

แมกนีโตไดโอดแบบคู่โดยการเบี่ยงเบนกระแส
DUAL MAGNETODIODE BY CURRENT DEFLECTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

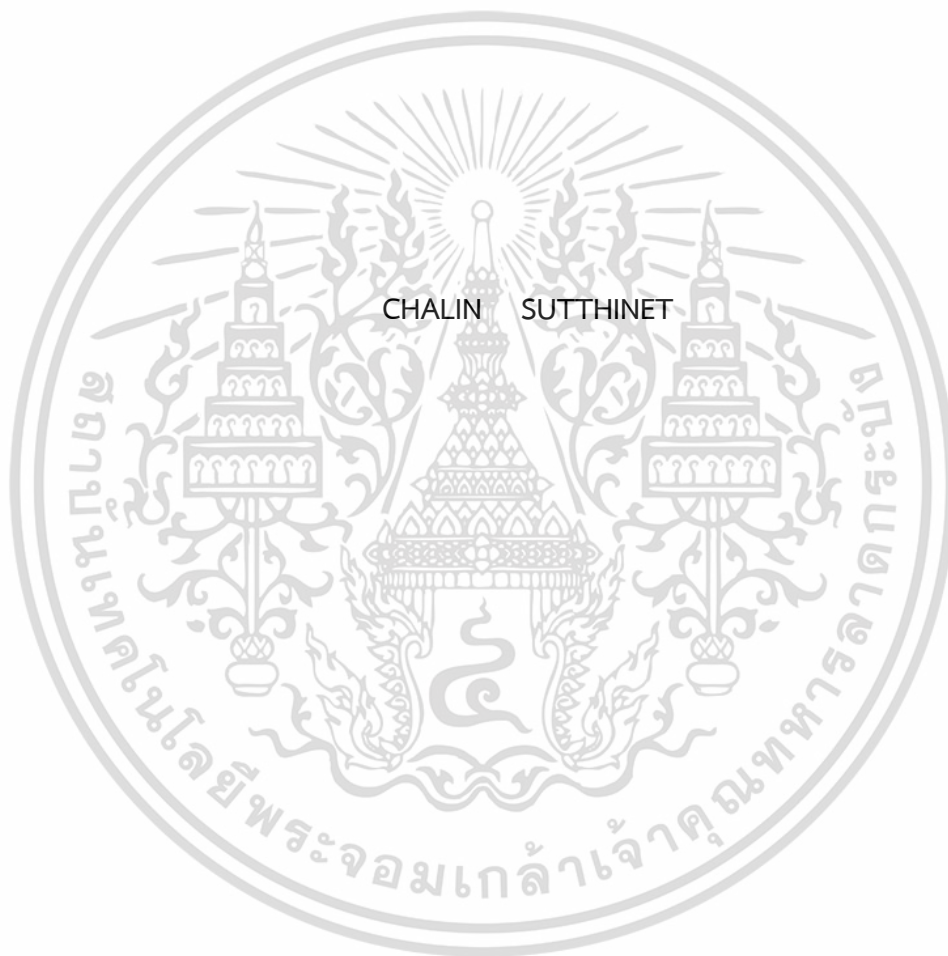
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-018-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DUAL MAGNETODIODE BY CURRENT DEFLECTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

KMITL-2021-EN-D-018-088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แมกนีโตไดโอดแบบคู่โดยการเบี่ยงเบนกระแส
นักศึกษา	นายชลินทร์ สุทธิเนตร
รหัสประจำตัว	57601042
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ทำงานอยู่ในโหมดกระแส ใช้ TCAD ในการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดแบบคู่เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โครงสร้างอุปกรณ์ประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็นสองรอยต่อโดยรวมขั้วด้านหนึ่งเข้าด้วยกันให้อีกด้านเป็นขั้วแยกสำหรับวัดความแตกต่างของกระแส กลไกการทำงานอาศัยการเบี่ยงเบนพาหะตามแรงลอเรนซ์ที่เกิดการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก พาหะถูกฉีดจากขั้วจ่ายพาหะด้วยการให้ไบอัสตรง พาหะจะแพร่เบี่ยงเบนและรวมตัวใหม่ไปตามแนวฐานรองตลอดทางไปสู่ขั้วแยกโดยจะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นและสมมาตร การเปรียบเทียบโครงสร้างชนิดแคโทดคู่กับแอโนดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, และ 50 μm กระแสไบอัส 1 mA สนามแม่เหล็ก 0.5 T ค่าความไวสัมพัทธ์ (S_R) ของชนิดแคโทดคู่มีค่า 0.987, 1.611, 2.870, 4.097, 8.076 และ 11.01 T^{-1} และชนิดแอโนดคู่มีค่า 0.989, 1.702, 2.936, 4.177, 8.106 และ 11.19 T^{-1} ตามลำดับ การเปรียบเทียบค่าความไวสัมพัทธ์ (S_R) ที่ค่ากระแสไบอัส 0.5, 1, 2 และ 3 mA ชนิดแคโทดคู่มีค่า 7.506, 11.09, 24.08, 45.08 T^{-1} และชนิดแอโนดคู่มีค่า 7.606, 11.18, 26.09, 47.09 T^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดแบบคู่ชนิดมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสผลปรากฏว่าชนิดไม่มีช่องว่างดีกว่าชนิดมีช่องว่างบริเวณรับกระแส สุดท้ายการประยุกต์ใช้แมกนีโตไดโอดแบบคู่โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นและโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะเป็นเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงในตัวเดียวกัน

