงบนแผ่นฐานรอง ขั้วคาโทดเกิดจากการแพร่สารเจือเพื่อสร้างขั้วโอห์มิก จากรูปโครงสร้างนี้จะใช้แอนโนดร่วมกันแต่จะแยกขั้วคาโทดเป็นสองขั้วจึงมีโครงสร้างไดโอดคู่แบบคาโทดแยก ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 5.1(ข) เป็นโครงสร้างไดโอดแบบคู่ที่สร้างบนแผ่นฐานรองชนิดพี (P-substrate) ขั้วแอนโนดเกิดจากการสร้างขั้วสัมผัสโอห์มิกกับฐานรอง และขั้วคาโทดเกิดจากการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นลงบนฐานรองชนิดพี จากโครงสร้างจะมีขั้วแอนโนดร่วมกันจึงเรียกว่า "ไดโอดคู่แบบแอนโนดแยก" ในการศึกษาครั้งนี้เราจะทำการศึกษทั้งสองโครงสร้างโดยออกแบบให้ขั้วที่แยกมีระยะห่าง W_g มีค่า $5 \mu m$, $2 \mu m$ และ $0 \mu m$ คือรวมเป็นชั้นเดียวกัน แต่ชั้นสารขั้วโอห์มิกจะมีคอนแทคช่องกระแสที่แยกกันเป็นสองช่องอย่างสมมาตรกันเพื่อรองรับกระแสที่เข้าหรือออกจากขั้ว

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างไดโอดคู่ที่แยกคอนแทคแต่ใช้ชั้นวัสดุขั้วโอห์มิกเดียวกัน พนรูปที่ 5.2(ก) เป็นโครงสร้างแบบคาโทดแยกที่ช่องว่างระหว่างขั้วคาโทดเป็นศูนย์แต่จะมีคอนแทคแยกจากกันไม่ได้นำมาวมกันเหมือนชั้นวัสดุโอห์มิก ส่วนรูปที่ 5.2(ข) เป็นโครงสร้างแบบแอนโนดแยกที่ช่องว่างระหว่างขั้วแอนโนดเป็นศูนย์ แต่ไม่รวมคอนแทคเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเรียกโครงสร้างที่ช่องว่างระหว่างขั้วเป็นศูนย์ว่า gapless หรือไร้ช่องว่าง ในการศึกษาครั้งนี้เราทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างไดโอดคู่ที่มีช่องว่างมาก น้อย และไร้ช่องว่าง เพื่อดูประสิทธิภาพของอุปกรณ์แมกนีโตไดโอด



(ก) แบบคาโทดแยก

(ข) แบบแอนโนดแยก

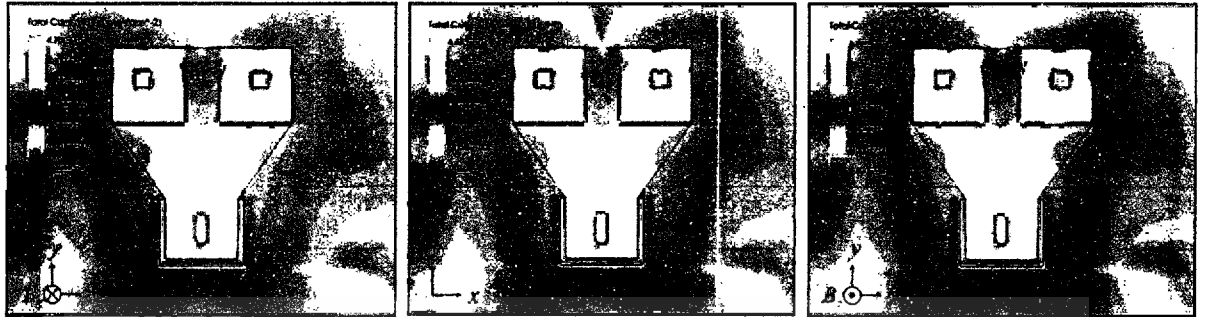
รูปที่ 5.2 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบไร้ช่องว่าง

โครงสร้างแบบคาโทดแยกในรูป 5.1(ก) เริ่มต้นจากแผ่นฐานรองชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้นสารเจือ 10^{15} cm^{-3} ส่วนแอนโนดถูกเติมอะตอมสารเจือแอกเซ็ปเตอร์ชนิดพีที่มีความเข้มข้น 10^{20} cm^{-3} ส่วนโครงสร้างแบบแยกกาโนดในรูปที่ 5.1(ข) เริ่มต้นจากแผ่นฐานชนิดพีที่มีความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} จากนั้นแพร่อะตอมสารเจือดอเนอร์เพื่อสร้างคาโทดชนิดเอ็นที่มีความเข้มข้น 10^{20} cm^{-3} ส่วนรอยต่อโอห์มมิกสร้างโดยเติมอะตอมสารเจือชนิดเดียวกับแผ่นฐานรองให้มีค่าความเข้มข้นสูง 10^{20} cm^{-3} จากนั้นเจาะช่องสร้างคอนแทคตรงกลางบริเวณโอห์มมิกเพื่อเป็นช่องให้กระแสไหลเข้าหรือออก ระยะห่างระหว่างขั้วสารโอห์มมิกทั้งสองคือ W_g ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและแอนโนดคือ L_d และความกว้างพื้นที่หน้าตัดสำหรับฉีดพาหะขั้วร่วมคือ W_E ซึ่งตัวแปรทั้งหมดแสดงไว้ในรูปที่ 5.1

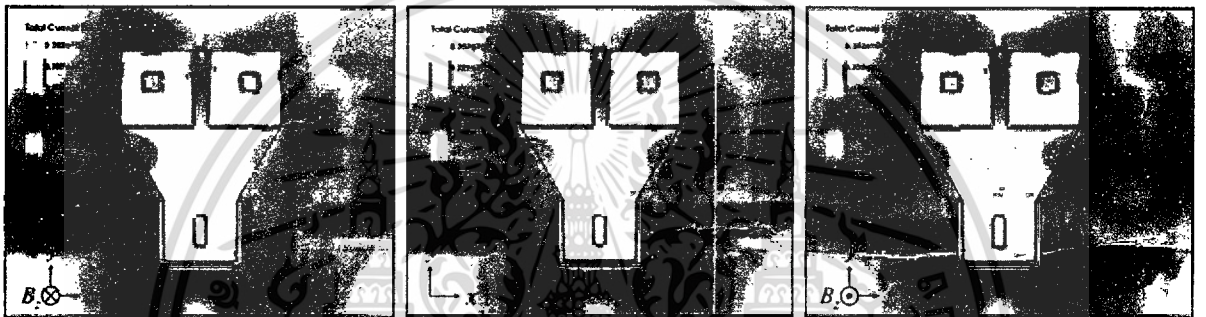
5.2 การทดลองและผลการจำลองแบบ

ในการศึกษาครั้งนี้ เราทำการศึกษาด้วยการจำลองแบบเพื่อตรวจสอบสนองของอุปกรณ์ก่อนที่จะนำไปสร้างโปรแกรมในการจำลองแบบใช้ TCAD Sentaurus ด้วยความร่วมมือจากศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ การใช้งานโปรแกรมการจำลองแบบและโมเดลได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

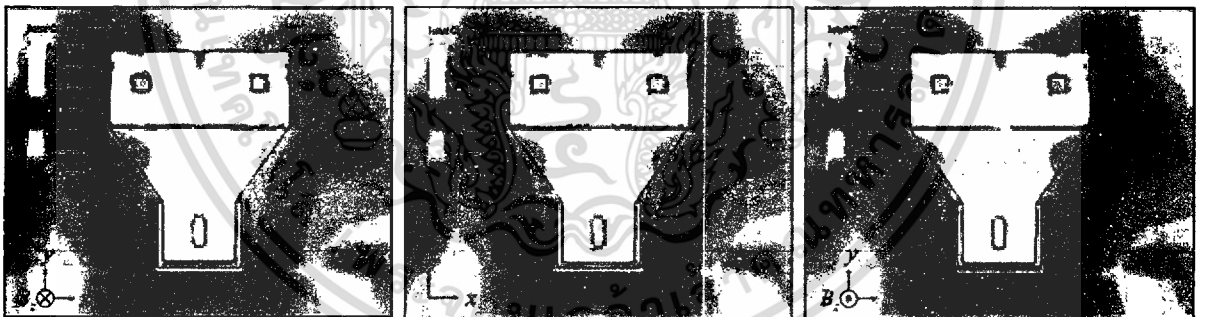
รูปที่ 5.3 แสดงผลการกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ชนิดคาโทดแยก มีค่า W_g เป็น 5, 2.5 และ 0 ไมโครเมตร ทำการให้ค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางตามแนวแกน $-z$ และ $+z$ ตั้งฉากกับอุปกรณ์ ค่ากระแสไบแอสทิศไปข้างหน้ามีค่า 1 mA จากผลในรูปที่ 5.3 สนามแม่เหล็กในทิศ $-z$ กระแสไดโอดจะเบนไปยังขั้วคาโทดด้านซ้ายมือ I_1 ส่วนสนามแม่เหล็กทิศ $+z$ กระแสไดโอดจะเบนไปยังขั้วคาโทดด้านขวามือ I_2 และในกรณีไม่ให้สนามแม่เหล็กกระแสไดโอดจากขั้วคาโทดทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน $I_1 = I_2$ รูปที่ 5.4 คือการพลอตค่าความแตกต่างของกระแสคาโทด ΔI โดยมีค่าคือ $I_1 - I_2$ ซึ่ง I_1 เป็นค่ากระแสคาโทดด้านซ้ายมือ และ I_2 เป็นกระแสคาโทดด้านขวามือ



(ก) $W_g = 5 \mu\text{m}$

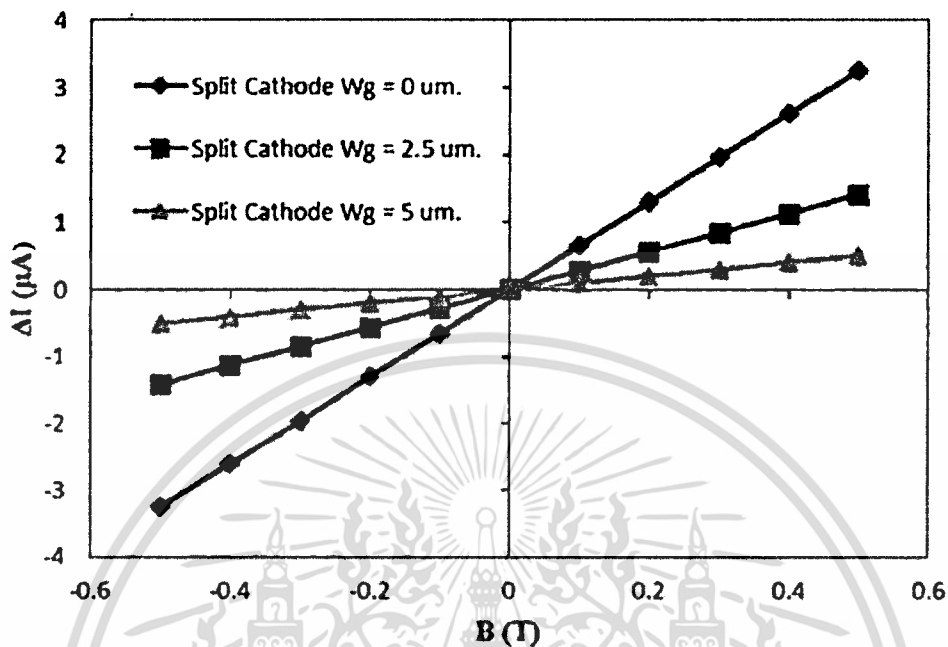


(ข) $W_g = 2.5 \mu\text{m}$



(ค) $W_g = 0 \mu\text{m}$

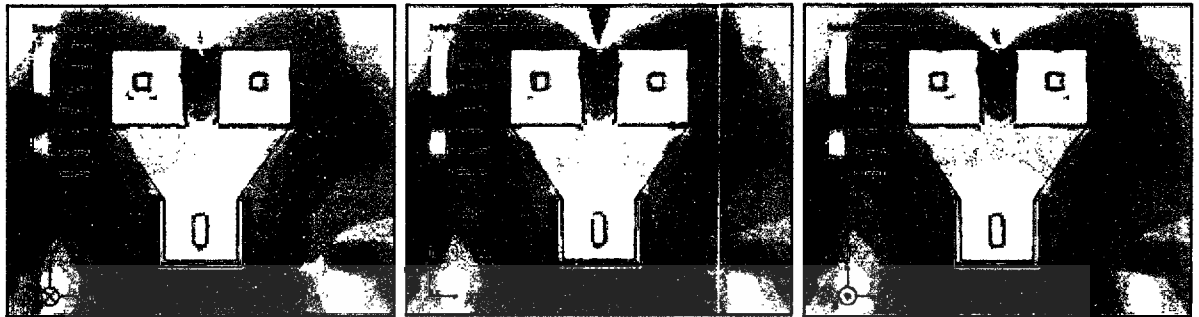
รูปที่ 5.3 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกนีโตไดโอดแบบคู่คาโทดแยก



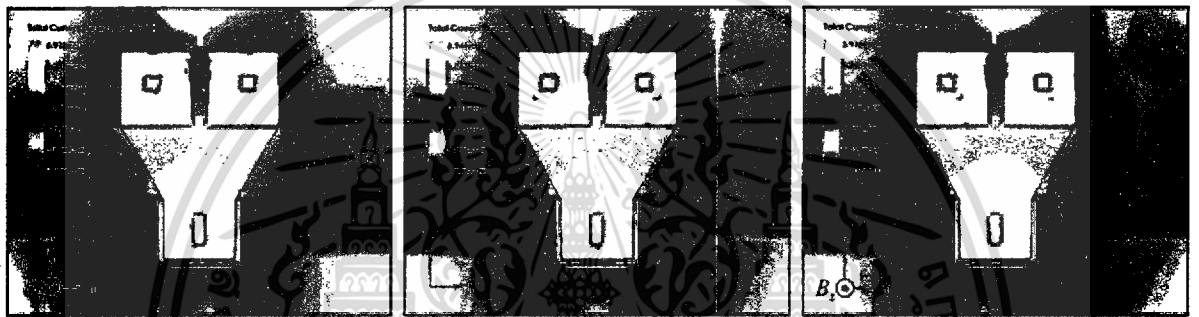
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔI กับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก B

ค่าความไวสัมพัทธ์ SR หาได้จากความชันของกราฟ $\Delta I - B$ ต่อหน่วยกระแส $SR = (\Delta I / \Delta B) / I_D$ จากเงื่อนไขการเบี่ยงเบนกระแสที่กล่าวมา ค่าความชันที่ได้มีค่าเป็นบวก และค่าความไวสัมพัทธ์ SR มีค่า 0.0010, 0.0028 และ 0.0065 T⁻¹ ที่ค่า $W_g = 5, 2.5$ และ 0 ไมโครเมตรตามลำดับ

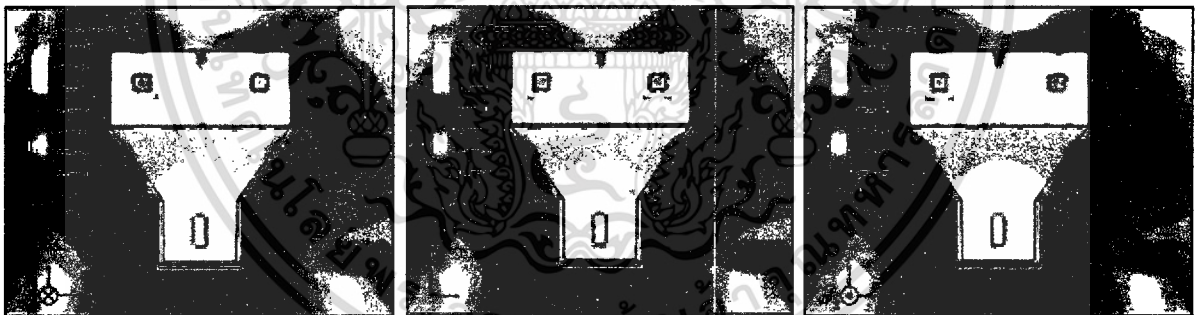
ในทำนองเดียวกันเราทำการจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีโตไดโอดโครงสร้างแบบฮอโนดแยกด้วยเงื่อนไขและตัวแปรอย่างเดียวกัน ในกรณีนี้กระแสจะไหลจากขั้วฮอโนดทั้งสองไปยังคาโทดร่วม ผลการกระจายความหนาแน่นกระแสเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กในทิศทาง $-z$ และ $+z$ แสดงได้ดังรูป 5.5 ผลค่าความแตกต่างกระแส ΔI คือผลต่างระหว่างขนาดกระแสฮอโนด $I_1 - I_2$ โดยที่ I_1 คือกระแสฮอโนดด้านซ้ายมือและ I_2 คือกระแสฮอโนดด้านขวามือ ผลของการพลอตกราฟระหว่างความแตกต่างกระแส ΔI กับความเข้มสนามแม่เหล็ก B แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 จากผลของกราฟ $\Delta I - B$ ค่าความชันของกราฟมีค่าเป็นบวกเช่นเดียวกัน นั้นแสดงว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง $-z$ ค่ากระแส I_2 จะมีค่ามากกว่า I_1 และเมื่อให้กระแสในทิศทาง $+z$ ค่ากระแส I_1 มีค่ามากกว่า I_2 ค่าความไวสัมพัทธ์ที่ได้ SR มีค่า 0.00084, 0.00020 และ 0.00051 T⁻¹ ที่ค่า $W_g = 5, 2.5$ และ 0 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งทั้งสองโครงสร้างจะให้ค่าความไวสูงสุดเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วแยกเป็นศูนย์ จากการทดลองที่ได้จากการจำลองแบบ เราสามารถอธิบายกลไกกระแสของแมกนีโตไดโอดได้ดังนี้