Thesis	Dual Magnetodiode by Current Deflection
Student	Mr. Chalin Sutthinet
Student ID.	57601042
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This thesis presents the study of dual magnetodiode. The device working in the current mode is presented. TCAD is used to simulate the electrical behavior of the device under influence of a magnetic field. The structure is composed of two p-n junctions in that one region is common and the others are split terminals for output of differential current. The mechanism is carrier deflection by Lorentz's force from a magnetic field. The carriers are injected from the common region by forward bias. The deflection carriers diffuse, deflect and recombine along substrate through split terminals according to direction and density of the magnetic field linearly and symmetrically. From the comparison of the complementary structure of the split cathode and the split anode structure of deflection length 5, 10, 20, 30, 40, and 50 μm , the bias current 1 mA and magnetic field 0.5 T, the relative sensitivities (S_R) of the split cathode are 0.987, 1.611, 2.870, 4.097, 8.076, and 11.01 T^{-1} , and in the case of split anode are 0.989, 1.702, 2.936, 4.177, 8.106, and 11.19 T^{-1} , respectively. The comparison of bias current 0.5, 1, 2, and 3 mA the relative sensitivities (S_R) of split cathode are 7.506, 11.09, 24.08, 45.08 T^{-1} , and in the case of split anode are 7.606, 11.18, 26.09, 47.09 T^{-1} respectively. In addition, a comparative of gap and gapless dual magnetodiode is studied. The results showed that the gapless is better than the gap dual magneto diodes. Finally, the pn junction and MSM structure are special designs for magnetic field detectors and detect electromagnetic waves.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาและควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้ความรู้ความคิดริเริ่มคำปรึกษาชี้แนะในการแก้ปัญหาตลอดจน ประสพการณ์การวิจัยและการค้นคว้าที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จาก ท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ที่มอบความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์อันล้ำค่า รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง รศ.สมศักดิ์ เขียวศิริกุล รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ผศ.ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง ผศ.ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ ผศ.ดร.วีระ เพ็งจันทร์ รศ.ดร.สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ ศ.ดร.วรากร เกษมสุวรรณ ผศ.ดร.วันชัย รวีรุจา ศ.ดร.วัลลภ สุระกำพลธร รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต รศ. ดร.สุธี อักษรกิตติ เจ้าหน้าที่บุคลากรและนักศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการ ศูนย์บริการวิชาการออกแบบและวิศวกรรม (Design & Engineering Consulting Service Center : DECC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center : TMEC) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ บิดาและมารดาที่สนับสนุนด้านการศึกษาและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ด้วยการพร่ำสอนอบรม เรื่องความอดทนมุ่งมั่นตั้งใจในการเป็นวิศวกรที่ดี ทำงานสร้างประโยชน์ให้แก่คนหมู่มากสร้าง ความเจริญให้แก่โลก

ชลินทร์ สุทธิเนตร

สารบัญ

บทที่.....	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 สมมุติฐานการศึกษา	3
1.4 ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....	6
2.1.1 อุปกรณ์ตรวจจับระดับสนามแม่เหล็กต่ำ (Low Field Sensors)	6
2.1.1.1 Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)	7
2.1.1.2 ไฟเบอร์ออปติก (Fiber-optic magnetometer).....	7
2.1.1.3 ออปติคอลลัมป์ (Optically pumped magnetometer).....	7
2.1.1.4 นิวเคลียร์พรีเซสชัน (Nuclear precession magnetometer)	7
2.1.1.5 เซิร์ชคอยล์ (Search-coil magnetometer)	8
2.1.2 อุปกรณ์ตรวจจับระดับสนามแม่เหล็กโลก (Earth's Field Sensors).....	8
2.1.2.1 แอนไอโซโทรปิกรีซิสแตนซ์ (Anisotropic resistance)	8
2.1.2.2 ฟลักซ์เกต (Flux gate magnetometer).....	8
2.1.3 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบไบอัส (Bias Magnetic Field Sensors).....	8
2.1.3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)	9
2.1.3.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)	9
2.1.3.3 แมกนีโต-ออปติคอลล (Magneto-optical sensor).....	9
2.1.3.4 ไซแอนแมกนีโตรีซิสทีฟ (Giant magnetoresistive sensor)	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2	หลักการทํางานของอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device)	10
2.2.1	ปรากฏการณ์กัลวานโนแมกเนติก (Galvanomagnetic effect)	10
2.2.2	ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)	10
2.2.2.1	สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field)	12
2.2.2.2	แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)	13
2.2.2.3	มุมฮอลล์ (Hall angle)	14
2.2.2.4	สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)	14
2.2.2.5	ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection effect)	16
	แผ่นคอบิน (Corbino disc)	16
	การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection)	18
	มุมฮอลล์ (Hall angle)	19
2.2.2.6	ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)	20
2.2.2.7	โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	21
	โครงสร้างฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	21
	ตัวประกอบโครงสร้าง (Geometrical correction factor)	22
2.2.2.8	การคำนวณการเบี่ยงเบนที่กระแส	26
2.2.2.9	ความไว (Sensitivity)	30
2.3	แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)	32
2.4	แมกนีโตไดโอดแบบคู่ (Dual magnetodiode)	34
2.4.1	โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่	34
2.4.2	หลักการทํางานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่	35
บทที่ 3	การจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD	37
3.1	การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ	39
3.2	การจำลองแบบกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่	40
3.2.1	การสร้างแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่	40
3.2.2	การสร้างโครงตาข่าย (Mesh)	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การสร้างฐานรองและพื้นผิวออกไซด์ (Oxidation process).....	43
3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)	44
3.2.5 การแพร่สารเจือและการอบ (Diffusion and Annealing).....	45
3.2.6 การสร้างและกำหนดหน้าสัมผัสขั้วไฟฟ้า (Metallization)	46
3.3 การจำลองแบบการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ	48
3.3.1 แบบจำลองทางฟิสิกส์.....	49
3.3.1.1 โมเดลโครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงาน (Energy band structure and band gap).....	49
3.3.1.2 โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (Mobility models)	52
3.3.1.3 โมเดลการผสมกลับของพาหะ (Generation-Recombination).....	56
3.3.1.4 โมเดลสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field).....	63
บทที่ 4 ผลการทดลองวิเคราะห์และอภิปรายผล	65
4.1 การวัดคุณสมบัติของแมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	65
4.1.1 การวัดคุณสมบัติรอยต่อแมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	66
4.1.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	67
4.1.2.1 วงจรวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่.....	68
4.1.2.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในวงจรวัด.....	69
4.1.2.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสอินพุตค่าแตกต่างกัน.....	70
4.2 ผลการจำลองการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ด้วยโปรแกรม TCAD.....	71
4.2.1 การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	72
4.2.1.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะแตกต่างกัน.....	72
4.2.1.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสไบอัสแตกต่างกัน.....	73
4.2.1.3 ความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	74
4.2.2 การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	76
4.2.2.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะแตกต่างกัน.....	76
4.2.2.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสไบอัสแตกต่างกัน.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 ความหนาแน่นกระแสในแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	78
4.3 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่.....	80
4.3.1 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	81
4.3.2 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	82
4.4 กลไกกระแสของแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่.....	83
4.4.1 กลไกกระแสของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	84
4.4.2 กลไกกระแสของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	86
4.4.3 เปรียบเทียบทิศทางการกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่และแอโนดคู่.....	87
4.5 การจำลองแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่.....	88
4.5.1 การจำลองแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	88
4.5.1.1 โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	88
4.5.1.2 ความหนาแน่นกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	89
4.5.1.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	90
4.5.1.4 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	91
4.5.2 การจำลองแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	93
4.5.2.1 โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	93
4.5.2.2 ความหนาแน่นกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	93
4.5.2.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	94
4.5.2.4 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่.....	95
4.6 การประยุกต์ใช้งานแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่.....	98
4.6.1 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ.....	98
4.6.1.1 การจำลองแบบโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะและคุณสมบัติ.....	98
4.6.1.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	100
4.6.1.3 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ.....	100
4.6.2 มัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสง.....	101
4.6.2.1 โครงสร้างมัลติเซนเซอร์ไดโอด.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก.....	102
4.6.2.3 การตอบสนองต่อแสง.....	105
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เซนเซอร์แม่เหล็กประเภทต่างๆ	6
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรสำหรับวิเคราะห์ band gap narrowing สำหรับวัสดุซิลิคอน.....	51
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับโมเดลของ Masetti.....	53
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรมาตรฐานสำหรับซิลิคอนของโมเดลสภาพคล่องคงที่	54
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของโมเดล Conwell-Weisskopf สำหรับซิลิคอน	54
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรของโมเดล Canali (ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอน).....	55
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรการอ้อมตัวของความเร็ว	55
ตารางที่ 3.7 ค่าตัวแปรมาตรฐานของช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับการเจือสาร (doping-dependent SRH lifetimes).....	58
ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานตัวแปรช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	58
ตารางที่ 3.9 ตัวแปรของโมเดลการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH	63
ตารางที่ 4.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไบอัสแตกต่างกัน.....	71
ตารางที่ 4.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน	73
ตารางที่ 4.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสต่างกัน	74
ตารางที่ 4.4 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน	77
ตารางที่ 4.5 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสแตกต่างกัน ..	78
ตารางที่ 4.6 การตอบสนองของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน ...	90
ตารางที่ 4.7 ความไวการตอบสนองแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวตรวจจับหรือเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบ IoT	1
รูปที่ 2.1 ปรัชญาการนำฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n	11
รูปที่ 2.2 แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาว	15
รูปที่ 2.3 แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)	16
รูปที่ 2.4 แผ่นคอร์ปิโน เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลมที่มีขั้วหนึ่งขั้วอยู่ตรงกลางและอีกขั้วอยู่ล้อมรอบเส้นรอบวงของแผ่น ในแผ่นคอร์ปิโนสนามไฟฟ้า E จะแผ่ตามรัศมีวงกลมโดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ส่วนความหนาแน่นกระแส J จะถูกทำให้เอียงตามมุมฮอลล์ θ_H	17
รูปที่ 2.5 แผนภาพสมการเวกเตอร์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นสารกึ่งตัวชนิด p (p) และ n (n)	19
รูปที่ 2.6 ปรัชญาการเปรียบเทียบของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นที่ถูกบ่อนด้วย (a) แรงดันคงที่ และ (b) กระแสคงที่ เส้นประคือเส้นกระแสที่ $B = 0$ เส้นทึบคือเส้นกระแสที่ $B \neq 0$	20
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์	22
รูปที่ 2.8 ตัวประกอบโครงสร้างของแผ่นฮอลล์สี่เหลี่ยม	23
รูปที่ 2.9 ตัวประกอบโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม	24
รูปที่ 2.10 ตัวประกอบโครงสร้างของฮอลล์ที่ขึ้นกับความเข้มข้นอะตอมของสารเจือผู้ให้	25
รูปที่ 2.11 ปรัชญาการนำฮอลล์ที่เกิดบนอุปกรณ์ฮอลล์	26
รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ที่อาศัยปรัชญาการเปรียบเทียบของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็กขณะไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน	27
รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ที่อาศัยปรัชญาการเปรียบเทียบของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็กขณะมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน	27
รูปที่ 2.14 ท่อกระแสและท่อกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนที่เป็นไปได้ทั้งหมด (รูปสี่เหลี่ยมคางหมู)	28
รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรัชญาการเปรียบเทียบกระแส	30
รูปที่ 2.16 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่ (η) ไม่มีสนามแม่เหล็ก (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน	32
รูปที่ 2.17 คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่	33
รูปที่ 2.18 กลไกของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (η) โครงสร้างของ pin diode	33
รูปที่ 2.19 แมกนีโตไดโอดโครงสร้าง SOS	34
รูปที่ 2.20 แมกนีโตไดโอดโครงสร้าง CMOS	34
รูปที่ 2.21 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่ (η) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอนโนดคู่	35
รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์แมกนีโตไดโอดแบบคู่ (η) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอนโนดคู่	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.23	โพลีเอทิลีนที่ในแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก (ข) มีสนามแม่เหล็ก 35
รูปที่ 2.24	อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่ก่อนและหลังได้รับสนามแม่เหล็ก 36
รูปที่ 3.1	การจำลองแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย TCAD..... 38
รูปที่ 3.2	แบบของแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ (ก) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอโนดคู่..... 41
รูปที่ 3.3	การกำหนดโครงตาข่ายในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์..... 42
รูปที่ 3.4	ฐานรองซิลิคอนในการจำลองแบบ..... 43
รูปที่ 3.5	ภาพตัดขวางการสร้างพื้นผิวซิลิคอนออกไซด์ลงบนฐานรองซิลิคอน..... 43
รูปที่ 3.6	ภาพสามมิติการสร้างพื้นผิวซิลิคอนออกไซด์ลงบนฐานรองซิลิคอน..... 44
รูปที่ 3.7	การสร้างชั้นน้ำยาไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นซิลิคอนออกไซด์..... 44
รูปที่ 3.8	การฉายแสง (Ultraviolet) ลงบนน้ำยาไวแสง..... 44
รูปที่ 3.9	การลอกน้ำยาไวแสง (Photoresist) ออกจากผิวซิลิคอนออกไซด์..... 45
รูปที่ 3.10	การกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ออกได้เป็นช่องสำหรับการแพร่สารเจือ..... 45
รูปที่ 3.11	การแพร่สารเจือผ่านช่องออกไซด์ที่เปิดไว้..... 45
รูปที่ 3.12	ภาพตัด 2 มิติรูปทรงที่แพร่สารเจือแล้ว..... 46
รูปที่ 3.13	ภาพหน้าตัดการสร้างชั้นอลูมิเนียมก่อนการกัด..... 46
รูปที่ 3.14	ขั้วไฟฟ้าหลังจากกัดอลูมิเนียมออกไปแล้ว..... 46
รูปที่ 3.15	ภาพตัดแมกนีไทด์ไดโอดพร้อมขั้วไฟฟ้า..... 47
รูปที่ 3.16	โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจากกำหนดบริเวณจุดหน้าสัมผัสไฟฟ้า..... 47
รูปที่ 3.17	แบบจำลองแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่..... 47
รูปที่ 3.18	การจำลองแบบการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Device simulation)..... 49
รูปที่ 4.1	แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ในแผ่นซิลิคอนที่สร้างเสร็จ..... 65
รูปที่ 4.2	การตรวจสอบแมกนีไทด์ไดโอด (ก) การใช้โพรบวัดที่แผ่นซิลิคอน (ข) ตัวอุปกรณ์ที่ทดสอบ 66
รูปที่ 4.3	แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ที่เชื่อมต่อลวดโลหะติดตั้งลงในบรรจุภัณฑ์ (Packaging)..... 66
รูปที่ 4.4	คุณสมบัติกระแสแรงดันของรอยต่อที่ขนาด $L_D = 50 \mu\text{m}$ 67
รูปที่ 4.5	คุณสมบัติกระแสแรงดันของรอยต่อที่ขนาด $L_D = 60 \mu\text{m}$ 67
รูปที่ 4.6	วงจรวัดการตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ (Split Cathode)..... 69
รูปที่ 4.7	วงจรวัดการตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอโนดคู่ (Split Anode)..... 69
รูปที่ 4.8	การตอบสนองสนามแม่เหล็ก $W_E = 50 \mu\text{m}$, $L_D = 50 \mu\text{m}$ 70
รูปที่ 4.9	การตอบสนองสนามแม่เหล็ก $W_E = 60 \mu\text{m}$, $L_D = 60 \mu\text{m}$ 70
รูปที่ 4.10	โครงสร้างของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่สำหรับการจำลองแบบ..... 72
รูปที่ 4.11	การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน 73
รูปที่ 4.12	การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสต่างกัน..... 73
รูปที่ 4.13	กระแสรวมแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ Total current (I_T)..... 75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14	กระแสโฮลแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ Hole current (I_h).....	75
รูปที่ 4.15	กระแสอิเล็กตรอนแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ Electron current (I_e).....	76
รูปที่ 4.16	โครงสร้างของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่สำหรับการจำลองแบบ.....	76
รูปที่ 4.17	การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน	77
รูปที่ 4.18	การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ที่กระแสไบอัสต่างกัน	78
รูปที่ 4.19	กระแสรวมแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ Total current (I_T).....	79
รูปที่ 4.20	กระแสอิเล็กตรอนแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ Electron current (I_e).....	79
รูปที่ 4.21	กระแสโฮลแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ Hole current (I_h).....	80
รูปที่ 4.22	กฎมือขวาใช้หาทิศทางการเบี่ยงเบนพาหะตามทิศทางกระแสอิเล็กตรอนและโฮล.....	81
รูปที่ 4.23	การเคลื่อนที่ของโฮลแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ไม่มีสนามแม่เหล็ก $B_z = 0$	81
รูปที่ 4.24	การเคลื่อนที่ของโฮลแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่มีสนามแม่เหล็กในทิศ $-B_z$	81
รูปที่ 4.25	การเคลื่อนที่ของโฮลแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่มีสนามแม่เหล็กในทิศ $+B_z$	82
รูปที่ 4.26	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ไม่มีสนามแม่เหล็ก $B_z = 0$	82
รูปที่ 4.27	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่มีสนามแม่เหล็กในทิศ $-B_z$	83
รูปที่ 4.28	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่มีสนามแม่เหล็กในทิศ $+B_z$	83
รูปที่ 4.29	การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	85
รูปที่ 4.30	การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่.....	86
รูปที่ 4.31	โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	88
รูปที่ 4.32	ความหนาแน่นกระแสชนิดแคโทดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 5 \text{ um}$	89
รูปที่ 4.33	ความหนาแน่นกระแสชนิดแคโทดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 2.5 \text{ um}$	89
รูปที่ 4.34	ความหนาแน่นกระแสชนิดแคโทดคู่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 0 \text{ um}$	89
รูปที่ 4.35	การตอบสนองของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน	90
รูปที่ 4.36	การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่.....	91
รูปที่ 4.37	การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 5 \text{ um}$	91
รูปที่ 4.38	การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 5 \text{ um}$	91
รูปที่ 4.39	การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$	92
รูปที่ 4.40	การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$	92
รูปที่ 4.41	การเปรียบเทียบแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่แบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส.....	92
รูปที่ 4.42	โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่.....	93
รูปที่ 4.43	ความหนาแน่นกระแสชนิดแอนโนดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 5 \text{ um}$	93
รูปที่ 4.44	ความหนาแน่นกระแสชนิดแอนโนดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 2.5 \text{ um}$	94
รูปที่ 4.45	ความหนาแน่นกระแสชนิดแอนโนดคู่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 0 \text{ um}$	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.46 ความไวการตอบสนองแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน	94
รูปที่ 4.47 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่	95
รูปที่ 4.48 การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะ $W_g = 5 \text{ um}$	96
รูปที่ 4.49 การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะ $W_g = 5 \text{ um}$	96
รูปที่ 4.50 การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$	96
รูปที่ 4.51 การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$	97
รูปที่ 4.52 การเปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่แบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส	97
รูปที่ 4.53 ตัวตรวจจับแสง MSM (ก) โครงสร้างแบบพื้นหวี (ข) แลปพลังงาน (ค) กราฟกระแสแสง	98
รูปที่ 4.54 แมกนีโตไดโอดแบบคู่	99
รูปที่ 4.55 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ	99
รูปที่ 4.56 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของเซนเซอร์โลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ	100
รูปที่ 4.57 ความหนาแน่นกระแสของเซนเซอร์โลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ	100
รูปที่ 4.58 กลไกการทำงานของเซนเซอร์โลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ	100
รูปที่ 4.59 มิติโครงสร้างมัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสง	102
รูปที่ 4.60 มัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงที่ได้ทำการสร้าง	102
รูปที่ 4.61 วงจรวัดที่ใช้ทดสอบมัลติเซนเซอร์ไดโอด	102
รูปที่ 4.62 การตอบสนองสนามแม่เหล็กในสภาวะไบอัสตรง	103
รูปที่ 4.63 การตอบสนองสนามแม่เหล็กในสภาวะไบอัสกลับ	103
รูปที่ 4.64 กลไกการเบี่ยงเบนกระแสในสภาวะไบอัสตรง	104
รูปที่ 4.65 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแสในสภาวะไบอัสตรง	104
รูปที่ 4.66 กลไกการเบี่ยงเบนกระแสในสภาวะไบอัสกลับ	104
รูปที่ 4.67 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแสในสภาวะไบอัสกลับ	104
รูปที่ 4.68 คุณสมบัติกระแสแรงดันที่การเปลี่ยนความเข้มแสงค่าต่าง ๆ	105
รูปที่ 4.69 การดูดกลืนโฟตอนไปตามระยะทางจากพื้นผิวของอุปกรณ์	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
B	Magnetic field	Wb/m^2
d	Hall thickness	μm
e	Electron charge = 1.602×10^{-19}	C
E_H	Hall field	V/cm
E	Electric field	V/cm
\vec{F}_L	Lorentz force	$\text{V} \cdot \text{Wb/m} \cdot \text{s}$
G	Geometry Factor	-
I_D	Diode current	A
J_n	Electron density	A/cm^2
J_p	Hole density	A/cm^2
J_x	Current density	A/cm^2
L, l	Length of hall	μm
n	Density of electron	cm^{-3}
p	Density of hole	cm^{-3}
q	Magnitude of electronic charge = 1.602×10^{-19}	C
r_n	Scattering parameter	-
R_H	Hall constant	$1/\text{C} \cdot \text{cm}^{-3}$
S_A	Absolute sensitivity	V/T
S_R	Relative sensitivity	T^{-1}
v_x	Velocity	cm/s
V_H	Hall voltage	V
W, w	Width of hall	μm
μ_H	Hall mobility	$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
μ_{Hi}	Hall mobility (Consider collusion of lactic)	$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
μ_n	Electron mobility	$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
μ_p	Hole mobility	$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
θ_H	Hall angle	rad
ρ	Resistivity	$\Omega \cdot \text{cm}$
σ	Conductivity	$(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