(ก) $W_g = 5 \mu\text{m}$

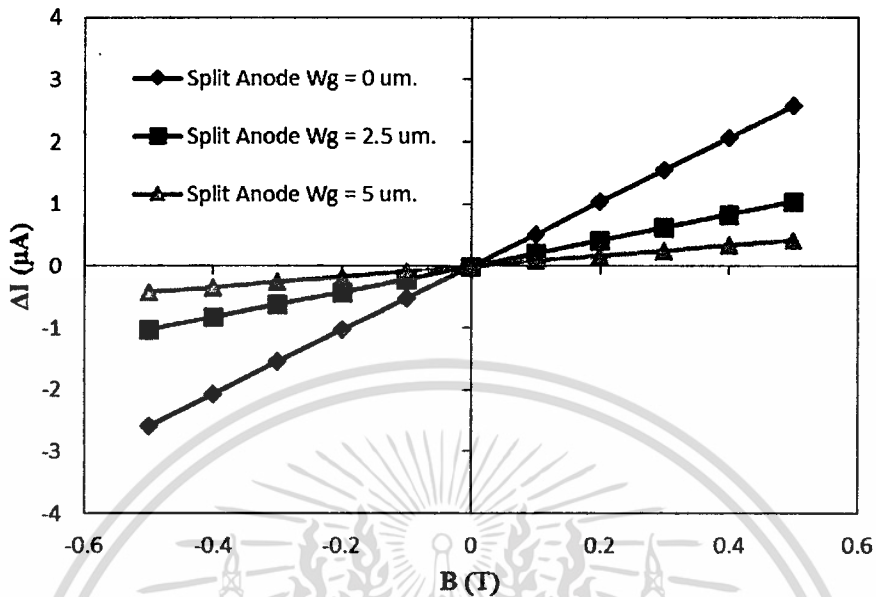


(ข) $W_g = 2.5 \mu\text{m}$



(ค) $W_g = 0 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.5 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกนีโตไดโอดคู่อาโนดแยก



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างกระแสคาโทดกับสนามแม่เหล็กของไดโอดแบบคาโทดแยก

5.3 กลไกการทำงาน

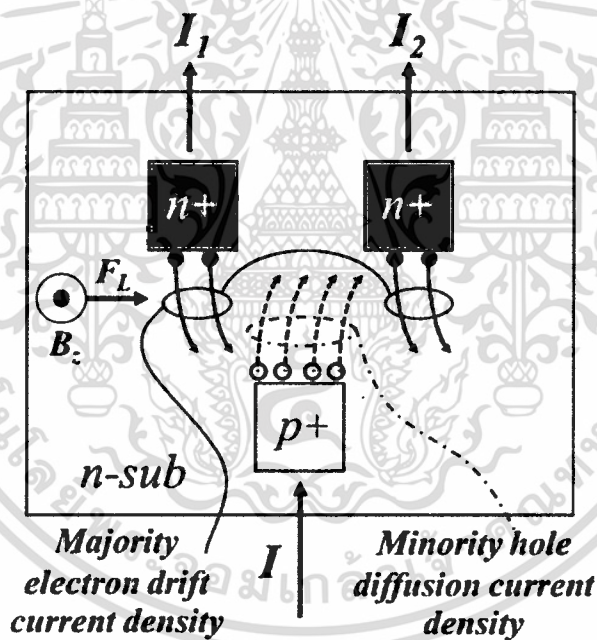
จากโครงสร้างแมกนีไทโดไดโอดที่ทำการศึกษาเป็นไดโอดวงมีขั้วอานโตร่วมกันและมีขั้วคาโทดแยกกัน หรือมีขั้วคาโทดร่วมกันและมีอานโตร่วมกัน การออกแบบลักษณะนี้ทำเพื่อที่จะนำมาใช้งานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแทนที่จะใช้งานเรกติไฟร์ กระแสของแมกนีไทโดไดโอดคือกระแสรอยต่อพีเอ็น ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$J = \left[\frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \right] \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT} - 1\right) \right] \quad (1)$$

ซึ่ง q คือค่าประจุอิเล็กตรอนิกส์, D_n และ D_p คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่พาหะส่วนน้อยอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ, L_n และ L_p คือระยะการแพร่ของพาหะส่วนน้อยอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ, p_{no} และ n_{po} คือโฮลและอิเล็กตรอนพาหะส่วนน้อยที่สมดุลความร้อน, k คือค่าคงที่โบลซมันน์, V_a คือค่าแรงดันที่ให้ที่รอยต่อ ค่าสมการกระแสในสมการ (1) คือการคำนวณปริมาณกระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยที่ขอบบริเวณปลอดพาหะ ในกรณีรอยต่อ p^+n หรือโครงสร้างคาโทดแยกบนฐานรองชนิดเอ็น ค่า $n_{po} \ll p_{no}$ และสามารถไม่นำมาคิด ค่ากระแสพาหะส่วนน้อย จะประมาณคือกระแสโฮลที่ฉีดข้ามรอยต่อและกลายเป็นพาหะส่วนน้อยและจะแพร่จากรอยต่อไปยังขั้วคาโทดที่แยก ค่ากระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยจะลดลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับระยะทางเนื่องจากการรวมตัวกับพาหะส่วนมากและจะหมดไปเมื่อระยะทางไกล

ออกไปสองสามเท่าของระยะการแพร่ L_p เพื่อชดเชยพาหะส่วนมากที่หายไปกับการรวมตัวพาหะส่วนน้อยที่ฉีดข้ามรอยต่อและที่ฉีดข้ามรอยต่อไปอีกฝั่งหนึ่ง ที่ขั้วของคาโทดจะเกิดกระแสรีฟพาหะส่วนมากอิเล็กตรอนไหลเข้า ดังนั้นกระแสไดโอดที่ขั้วจะมีทั้งกระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยและกระแสรีฟพาหะส่วนมาก

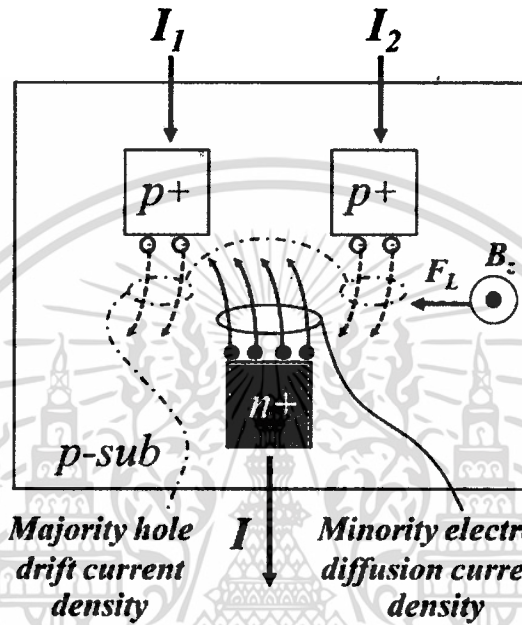
รูปที่ 5.7 แสดงแบบจำลองการเลี้ยวเบนกระแสขณะที่ได้รับสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ ของไดโอดแบบคาโทดแยก ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น กระแสไดโอดจะมีสององค์ประกอบ กระแสการแพร่โฮลจะแพร่จากบริเวณปลอดพาหะที่อาโนด $p+$ ไปยังคาโทด แรงลอเรนซ์จะถูกเหนี่ยวนำในทิศ $+x$ ทำให้พาหะโฮลเบี่ยงเบนไปทิศ $+x$ ซึ่งการเบี่ยงเบนกระแสโฮลในทิศทางนี้จะทำให้กระแสสมมุติ I_2 มากกว่า I_1 กระแสอิเล็กตรอนจะเข้าไปชดเชยที่ขั้วคาโทดวิ่งไปยังอาโนดจะถูกเบี่ยงเบนไปทิศ $+x$ เช่นเดียวกัน แต่จะให้ค่ากระแสสมมุติ I_1 มากกว่า I_2 ดังนั้นค่ากระแสรวมจึงเป็นการผลการหักล้างระหว่างกระแสโฮลและกระแสอิเล็กตรอนที่ขั้วคาโทด จากผลการจำลองแบบรูปที่ 5.4 ค่าความชันของกราฟมีค่าเป็นบวกแสดงว่าผลของกระแสรวมค่า I_1 มีค่ามากกว่าค่า I_2



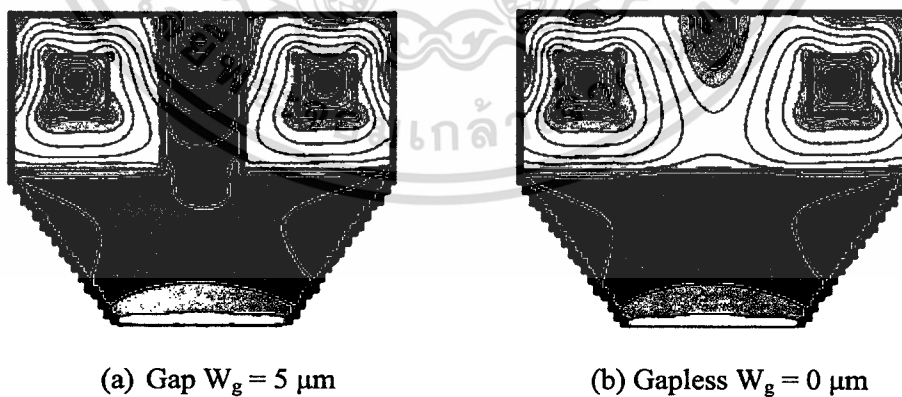
รูปที่ 5.7 การเลี้ยวเบนองค์ประกอบกระแสของไดโอดคู่คาโทดแยก

ในกรณีโครงสร้างอาโนดแยกเราสามารถอธิบายกลไกกระแสได้เช่นเดียวกัน รูปที่ 5.8 แสดงกลไกกระแสแบบอาโนดแยกขณะได้รับสนามแม่เหล็กในทิศ $+z$ กระแสไบอัสไปข้างหน้าจะวิ่งจากอาโนดไปยังคาโทดที่ร่วมกันอยู่ แรงลอเรนซ์ที่ถูกเหนี่ยวนำจะมีทิศทางไปยัง $-x$ พาหะส่วนมากโฮลจะฉีดข้ามรอยต่อและแพร่บนฐานรองไปยังคาโทดจะถูกแรงลอเรนซ์กระทำให้เบนไปทิศทาง $-x$ เช่นเดียวกับกับกระแสรีฟอิเล็กตรอนจากคาโทดที่เข้าไปชดเชยกระแสโฮลที่แพร่

และรวมตัวในฐานรองและขดเซมิอิเล็กตรอนที่ข้ามรอยต่อไปยังอานอด ซึ่งจะถูกแรงลอเรนซ์กระทำในทิศทาง $-x$ เช่นเดียวกัน กระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยโฮลที่ถูกแรงลอเรนซ์กระทำในทิศทาง $-x$ จะทำให้ค่ากระแส I_1 ทางด้านซ้ายของอานอดมีค่ามากกว่ากระแส I_2 ทางด้านขวาของอานอด มีผลทำให้ค่าความแตกต่างกระแสอานอด ΔI มีความชันเป็นบวกดังแสดงในรูป 5.6



รูปที่ 5.8 การเลี้ยวเบนขององค์ประกอบกระแสแบบอานอดแยก



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบการกระจายกระแสของโครงสร้างไดโอดคู่แบบคาโทดแยก

จากการทดลองเราพบว่าที่ค่าระยะห่างระหว่างคาโทดและแอโนด w_g ในโครงสร้างแบบคาโทดแยกและแอโนดแยกตามลำดับ ค่าความไวของอุปกรณ์จะสูงสุดเมื่อ W_g มีค่าเป็นศูนย์ หรือไม่มีช่องว่างระหว่างคาโทด หรือ แอโนดนั่นเอง แต่จะมีช่องคอนแทกแยกกันในชั้นคาโทดหรือแอโนดที่ติดกันเป็นชั้นเดียวกัน การออกแบบไม่มีช่องว่างนี้จะทำให้ได้ค่าความไวสูงสุด รูปที่ 5.10 แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสเปรียบเทียบระหว่างมีช่องว่างและไม่มีช่องว่างของโครงสร้างไดโอดแบบคาโทดแยก จากรูปจะเห็นว่า การออกแบบที่มีช่องว่างการเบี่ยงเบนกระแสจะไม่ต้องเนื่อง โดยเฉพาะที่ตรงบริเวณช่องว่างจะเกิดความหนาแน่นกระแสที่มีค่าต่างกันทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของกระแสที่ถูกรังแรงลอเรนซ์กระทำ แต่การออกแบบแบบไม่มีช่องว่างจะเห็นการกระจายกระแสที่เบี่ยงเบนจากแรงลอเรนซ์มีความต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน การออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่และอุปกรณ์ฮอลล์โหมดกระแส การออกแบบไร้ช่องว่างของซิวเอาร์ทพุทจะเป็นเงื่อนไขประสิทธิภาพสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ยังมีอยู่ซึ่งจะต้องทำการศึกษาตัวแปรเหล่านี้ต่อไป



บทที่ 6

บทสรุป

จากการศึกษาอุปกรณ์แมกนีโตไดโอด โดยแมกนีโตไดโอดที่นำเสนอในการศึกษาเป็นโครงสร้างที่แตกต่างจากแมกนีโตไดโอดแบบดั้งเดิมที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่นำเสนอมีโครงสร้างเป็นไดโอดรอยต่อพีเอ็นสองตัวที่ขนานกัน โดยขั้วทางด้านหนึ่งต่อร่วมกันอยู่ ส่วนอีกขั้วหนึ่งแยกกัน ซึ่งปกติแล้วโครงสร้างไดโอดทั่วไปจะเป็นอุปกรณ์สองขั้วคืออาโนดและคาโทด ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำเสนอจะเป็นอุปกรณ์สามขั้วคือ มีอาโนดร่วมและคาโทดแยก หรือมีคาโทดร่วมและอาโนดแยก อุปกรณ์ที่นำเสนอนี้มีชื่อเรียกว่า แมกนีโตไดโอดคู่ (Dual Magnetodiode)

การทำงานของอุปกรณ์อาศัยการไบอัสไปข้างหน้า (forward bias) โดยการฉีดพาหะส่วนมากจากขั้วร่วมคือฉีดโฮลจากอาโนดไปยังคาโทดแยก หรือฉีดอิเล็กตรอนจากคาโทดร่วมไปยังอาโนดแยก ทำให้เกิดกระแสการแพร่พาหะส่วนน้อย (Minority diffusion current) ระหว่างที่พาหะฉีดข้ามรอยต่อมายังขั้วแยกคือชั้นฐานรอง (substrate) พาหะกลายเป็นพาหะส่วนน้อยจะแพร่ต่อไปยังขั้วแยกและจะรวมตัวกับพาหะส่วนมากในฐานรอง กระแสการแพร่นี้ก็จะถูกแรงลอเรนซ์ (Lorentz's force) กระทำให้เกิดการเบี่ยงเบนตลอดที่แพร่ในแผ่นฐานรองทำให้เกิดค่าความแตกต่างของกระแสที่ขั้วแยก เมื่อระยะทางจากรอยต่อมากขึ้น พาหะส่วนน้อยที่ฉีดข้ามรอยต่อมาก็จะมีค่าลดลงตามระยะทางและทำให้กระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยมีค่าลดลงตามไปด้วย ถ้าความยาวระหว่างขั้วอาโนดและคาโทดมีค่ายาวเมื่อเทียบกับระยะการแพร่ (diffusion length) กระแสการแพร่พาหะส่วนน้อยจะมีค่าน้อยลงจนเป็นศูนย์ ถ้าระยะนี้สั้นเมื่อเทียบกับระยะการแพร่พาหะ กระแสการแพร่นี้ก็ถูกรวมตัวในระยะสั้นทำให้ค่ากระแสที่ขั้วแยกมีค่ากระแสการแพร่มากกว่าระยะทางยาว แต่อย่างไรก็ตามจะมีกระแสการดริฟท์ (drift current) พาหะส่วนมากจากขั้วทั้งสองเข้ามาชดเชยพาหะส่วนมากที่หายไปกับการรวมตัวพาหะส่วนน้อยดังกล่าวและชดเชยพาหะส่วนมากที่ฉีดข้ามรอยต่อไปยังขั้วที่ร่วมกัน กระแสนี้จะมากเมื่อไดโอดยาวและมีค่าน้อยมีค่ากระแสนี้น้อย กระแสดริฟท์พาหะส่วนมากจะถูกแรงลอเรนซ์กระทำในทิศทางเดียวกับพาหะส่วนน้อยเพียงแต่พาหะจะเป็นคนละชนิดกัน

การออกแบบอุปกรณ์แบบโหมดกระแสของปรากฏการณ์ฮอลล์ที่ใช้แรงลอเรนซ์เบี่ยงเบนกระแส จะออกแบบขั้วเออร์พุทแยกเป็นสองขั้วเพื่อที่จะรองรับความแตกต่างของกระแสเออร์พุท ΔI ที่แปรค่าตามความเข้มสนามแม่เหล็กและทิศทางสนามแม่เหล็ก การออกแบบสองขั้วแยกจะกระทำโดยการมีบริเวณขึ้นสารโอห์มิกแยกกันสองขึ้นสารและภายในขึ้นสารโอห์มิกจะมีช่องคอนแทคตรงกลางเป็นช่องให้กระแสเข้าหรือออก การออกแบบลักษณะดังกล่าวใช้โดยทั่วไปกับอุปกรณ์เซนเซอร์แบบอื่นๆในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ซึ่งจะทำให้เกิดความสูญเสียบริเวณช่องว่างระหว่างขึ้นสารโอห์มิก เนื่องจากทำให้การเลี้ยวเบนกระแสไม่ต่อเนื่อง ยิ่งช่องว่างกระแสกว้างก็ทำให้ความสูญเสียมากตามไปด้วย ดังนั้นการออกแบบจะพยายามให้ช่องว่างเล็กที่สุดเท่าที่เทคโนโลยีจะทำได้ จากการศึกษาการออกแบบไร้ช่องว่าง (gapless) ระหว่างขึ้นสารโอห์มิกจะทำให้การเบี่ยงเบนกระแสต่อเนื่องลดการสูญเสียในส่วนนี้ ไม่ว่าจะ เป็นโครงสร้าง