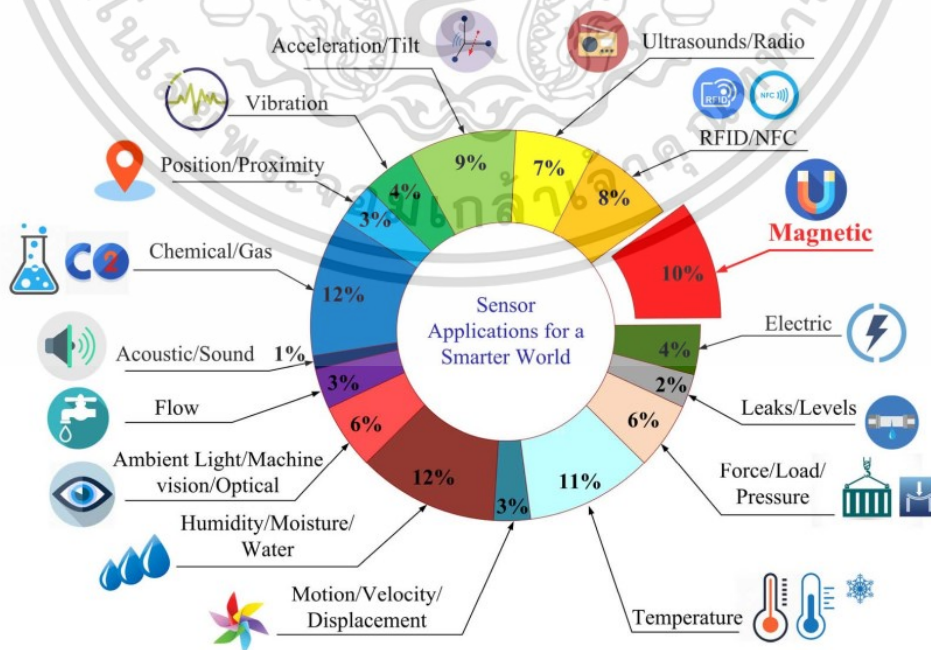
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things : IoT) [1-4] เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในชีวิตของมนุษย์ เช่น การเกษตรแม่นยำ (Precision Farming) ระบบขนส่งและการจัดการโลจิสติกส์ (Transportation and Logistics Management) ระบบการจัดการพลังงานและสาธารณูปโภค (Utility Management) ระบบสาธารณสุขอัจฉริยะ (Smart Health) ระบบเทคโนโลยีการเงิน (Financial Technology : FinTech) เป็นต้น โดย IoT เป็นกรอบแนวคิดของระบบโครงข่ายที่รองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หลากหลายชนิด ตั้งแต่ระบบสมองกลฝังตัว คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ อุปกรณ์โครงข่าย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เซนเซอร์ และวัตถุต่างๆ เข้าด้วยกัน อันเป็นผลให้ระบบต่าง ๆ สามารถติดต่อสื่อสารและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติทั้งยังเป็นผลให้มนุษย์สามารถเข้าถึงข้อมูลอย่างหลากหลายนำไปใช้ประโยชน์ได้ดียิ่งขึ้น การควบคุมอุปกรณ์และระบบต่างๆ ทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก ระบบ IoT จะรับรู้สภาพแวดล้อมภายนอกได้จะต้องอาศัยตัวตรวจจับหรือเซนเซอร์ [4, 5] เซนเซอร์จึงเป็นอุปกรณ์สำคัญส่วนหนึ่งของระบบโดยทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหรือลักษณะของสิ่งต่างๆ โดยรอบวัตถุเป้าหมาย และนำข้อมูลเข้าสู่ระบบ จึงมีการพัฒนาเซนเซอร์เพื่อใช้ในระบบต่าง ๆ มาอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวตรวจจับหรือเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบ IoT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กเป็นเซนเซอร์สำคัญชนิดหนึ่งที่มีให้ใช้งานมากมายทั้งแบบที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือแบบที่มีโครงสร้างเรียบง่าย หนึ่งในนั้นอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กแบบพื้นฐานคือแมกนีโตไดโอด การกลับไปทำความเข้าใจหลักการพื้นฐาน จะนำมาซึ่งความรู้ความเข้าใจเพื่อนำไปสร้างใหม่หรือปรับปรุงอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกัน นอกจากการศึกษาเพื่อออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยการสร้างจริงและทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดตามปกติแล้ว งานวิจัยนี้เลือกวิธีการจำลองแบบเพื่อทำความเข้าใจแมกนีโตไดโอดแบบคู่ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและทำสิ่งที่เครื่องมือวัดทำไม่ได้โดยอาศัยการคำนวณและวิเคราะห์เท่านั้น