แมกนีโตไดโอดคู่แบบคาโทดหรือแอนโนดแยก การออกแบบแบบไร้ช่องว่างจะได้ค่าความไวสูงสุด หรือประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบนี้ไร้ข้อจำกัดทางเทคโนโลยี สามารถสร้างได้ทุกเทคโนโลยี การออกแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์กับ อุปกรณ์อื่นๆ ได้เช่นกัน สำหรับอุปกรณ์อยู่ในระหว่างดำเนินการนำไปสร้างโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Phetchakul and S. Junkamkaw, "Dual magnetodiode," Proceedings of the 2009 12th International Symposium on Integrated Circuits, 2009, pp. 502-504.
- [2] Steafeev, "Modulation of Diffusion Length as a new principle of operation of semiconductor devices", Sov.Phys.-Solid State 1, 763, 1959.
- [3] Karakushan and Stafeev, "Magnetodiode", Sov. Phys.-Solid State 3, 493, 1961.
- [2] R. S. Popovic, H. P. Baltes, and F. Rudolf, "An integrated silicon magnetic field sensor using the Magnetodiode principle," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 31, pp. 286-291, 1984.
- [3] Chalin Sutthinet, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai and Toempong Phetchakul, "The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode" 7th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM), Kitakyushu, Japan, 10-12 September, 2018.
- [4] A. Mohaghaegh, S. Crjistoloveanu, and J. De Poncharra, "Double-injection phenomena under magnetic field in SOS films: A new generation of magnetosensitive microdevices," IEEE Trans. Electron Devices., vol. ED-28. p. 237,1981.
- [5] O.S. Lutes, P.S. Nussbaum, and O.S. Aadland, "Sensitivity limit in SOS magnetodiodes," IEEE Trans, Electron Devices, vol. Ed-27, p.68, 1979.
- [6] H. Pfeleiderer, "Magnetodiode model," Solid-State Electron., vol.15 p. 335, 1972.
- [5] E. H. Putley, The Hall effect and semi-conductor physics, 1968.
- [6] E. Ramsden, Hall-effect sensors: theory and application: Elsevier, 2011.
- [7] R. S. Popovic, Hall effect devices: magnetic sensors and characterization of semiconductors: CRC Press, 2004.
- [8] Lenz and A. Edelstein , Magnetic Sensors and Their Application, IEEE Sensors Journal, vol. 6 No.3, 2006, pp.631-649.
- [9] Sentaurus Process User Guide. Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [10] Sentaurus Structure Editor User Guide. Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [11] Sentaurus Device User Guide. Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [12] Henry p. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trans. Electron Device, vol.74, pp.315-317, no8, 1986.



ภาคผนวก ก
บทความที่ตีพิมพ์

7th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM),
Kitakyushu, Japan, 10-12 September, 2018.

International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications,
(accepted for publishing) 2018.

The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode

Chalin Sutthinet, Sawatdipong Poonsawat and Toempong Phetchakul

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

Email: {57601042, 58601172, toempong.ph}@kmitl.ac.th

Amporn Poyai

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

Email: amporn.poyai@nectec.or.th

Abstract—This paper presents the design for high sensitivity of magnetic detector device in current mode that uses Lorentz's force deflects current depend on the magnetic density via the dual magnetodiode structure. The current mode devices have two symmetry regions for carrier current receiving that injected from another opposite region. This design has a gap between two carrier current receiving regions that causes some loss and reduce sensitivity. The proposed design has one carrier current receiving region or gapless design that has no loss from gap. The sensitivities of gap 5, 2.5 and 0 μm at 1 mA are 0.0010, 0.0028 and 0.0065 T^{-1} for split cathode structure and 0.00084, 0.0020 and 0.0051 T^{-1} for split anode structure, respectively. This design can be applied to all current mode magnetic device for high sensitivity.

Index Terms—Magnetic sensor, Magnetodiode, current mode, Lorentz's force, pn junction, TCAD.

1. INTRODUCTION

The magnetic sensors are the devices for detect magnetic field. There are various types and mechanisms [1], [2], [3], [4]. The Hall effect based devices are a group that detect magnetic field by this effect by ferromagnetic and non-ferromagnetic material (metal and semiconductor) [5]. There are two modes of operation that are voltage mode and current mode. The voltage mode use Hall voltage that is induced from magnetic field cross with current for balancing force between electric force qE_H and Lorentz's force $F_L = qv \times B$ where q is electric charge, E_H is Hall electric field, v is drift velocity of carrier and B is magnetic field density. The current mode use the Lorentz's force F_L that greater than electrical force from Hall voltage deflect current or carrier. The structure of this mode device must have two separate regions for receiving the differential current which drain from another region. The output of current mode device is differential current ΔI of the two regions. Magnetotransistors are the transistor that detects the magnetic field [6]. They are both in voltage and current mode of Hall effect. In current mode device, the collector must design in split collectors for receiving injected current passed base from emitter. The output is the differential collector current ΔI_c , which will have some value depend on the magnetic field density and direction.

The MAGFET (Magnetic Field Effect Transistor) [7] is one of the current mode Hall effect magnetic field detectors.

The structure is split drain for receiving current from source. The output is the differential drain current ΔI_D . This device shows output $\Delta I_D = 0$ when no applied magnetic field. When magnetic field is applied, $\Delta I_D \neq 0$ depend on the density and direction.

Dual magnetodiode is the diode that detect magnetic field [8]. The structure has one anode and two separate cathodes. The current injected from anode to cathodes. The output is the differential current of cathodes ΔI_K . When the magnetic field is applied, the output $\Delta I_K \neq 0$ and when no magnetic field is applied $\Delta I_K = 0$.

From the example that mention above, they use the Lorentz's force deflect current from source of current to receiving regions, collectors, drains and cathodes. The structure of each device is designed for split regions that should have a gap between them. Even though, they are designed in very small scale technology as possible but the gap still exist in these structures. This design is used for very long time since the first device was created [9]. This paper will present the smarter design for higher sensitivity of these devices. The proposed design has no gap or gapless and independent of fabrication technology scaling.

II. DEVICE STRUCTURES AND TCAD

The structures of dual magnetodiode studied here are shown in Fig. 1. The name dual diode [8] is from its structure that looks like two couple diodes that have one common anode and split cathode as shown in Fig. 1(a) or one common cathode and split anode as shown in Fig. 1(b).

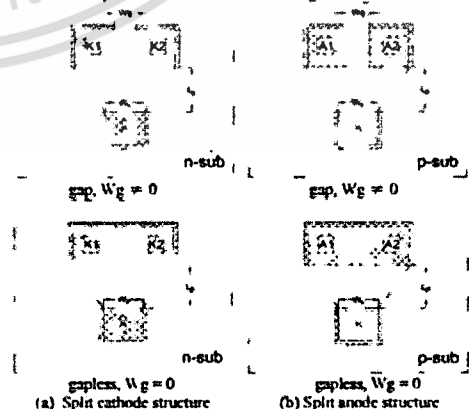


Fig. 1 The structures of dual magnetodiode.

Manuscript received August 10, 2018

Copyright credit, project number, corresponding author, etc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The reason why it has to split cathode or anode is for magnetic field detection in current mode. The split cathodes one is start from n-type substrate, 10^{15} cm^{-3} , and diffuse acceptor atoms for p⁺ anode, 10^{20} cm^{-3} , on substrate and split anode one is start from p-type substrate, 10^{15} cm^{-3} and diffuse donor atoms for n⁺ cathode, $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, on substrate. The ohmic contacts of substrate are formed by diffusion the same dopant atom as substrate in very high concentration. Each anodes and cathodes has a contact in the middle of region. The gap W_g is the distance between split regions, the distance between anode and cathode is 1_D and the width of injection carrier cross section area of diode is W_1 which all of them are shown in Fig. 1. In this study, the W_1 is fixed constant at 8 μm , 1_D is fixed at 10 μm but the gap W_g are varied in three values of 5, 2.5 and 0 μm . In the case of $W_g = 0 \mu\text{m}$ is called gapless design which are also shown in Fig. 1.

TCAD sentaurus [10], [11], [12] is one of standard commercial programs for device and process simulation in micro/nano electronic industries.

It has magnetic models for magnetic response of device. The current density with magnetic field dependence model for this study is explain as

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

where a is n or p type of semiconductor material, \vec{J}_a is carrier current density, \vec{g}_a is current vector without mobility, μ_a is drift mobility, μ_a^i is the Hall mobility, \vec{B} is the magnetic induction vector and B is the magnitude of vector. This magnetic model with the conventional model of semiconductor material is used for dual magnetodiode in this work for studying the device design and mechanism for high sensitivity [13], [14].