แมกนีโตไดโอดในแบบดั้งเดิมทำงานได้โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะระหว่างสองรอยต่ออันเป็นผลเนื่องมาจากแมกนีโตคอนเซนเทรชัน (magneto concentration effect) ตัวพาหะจะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) โครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดประกอบขึ้นด้วย $\text{Si-Al}_2\text{-O}_3$ และ Si-SiO_2 ที่พื้นผิวเรียกว่า SOS (Silicon-On-Sapphire) ข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น การสร้าง $\text{Si-Al}_2\text{-O}_3$ จะเกิดขึ้นยากในบริเวณผิวหน้า, ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่ใช่เป็นเชิงเส้นและอุปกรณ์แปรผันกับอุณหภูมิ [5, 6]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาแมกนีโตไดโอดแบบคู่ขึ้นมา ให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน โดยแมกนีโตไดโอดแบบคู่นี้เป็นโครงสร้างแบบแบบไดโอดสองตัวที่ปลายด้านหนึ่งต่อร่วมกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแยกจากกันแบบสมมาตร ทำงานโดยอาศัยหลักการฉีดพาหะ จากปลายที่ต่อร่วมกันไปยังขั้วที่แยกจากกัน โดยการให้ไบอัสตรง เมื่อมีสนามแม่เหล็กให้ทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าอุปกรณ์ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของพาหะ เกิดความแตกต่างของกระแสที่ขั้วที่แยกจากกัน ซึ่งแปรผันตรงเป็นเชิงเส้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แมกนีโตไดโอดแบบคู่นี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งขนาดและทิศทาง ความไวอุปกรณ์แปรตามกระแสไดโอด แมกนีโตไดโอดแบบคู่ โครงสร้างเหมือนไดโอดทั่วไปมีความทนทานง่ายต่อการสร้างและใช้งาน