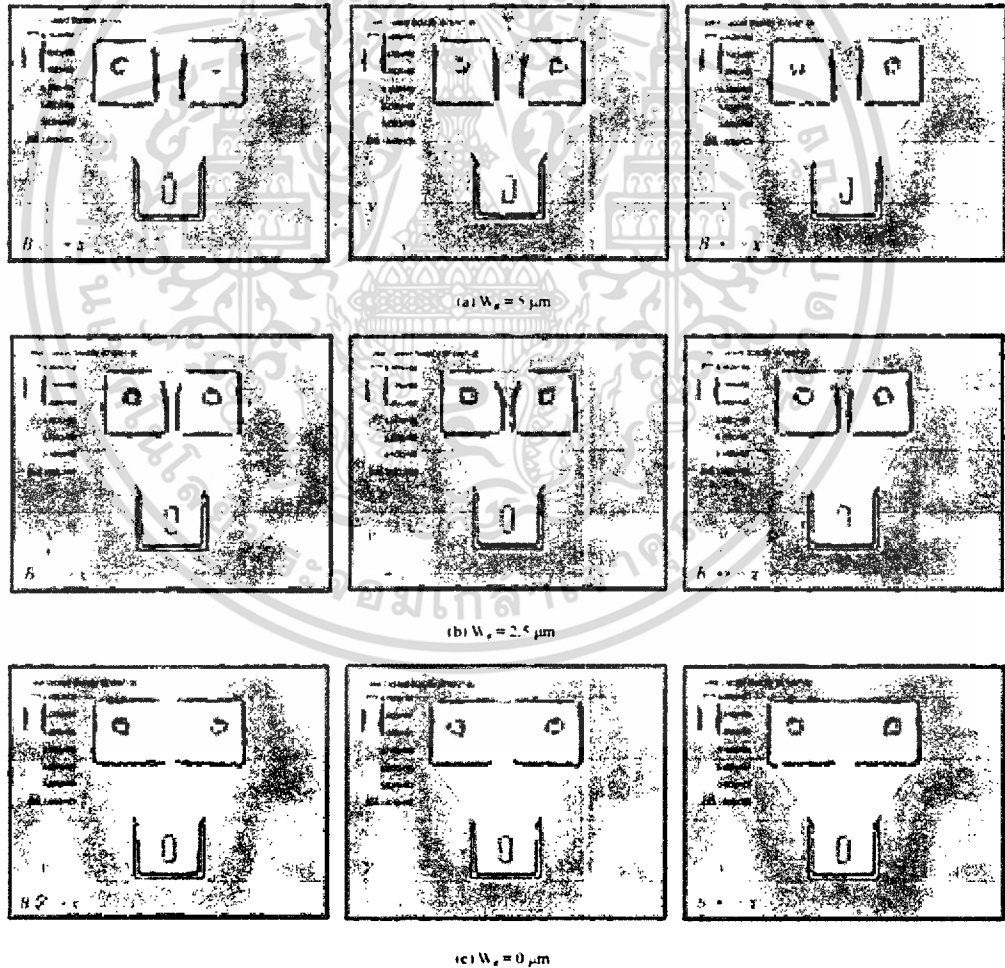


Fig. 2 Current density distribution of split cathode Dual Magnetodiode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III. EXPERIMENT AND RESULTS

The magnetodiode split cathode and split anode structures as shown in Fig. 1 are studied by TCAD simulation [15], [16]. These diodes are biased in forward direction by constant current source for keeping amount of carriers in order to avoid carrier modulation from magnetic field. The current density distribution are extracted out and shown as results. Then the magnetic field is applied in $-z$ and $+z$ direction and they show the variation of current density distribution with magnetic field. Dual magnetodiode is the current mode device that the output is differential diode current ΔI_D (differential cathode current for split cathode diode or differential anode current for split anode diode) which varied with magnetic field in amplitude and direction. Figure 2 shows current density distribution of split cathode dual magnetodiode with and without magnetic field. The results of cathode gap $W_g = 5, 2.5$ and $0 \mu\text{m}$ are shown in Fig. 2 (a), (b), (c), respectively. The magnetic field in $-z$ direction is applied, the diode currents tilt to the left cathode.

On the other hand, when the magnetic field in $+z$ direction is applied; the diode currents tilt to the right. The cathodes current are equal when no applied magnetic field. Figure 4 (a) is the plot of ΔI_D versus magnetic field B of split cathode diode. ΔI_D is $I_1 - I_2$ where I_1 is left cathode current and I_2 is right cathode current so the slope of graphs are positive. The relative sensitivities $S_R = \frac{1}{I_D} \cdot \frac{\Delta I_D}{\Delta B}$ at 1 mA of gaps 5, 2.5 and $0 \mu\text{m}$ are 0.0010, 0.0028 and 0.0065 T^{-1} , respectively.

Figure 3 is the current density distribution of split anode diode structure. The same condition of forward biased, magnetic field and gaps parameters are applied. The conventional currents flow from split anodes to cathode. The plot of ΔI_D versus magnetic field B of split anode is shown in Fig. 4(b). In this case ΔI_D is $I_1 - I_2$ where I_1 is left anode current and I_2 is right anode current. The positive slopes means that when magnetic field $+z$ direction is applied, the anode current I_1 is greater than I_2 and when magnetic field $-z$ is applied, the anode current I_2 is greater than I_1 . The relative sensitivities $S_R = \frac{1}{I_D} \cdot \frac{\Delta I_D}{\Delta B}$ at 1 mA of gaps 5, 2.5 and $0 \mu\text{m}$ are 0.00084, 0.0020 and 0.0051 T^{-1} , respectively.

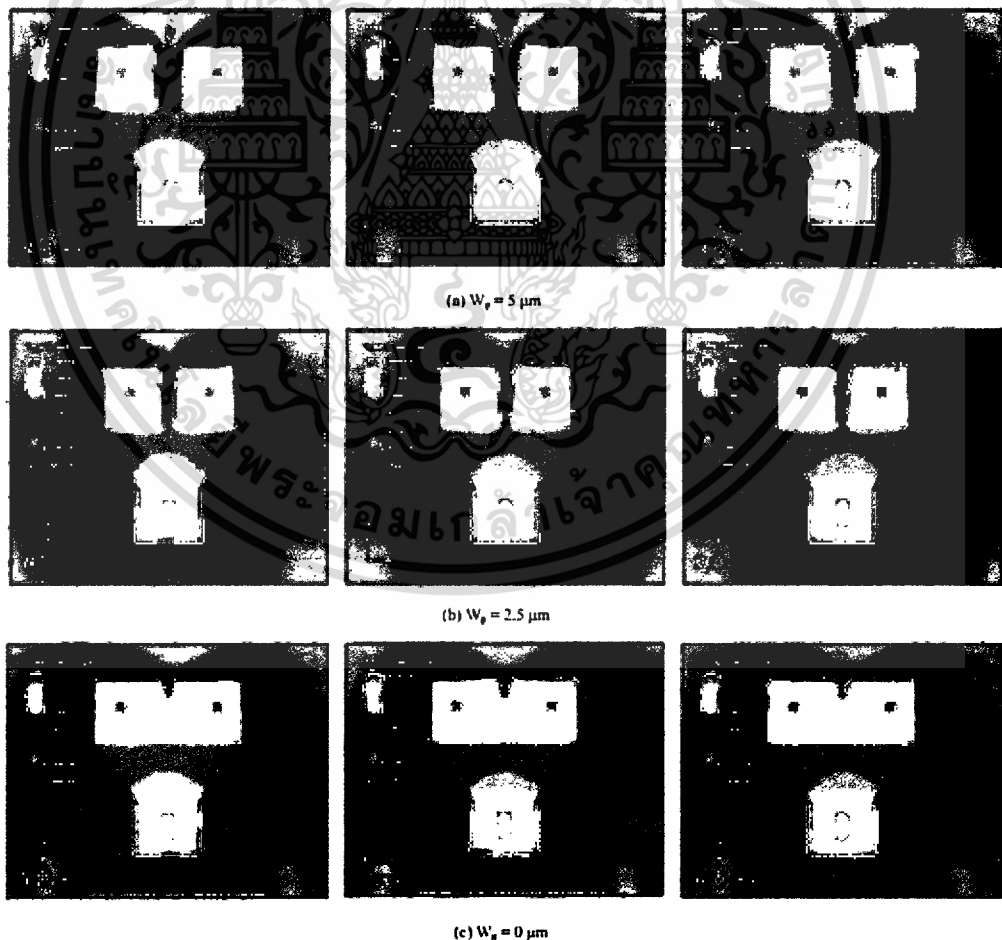
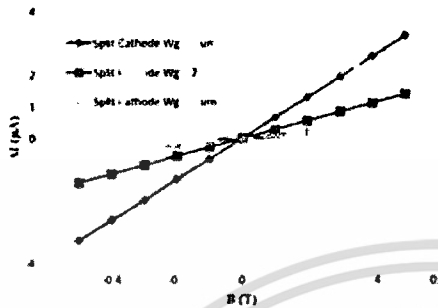
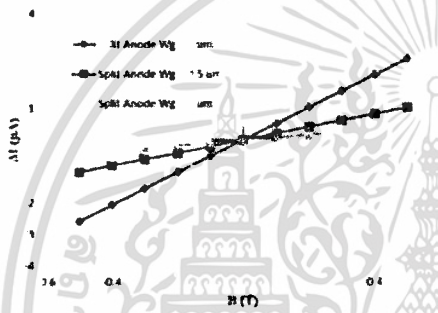


Fig. 3 Current density distribution of split anode Dual Magnetodiode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Dual Magnetodiode split cathode



(b) Dual Magnetodiode split anode

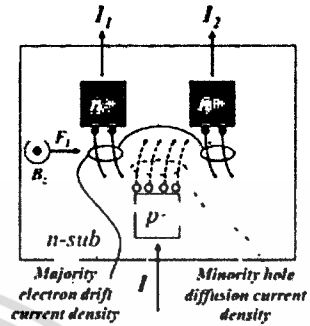
Fig. 4 The magnetic field response of Dual Magnetodiode.