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาด้วยโครงสร้างรอยต่อแบบพี-เอ็น (p-n junction) โดยศึกษาจากโครงสร้างแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และแอนโนดคู่เปรียบเทียบกับ แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่สร้างบนฐานรองจากซิลิคอนชนิดเอ็น (n-substrate) ทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนที่มีพาหะส่วนมากที่เป็นโฮล เปรียบเทียบกับแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่สร้างบนฐานรองจากซิลิคอนชนิดพี (p-substrate) ทำงานอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนที่มีพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอน พร้อมทั้งศึกษามิติโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อความไวในการตอบสนอง ความเข้าใจในกลไกของแมกนีโตไดโอดนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาทำความเข้าใจขั้นตอนกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่
2. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
3. ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กความสัมพันธ์กระแสและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดแบบคู่
4. ศึกษาผลของระยะเบี่ยงเบนของพื้นที่การฉีดพาหะต่อค่าความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบคู่
5. ศึกษาเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และชนิดแอนโนดคู่
6. ศึกษาเปรียบเทียบการใช้โครงสร้างแบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแสกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสในแมกนีโตไดโอดแบบคู่

1.3 สมมุติฐานการศึกษา

แมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้ โดยอาศัยการทำงานจากกลไกการเบี่ยงเบนกระแสในพื้นที่บริเวณเบี่ยงเบนพาหะระหว่างขั้วที่จ่ายพาหะและขั้วขาออกที่ 1 และขั้วขาออกที่ 2 ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของกระแสโดยสามารถสร้างได้ทั้งสองแบบคือชนิดแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ และแอนโนดคู่

1. แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และชนิดแอนโนดคู่ สามารถทำงานได้ความไวการตอบสนองสนามแม่เหล็กใกล้เคียงกันเนื่องจากโครงสร้างมีความคล้ายกันมาก
2. แมกนีโตไดโอดที่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะจากอิลีกตรอน มีความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดีกว่าแบบที่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะจากโฮล
3. แมกนีโตไดโอดแบบคู่มีโครงสร้างพื้นฐานใกล้เคียงกับไดโอดธรรมดา กลไกกระแสการทำงานต่าง ๆ จะต้องใกล้เคียงกับไดโอดธรรมดา
4. การออกแบบบริเวณเบี่ยงเบนพาหะและบริเวณรับกระแสของขั้วขาออกที่ 1 และขั้วขาออกที่ 2 ที่ดีนำไปสู่ความไวการตอบสนองที่ดีขึ้น
5. การใช้โครงสร้างแบบมีช่องว่างกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสในแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะให้ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีกว่า

1.4 ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แมกนีโตไดโอดแบบคู่เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์มากระทำกับพาหะให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสของขั้วเอาต์พุตทั้งสอง และมีความเป็นเชิงเส้น ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษาและหาเงื่อนไขในการ

ปรับปรุงเพื่อออกแบบ แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่ ให้มีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ดีขึ้น โดยการนำโครงสร้างรอยต่อแบบพี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างแคโทดคู่และแอโนดแบบคู่ เพื่อใช้เป็นตัวศึกษากลไกกระแสโดยสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น (n-substrate) และฐานรองชนิดพี (p-substrate) โดยแมกนีโตไดโอดทำงานโดยอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะส่วนมากอิเล็กตรอนหรือโฮล โดยความรู้ที่ได้จะทำให้เข้าใจเงื่อนไขในการออกแบบเพื่อเพิ่มความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการทำงานพื้นฐานของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยเฉพาะในส่วนของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบไดโอด โดยอยู่ในโครงสร้างแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่ โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ และการนำไปประยุกต์ใช้งานศึกษาปรับปรุงแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และชนิดแอโนดคู่ ให้มีประสิทธิภาพที่ดี แมกนีโตไดโอดทำงานโดยอาศัยพาหะไหลในแนวนอน ใช้สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ และทำการเปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ กับแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่ รวมทั้งการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวในการตรวจจับแบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแสและไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส โดยจะอธิบายกลไกกระแสเป็นสำคัญด้วยการจำลองแบบด้วยโปรแกรมจำลองแบบ TCAD เพื่อดูความสัมพันธ์ของเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับแมกนีโตไดโอดแบบคู่
2. ศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่
3. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่
4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนกระแสไบอัสต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความไวการตรวจจับสนามแม่เหล็ก
5. เปรียบเทียบความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และแอโนดคู่
6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไวการตรวจจับสนามแม่เหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงระยะเบี่ยงเบน ความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะและระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแส
7. เปรียบเทียบความไวการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแสและไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสทั้งชนิดแคโทดคู่และแอโนดคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่าง ๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความจำเป็นมา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย บอกขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแมกนีโตไดโอดแบบคู่ เช่น เซนเซอร์แม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ทฤษฎีรอยต่อพีเอ็น รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ หลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้หลักการฮอลล์ รวมทั้งปรากฏการณ์ฮอลล์ โครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบดั้งเดิม โครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ กลไกการเบี่ยงเบนพาหะ รวมทั้งคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ

บทที่ 3 การจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD

กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองแบบสำหรับงานวิจัยนี้ และกล่าวถึงขั้นตอนการจำลองแบบอุปกรณ์รวมถึงรายละเอียดของโมเดลทางฟิสิกส์ที่อยู่เบื้องหลัง และทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD จากเครื่องมือต่าง ๆ โดยทำการจำลองแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่ทั้งโครงสร้างชนิดแคโทดคู่และแอโนดคู่ การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแสและไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส

บทที่ 4 ผลการทดลองวิเคราะห์และอภิปรายผล

ผลการทดลองวัดและวิเคราะห์แมกนีโตไดโอดแบบคู่ ผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD เปรียบเทียบกันทั้งสองโครงสร้างชนิดแคโทดคู่และแอโนดคู่ การจำลองแบบชนิดที่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสและไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส อธิบายถึงกลไกกระแสแบบจำลองต่าง ๆ และแนวทางการออกแบบให้มีความไวในความไวการตอบสนองที่ดี

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวิจัยหลักการทำงานขั้นพื้นฐาน เปรียบเทียบการจำลองแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่ทั้งชนิดแคโทดคู่และชนิดแอโนดคู่ เปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดชนิดโครงสร้างมีช่องว่างบริเวณรับกระแสกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส และการประยุกต์ใช้งานสรุปแนวทางในการออกแบบที่ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ และกลไกกระแสของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำความเข้าใจกลไกการทำงานพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ เพื่อจะนำไปสู่ความเข้าใจในตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กในโครงสร้างที่ใกล้เคียงกัน เข้าใจเงื่อนไขทางโครงสร้างที่มีผลอย่างมากต่อความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยความรู้ความเข้าใจที่ได้จะนำไปสู่การออกแบบตัวตรวจจับแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

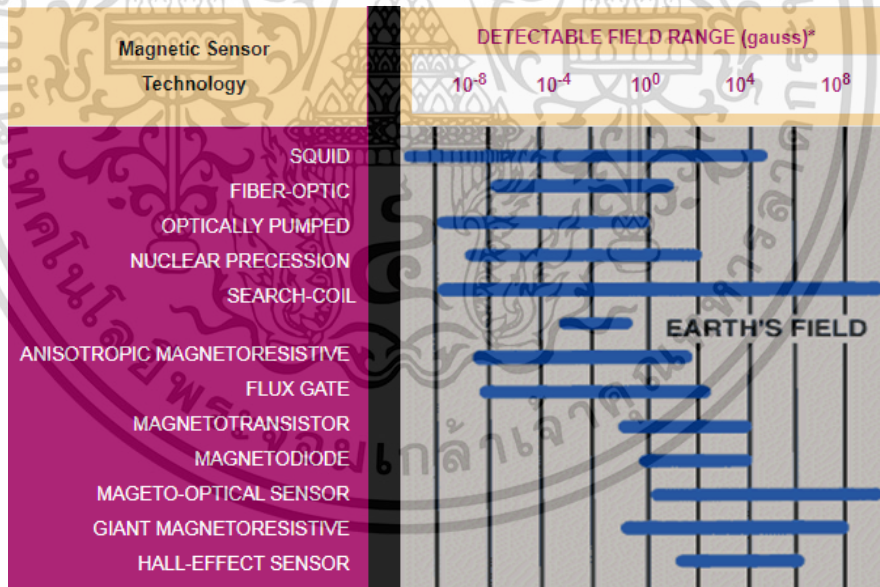
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

เซนเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนปริมาณสนามแม่เหล็กให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยอาศัยปรากฏการณ์ความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีวัสดุศาสตร์รวมทั้งเทคนิคแนวคิดที่มีมากมายก่อให้เกิดเซนเซอร์แม่เหล็กที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยในปัจจุบันเซนเซอร์ถูกประยุกต์ใช้งานมากมายหลากหลาย เช่น วัดตำแหน่ง วัดมุม วัดระยะทาง วัดกระแสไฟฟ้า สวิตช์ตรวจจับแบบไม่สัมผัส ข้อดีคือมีความทนทาน มีความน่าเชื่อถือสูง ดูแลรักษาง่าย มีอายุใช้งานที่ยาวนาน เซนเซอร์แม่เหล็กมีมากมายหลายชนิดมีคุณสมบัติและลักษณะที่ใช้งานแตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับได้เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม Low-field sensor (nT), Earth's field sensor (uT) และ Bias field sensor (mT) ดังตารางที่ 2.1 [7]

ตารางที่ 2.1 เซนเซอร์แม่เหล็กประเภทต่างๆ



*Note: 1 gauss = 10⁻⁴ tesla = 10⁵ gamma

Magnetic Sensor Technology Field Ranges

2.1.1 อุปกรณ์ตรวจจับระดับสนามแม่เหล็กต่ำ (Low Field Sensors)

เซนเซอร์ในกลุ่มตรวจวัดสนามแม่เหล็กระดับต่ำ Low-field sensor (nT) เซนเซอร์กลุ่มนี้จะตรวจจับสนามแม่เหล็กในระดับต่ำมากๆ เช่น Superconducting Quantum Interference Device (SQUID), Fiber-optic magnetometer, Optically pumped magnetometer และ Search coil magnetometer เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)

Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) [8] เซนเซอร์ที่มีความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมากที่สุดในกลุ่ม low-field sensor เมื่อเรานำโลหะสองชนิดมาต่อกัน จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อเมื่อความต่างศักย์ตกคร่อมเป็นศูนย์ และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ตกคร่อม จะมีลักษณะเป็นไปตามกฎของโอห์ม แต่ถ้าเรานำสารตัวนำยิ่งยวดสองตัวมาต่อกัน เราจะพบว่ามีการไหลผ่านแม้ว่าไม่มีความต่างศักย์ตกคร่อม สมบัตินี้เราเรียกกันว่าปรากฏการณ์โจเซฟสันแบบกระแสตรง (DC Josephson Effect) อีกลักษณะเมื่อมีความต่างศักย์ตกคร่อมรอยต่อจะมีการไหลอสซิลเลตขึ้นกับเวลาโดยที่ความถี่เชิงมุมจะมีค่าขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่ตกคร่อม เราเรียกกันว่าปรากฏการณ์โจเซฟสันแบบกระแสสลับ (AC Josephson Effect) เมื่อนำสารตัวนำยิ่งยวดสองชิ้นมาสร้างเป็นรอยต่อลักษณะเป็นวงแหวนเรียกว่ารอยต่อโจเซฟสัน (Josephson junction) เมื่อเราให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในรอยต่อโจเซฟสันวงแหวนตัวนำยิ่งยวดจะทำให้กระแสเริ่มอสซิลเลตเป็นฟังก์ชันกึ่งของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านทำให้สามารถวัดขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ ตัวเซนเซอร์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ในระดับ 10^{-13} T

2.1.1.2 ไฟเบอร์ออปติก (Fiber-optic magnetometer)

การใช้เส้นใยแก้วสองเส้นซึ่งนำมาต่อกันแบบ Mach-Zehnder interferometer [9, 10] โดยจะมีเส้นใยแก้วเส้นหนึ่งถูกเคลือบด้วยวัสดุชนิดที่เปลี่ยนแปลงขนาดได้จากสนามแม่เหล็ก (magnetostrictive material) เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงนี้ก็จะทำให้เกิดรูปแบบการแทรกสอดที่เอาต์พุตของ Interferometer ขึ้น Fiber-optic magnetometer สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง 10^{-10} ถึง 10^{-3} T

2.1.1.3 ออปติคอลลัมป์ (Optically pumped magnetometer)