IV. DISCUSSION

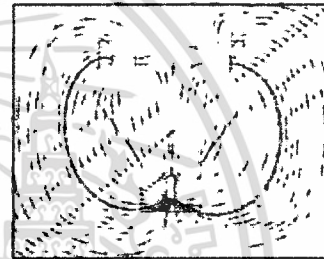
Dual magnetodiode structure studied here is the normal diode that has one common anode and split cathode or common cathode and split anode. This special design is used for magnetic detection field rather than use as rectify. The current of dual magnetodiode is the same as p-n junction diode that can be written as

$$J = \left[\frac{qD_p p_{p0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{n0}}{L_n} \right] \exp\left(\frac{qV_a}{kT} - 1\right) \quad (2)$$

where q is electronic charge, D_n and D_p are minority carrier electron and minority carrier hole diffusion coefficient. L_n and L_p are minority carrier electron and hole diffusion length, p_{p0} and n_{n0} are thermal equilibrium minority carrier electron and minority carrier hole concentration, k is Boltzmann's constant, T is temperature and V_a applied voltage across junction. Equation 2 shows the amount of total current that calculate from the minority carrier diffusion current densities at the edge of space charge region. In the case of p-n or split cathode n-substrate, the term $n_{p0} \ll p_{p0}$ and can be neglected. The minority diffusion current is approximately hole injected across junction and become minority carrier which then diffuse from junction to split cathode terminals and recombine with majority carrier. The minority carrier diffusion current decay exponentially with distance for several time of minority diffusion length L_p before completely recombine. In order to supply the majority electrons that are lost by recombination with the injected excess minority carrier hole and supply electrons that are being injected across the junction into p region, the electron drift into

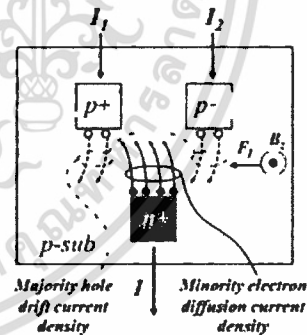


(a) Model of hole minority and electron majority carrier current density deflection

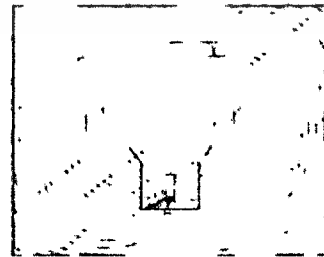


(b) Conventional total current density deflection vector

Fig. 5 Current deflection of split cathode when applied magnetic field in +z direction.



(a) Model of electron minority and hole majority carrier current density deflection



(b) Conventional total current density deflection vector

Fig. 6 Current deflection of split anode when applied magnetic field in +z direction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

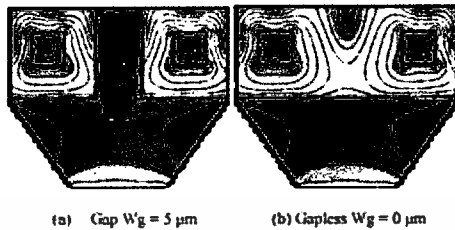


Fig. 7 Comparison of total current density distribution of split cathode.

cathode create the majority electron drift current. The same discussion applies to the drift of holes majority carrier in p region in the case of pn⁺ or split anode p-substrate [17], [18].

Figure 5 shows current deflection in split cathode dual magnetodiode when magnetic field is applied in +z direction. As mention before, there are two carrier current components. The holes are injected from p⁺ anode across junction to cathode and diffuse in n-substrate to cathodes. The Lorentz's force is induced in x direction causes the minority hole diffusion current density J_h tilts in the right cathode. The hole minority diffusion current density J_h of right cathode is greater than the left one. The electrons drift into cathode to supply the electron recombine with excess holes create majority electron drift current density J_e from cathode to junction. The electron current density J_e tilts in x direction because of Lorentz's force. The majority electron current density J_e of left cathode is greater than the right cathode. They are shown in Fig. 5(a). Figure 5(b) is the conventional total current density vector of carrier currents in Fig.5 (a) by TCAD simulation. The total currents are the sum of electron and hole currents. As the results $\Delta I = I_1 - I_2$ shown in Fig.4, I_1 is greater than I_2 in this case.

Figure 6 shows current deflection of split anode when applied magnetic field in +z direction. In similarly, the model of carrier deflection and conventional total current density deflection vector are shown in Fig. 6 (a) and (b), respectively.

Figure 7 shows the total current density distribution selected from Fig.2. They are split cathode diodes with gap $W_g = 5 \mu\text{m}$ and gapless $W_g = 0 \mu\text{m}$ with the magnetic field +z direction. The deflection current density with gap in Fig.7 (a) is not smooth and continuous. It is observed that there is low current density area in gap. The high current density deflection does not tilt continuous between cathodes. There is some loss of output differential current. The gapless in Fig. 7 (b) shows the smooth and continuous current density during deflection. There is no low current density area inserted in high current density area. The current density tilts smoothly and continuously. There is no loss and approach to the ideal. In split anode and magnetic field in -z direction, it can be explained similarly

V SUMMARY

Dual magnetodiode is a current mode device that can detect magnetic field. The dual magnetodiodes for this study are split cathode and split anode structure. Its current composed of two current components. One is minority diffusion current from injected holes from p⁺ anode for split cathode and from injected electron from n⁺ cathode

for split anode across the junction, respectively. Another is majority electron drift current in cathode n-substrate for split cathode or majority hole drift current in anode p-substrate for split cathode. The induced Lorentz's force acts upon both currents. The current mode device use Hall effect in current mode for current deflection. These devices have to be designed with split current receiving region to support current deflection from magnetic field. It must have a gap between split regions and has some loss in differential current ΔI . The gapless design is proposed here for high sensitivity. It is not necessary to split receiving carrier current region anymore because the current deflection effect will be continue within this region until reach to the inner contacts. From this study, the sensitivity of gapless design is highest both in two structure. The relative sensitivity of gap 5, 2.5 μm and gapless are 0.0010, 0.0028 and 0.0065 T⁻¹ for split cathode 0.00084, 0.0020 and 0.0051 T⁻¹ for split anode, respectively. The gapless design is the ideal for the high sensitivity current mode device.

ACKNOWLEDGMENT

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

REFERENCES

- [1] R. S. Popovic, H. P. Baltes, and F. Rudolf, "An integrated silicon magnetic field sensor using the Magnetodiode principle," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 31, pp. 286-291, 1984.
- [2] E. H. Putley, *The Hall effect and semi-conductor physics*, 1968.
- [3] L. Ramsden, *Hall-effect sensors: theory and application*: Elsevier, 2011.
- [4] R. S. Popovic, *Hall effect devices: magnetic sensors and characterization of semiconductors*: CRC Press, 2004.
- [5] P. Grunberg, "Magnetic field sensor with ferromagnetic thin layers having magnetically antiparallel polarized components," ed: Google Patents, 1990.
- [6] P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, et al., "The low power magnetotransistor based on the CMOS technology," in *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2010, pp. 764-767.
- [7] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk, "Compact model of dual-dram MAGFETs simulation," *Int. J. Electron. Commun. Comput. Eng.*, vol. 1, pp. 112-116, 2009.
- [8] T. Phetchakul and S. Juntakmak, "Dual magnetodiode," in *Proceedings of the 2009 12th International Symposium on Integrated Circuits*, 2009, pp. 502-504.
- [9] L. Davies and M. Wells, "Magneto-transistor incorporated in a bipolar IC," in *Proc. ICMCST, Sydney, Australia, 1970*, pp. 34-35.
- [10] *Sentaurus Process User Guide*. Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [11] *Sentaurus Structure Editor User Guide*. Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [12] *Sentaurus Device User Guide*. Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [13] M. Creacentini, M. Biondi, A. Romani, M. Tartagni, and E. Sangrogi, "Optimum design rules for CMOS Hall sensors," *Sensors*, vol. 17, p. 765, 2017.
- [14] A. Nathan, A. M. J. Huizer, and H. P. Baltes, "Two-dimensional numerical modeling of magnetic-field sensors in CMOS technology," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 32, pp. 1212-1219, 1985.
- [15] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsakuri, et al., "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor," *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 1269-1272, 2011/01/2011.
- [16] C. Roccoberne, G. Wachutka, J. Burgler, and H. Baltes, "Operating principle of dual collector magnetotransistors studied by two-dimensional simulation," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 41, pp. 1136-1148, 1994.

- [17] J.-P. Colinge and C. A. Colinge, *Physics of semiconductor devices*: Springer Science & Business Media, 2005.
 [18] K. Hess, "Advanced theory of semiconductor devices," 2000.



Chaitin Sathimeet received the B.S. degree in Electronic engineering from Southeast Asia University, Bangkok, Thailand in 1995, the M.S. degree in Microelectronics Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 2013

His research interest areas are automation control engineering, Computer programming, semiconductor devices and sensors.



Amporn Poyai received the B.Sc. degree in physics from Silpakorn University, Bangkok, Thailand in 1991, the M.S. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 1994, and the Ph.D. degree in electrical engineering from Katholieke University of Leuven, Leuven, Belgium in 2002.

His research is emphasized on design, simulation, fabrication and characterization of semiconductor device, microfabrication technology and integrated circuit. He is currently working at Thai Microelectronic Center (TMEC) as part of the National Electronic and Computer Technology Center (NECTEC), Thailand.

currently working at Thai Microelectronic Center (TMEC) as part of the National Electronic and Computer Technology Center (NECTEC), Thailand.



Sawatdipong Poonsawat received the B.Sc. degree the Applied Physics, in 2014, the M.S. degree in Microelectronics Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 2018.

His research is in the area of design and simulation in semiconductor devices and sensors.



Toempong Phetchakul received the B.S. degree in electronic engineering, the M.S. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand and the D.Eng degree in solid state device engineering from Tokai University, Tokai, Japan.

His research interests are in design, simulation, fabrication and characterization of semiconductor device, semiconductor sensors on integrated circuit. He is currently working at the Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2560.....

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน) แบบปกติ แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ)ภาษาไทย การออกแบบที่เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดและการสร้างอุปกรณ์โคโอดตรวจจับสนามแม่เหล็ก
ประสิทธิภาพสูง

ภาษาอังกฤษ Optimized Design and Fabrication of Magnetodiode for High Efficiency Magnetic
Sensor

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2559 ถึงวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ.2560.....

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2559 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ.2560.....

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 403,750 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป).....

งวดที่ 2 71,250 บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป).....

3. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้บังคับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย)บาท(คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร :ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	100,000	100,000	-
ค่าวัสดุ	375,000	375,000	-
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	475,000	475,000	-

ประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล.....เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล.....

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศบ.	อิเล็กทรอนิกส์	สจล.	2532
วศม.	ไฟฟ้า	สจล.	2535
D. ENG	Solid State Device	Tokai University	2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา).....อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....อุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก
 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....OCM.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2559	รางวัลผลงานวิจัยดีมาก	สำนักคณะกรรมการอุดมศึกษา

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2536	ทุนคณาจารย์	JSPS
2538	ทุนศึกษาปริญญาเอก	ทุนทบวงมหาวิทยาลัย
2542	ทุนโครงการร่วมมือไทย ญี่ปุ่น	JICA
2558	ทุนวิจัย	สกอ.
2559	ทุนวิจัย	วช.

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Chalin Sutthinet, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai and Toempong Phetchakul, "The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode" International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, (accepted for publishing) 2018.
2. Pavaris Phuvanatai, Toempong Phetchakul, "Quartz Crystal Microbalance coated with 18-crown-6 ether film for 2, 4,6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection", Key Engineering Material, Vol. 748, pp. 358-362, 2017.
3. Toempong Phetchakul^{1,a} and Pavaris Phuvanata, "A Study on 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection by Using a Quartz Crystal Microbalance with 18-crown-6 Ether Film" , AIP conference Proceedings, Vol. 1858, p. 020004, 2017.
4. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jearmsaksiri, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai "A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection" Microelectronics Journal, 40 (2014) 565-573.
5. Weera Pengchan, Toempong Phetchakul, Amporn Poyai "The local generation and recombination lifetime based on forward diode characteristics diagnostics" Journal of Crystal Growth, Volume 362, 1 January 2013, Pages 300-303
6. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Deflection Effect" IEEE Sensors Journal, Vol. 10, No. 2, 2010.
7. T. Phetchakul, C. Sutthinet "Monitoring of Draft Beer Fermentation Process by Electronic Nose" Advanced Materials Research Vol. 911 (2014) pp 297-301.
8. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer" Advanced Material Research, Vol. 911, pp. 271-275, 2014
9. Toempong Phetchakul, Prateep Taisettavatkul, Wittawat Yamwong and Amporn Poyai, "Split-current Magnetoresistor" Advanced Materials Research, Vol. 739 (2013), pp. 489-49213.
10. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, C. Leepattarapongpan, E. Chaowicharat, P. Pengpad and A. Poyai, "The Study of p-n and Schottky Junction for Magnetodiode" Advanced Materials Research, Vol. 378-379, 2012.

11. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Improved extraction of the local carrier generation lifetime from forward diode characteristics", *Advanced Material Research*, Vol. 378-379, 2012.

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Chalin Sutthinet, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai and Toempong Phetchakul, "The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode" 7th International Conference on Engineering and Innovative Materials (ICEIM), Kitakyushu, Japan, 10-12 September, 2018.
2. Yothin Chemthung, Toempong Phetchakul and Amporn Poyai, "Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance", 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2018), Chiang Rai, Thailand, 18-21 July 2018.
3. Rattapong Nakachai, Sawatdipong Poonsawat, Chalin Sutthinet, Anucha Ruangphanit, Amporn Poyai and Toempong Phetchakul "Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure", 6th International Electrical Engineering Congress, Krabi, Thailand, 7-9 March, 2018.
4. Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai, "Effect of Substrate Depth to 5-Contact Vertical Hall", 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2017), Phuket, Thailand, June 27-30, 2017.
5. Rattapong Nakachai, Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai "Simulation of MOSFET as Horizontal Magnetic MOSFET (MAGFET)", Shenzhen, China, April 14-16, 2017.
6. Pavaris Phuvanatai, Toempong Phetchakul, "A Using of Quartz Crystal Microbalance for 2, 4, 6-Trinitrotolurene (TNT) Vapor Detection", 3rd Asean conference of defence technology (3rd ACDT), Phuket, January 18-20, Thailand, 2017.
7. Watcharapong Kongjaroon, Toempong Phetchakul, "Electronic Target by Using Luminescence Film", 3rd Asean conference of defence technology (3rd ACDT), Phuket, Thailand, January 18-20, 2017.
8. T. Phetchakul, C. Sutthinet "Monitoring of Draft Beer Fermentation Process by Electronic Nose" *Advanced Materials Research* Vol. 911 (2014) pp 297-301.
9. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Defect Distribution and Yield

- Analysis Technique on Silicon Wafer” Advanced Material Research, Vol. 911, pp. 271-275, 2014.
10. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai “A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Reflection Effect” The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
 11. W. Praepttharapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai “Yield Analysis by Poisson Yield Model based on the Defect Analysis with Derivative Method” The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
 12. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai “Mechanism of Merged Magnetotransistor” The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.
 13. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai “Defect Distribution Analysis by Derivative Technique for P-N Junction” The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.
 14. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and Amporn Poyai, “Contributing Parameters for Magnetoresistance Effect of The New Design on Hall Plate Structure” 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2013, 15-17 May, Krabi, Thailand. 2013.
 15. 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, 16-18 May, Phetchaburi, Thailand, 2012.
 16. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai “The Mechanism of Dual Schottky Magnetodiode” 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012, 16-18 May, Phetchaburi, Thailand, 2012.
 17. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai “The Study of Forward and Reverse Schottky Junction for Dual Magnetodiode” 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular System, IEEE-NEMS 2012, 5-8 March, Kyoto, Japan, 2012.

18. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai, "A Simulation of Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" The 7th Annual Conference of Thai Physics Society, Siam Physic Congress 2012, 9-12 May, Pra Nakon Si Ayutthaya, Thailand, 2012.
19. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Non-uniform Defects Assessment by I-V and C-V characteristics of p-n junction" ICDS 2011, The 26th International Conference on Defects in Semiconductor, 17 – 22 July, Nelson, New Zealand, 2011.
20. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun and A. Poyai, "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor", Proc. Eurosensors XXV, September 4-7, Athens, Greece, 2011.
21. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Local Generation and Recombination Lifetime based on Forward Diode Characteristics Diagnostics", ICMAT 2011, The 6th International Conference on Material for Advanced Technologies, 26 June -1 July, Singapore, 2011.
22. T. Phetchakul, P. Sottip, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun, and A. Poyai, "The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
23. T. Phetchakul, A. Sangnual, and C. Sutthinet, "Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi- Walled Carbon Nanotube", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
24. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Defects Analysis in CMOS Fabrication by Arrhenius Activation Energy Technique" IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

1. ต้นแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์
2. ต้นแบบแมกนีโตไดโอด
3. ต้นแบบแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบสามแกน
4. ต้นแบบเซนเซอร์ตรวจจับสนวนแม่เหล็กแบบ MSM
5. ต้นแบบมอสแมกเฟท