การทำงานอาศัยปรากฏการณ์ซีแมน (Zeeman Effect) ซึ่งเส้นสเปกตรัมของอะตอมจะเกิดการแยกเป็นแถบย่อย ๆ เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก เมื่อแสงผ่านก๊าซฮีเลียมหรือซีเซียม การดูดกลืนแสงของก๊าซจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก Optically pumped magnetometer มีข้อดีโดยตรงที่มีขนาดใหญ่และกินพลังงานมาก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ดีในช่วง 10^{-12} ถึง 10^{-4} T [11]

2.1.1.4 นิวเคลียร์พรีเซสชัน (Nuclear precession magnetometer)

การทำงานใช้ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของนิวเคลียสในอะตอมของเหลวไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน (benzene) เนื่องจากโมเมนต์เชิงมุมของโปรตอนในของเหลวสามารถจัดเรียงแบบชั่วคราวโดยสนามแม่เหล็กได้ เมื่อทำการปิดสนามที่ใช้สำหรับจัดเรียงโปรตอน ตัวโปรตอนจะเริ่มหมุนควงตามสนามแม่เหล็กรอบๆ โดยความถี่ของการหมุนควงจะขึ้นกับขนาดของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมันสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้ในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-2} T

2.1.1.5 เซิร์ชคอยล์ (Search-coil magnetometer)

การทำงานใช้กฎพื้นฐานทางแม่เหล็กไฟฟ้าการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์โดยการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะเหนี่ยวนำกระแสซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวด โดยทั่วไปแล้วตัวขดลวดมักจะใช้แกนเป็นวัสดุ ferromagnetic เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในระดับ 10^{-12} T ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก [12]

2.1.2 อุปกรณ์ตรวจจับระดับสนามแม่เหล็กโลก (Earth's Field Sensors)

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อยู่ในช่วงค่าสนามแม่เหล็กโลก Earth's field sensor (uT) กลุ่มนี้จะมีการใช้งานการระบุตำแหน่งอย่างกว้างขวาง เช่น แอนไอโซโทรปิกรีซิสแตนซ์ (Anisotropic resistance) ฟลักซ์เกต (Flux gate magnetometer) เป็นต้น

2.1.2.1 แอนไอโซโทรปิกรีซิสแตนซ์ (Anisotropic resistance)

เซนเซอร์ที่อาศัยค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน (Anisotropic resistance : AMR) นั้นอยู่ในกลุ่มของตัวตรวจจับหรือเซนเซอร์ที่เปลี่ยนค่าความต้านทานด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetoresistive sensor) ซึ่งสนามแม่เหล็กภายนอกจะเบี่ยงเบนกระแสที่เกิดขึ้นในวัสดุเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทาน โดยปรากฏการณ์ magnetoresistive ครั้งแรกถูกสังเกตพบในวัสดุ ferromagnetic [13, 14] ปรากฏการณ์นี้จะแสดงออกมาในรูปสมการพหุนามกำลังสอง (quadratic) ที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก แต่เราสามารถทำให้มันเป็นเชิงเส้นได้โดยใช้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างแบบ barberpole [15] ซึ่งโครงสร้างนี้จะมีการทำมุมกับสนามแม่เหล็ก ตัวอุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในช่วง 10^{-11} ถึง 10^{-2} T [16-18]

2.1.2.2 ฟลักซ์เกต (Flux gate magnetometer)

อุปกรณ์นี้นำมาทำระบบนำทางหรือใช้เป็นเข็มทิศ ซึ่งมีขดลวดที่ใช้กระตุ้นและขดลวดสำหรับวัดสัญญาณ (Pick-up coil) พันอยู่รอบๆ แกนวัสดุ Ferromagnetic ที่มีสภาพยอมให้แม่เหล็กซึมได้สูง (High-permeability) ผลของมันจะทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณระหว่างจุดอิมตัวสนามแม่เหล็กภายนอกจะเข้าไปรบกวนความสมมาตรของสัญญาณที่แกว่งทำให้เกิดฮาร์มอนิกที่สองขึ้นที่ขดลวดสำหรับวัดสัญญาณ ขนาดของฮาร์มอนิกที่สองจะแปรผันกับสนามแม่เหล็กที่ให้ ซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในช่วง 10^{-10} ถึง 10^{-2} T [19, 20] อุปกรณ์ชนิดนี้มีทั้งแบบขนาดใหญ่ มองเห็นด้วยตาเปล่าได้ (Macroscopic form) และแบบขนาดเล็กที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ [21, 22] อุปกรณ์ชนิดนี้ได้ถูกทำขึ้นในเชิงพาณิชย์โดยใช้กระบวนการสร้างบนเทคโนโลยี CMOS [23]

2.1.3 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบไบอัส (Bias Magnetic Field Sensors)

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ต้องอาศัยการจัดไบอัสให้กับมันด้วย มีการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการเป็นส่วนใหญ่จะใช้แม่เหล็กถาวร หรือขดลวดเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ความเข้มของ Bias magnetic field โดยทั่วไปอยู่ในระดับ mT ซึ่งอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับสนามแม่เหล็กกลุ่มนี้ คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor), แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode), เซนเซอร์แมกนีโต-ออปติคัล (Magneto-optical sensor), เซนเซอร์ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟ (Giant magnetoresistive sensor) และอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall sensor) เป็นต้นซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่นิยมใช้งานมากในอุตสาหกรรม [24-26]

2.1.3.1 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

เป็นทรานซิสเตอร์ที่ถูกสร้างบนเทคโนโลยีซีมอส CMOS [27, 28] ให้มีขั้วคอลเลคเตอร์ (Collector) สองขั้วสนามแม่เหล็กภายนอกจะเหนี่ยวนำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแสคอลเลคเตอร์อันเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ แมกนีโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจจับการเหนี่ยวนำจากแม่เหล็กได้ต่ำถึง 10^{-5} T และต่อมามีการพัฒนาลดข้อด้อยหลักในเรื่อง Offset ของอุปกรณ์ลงมาอย่างมาก [29-31]

2.1.3.2 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

เป็นไดโอดสารกึ่งตัวนำที่มีบริเวณพี (p) และเอ็น (n) ถูกแบ่งแยกกันด้วยบริเวณอินทรินซิก (Intrinsic) หรือซิลิคอนที่ถูกเจือในระดับต่ำ บริเวณอินทรินซิกจะติดอยู่กับพื้นผิวทั้งสองด้านที่มีอัตราการรวมตัวที่พื้นผิวแตกต่างกัน (Surface recombination rate) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดพาหะระดับสูง (High-injection) โดยแรงลอเรนซ์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพนำไฟฟ้า (Modulation of conductivity) ในบริเวณอินทรินซิก โดยทั่วไปแมกนีโตไดโอดถูกสร้างในซิลิคอนที่อยู่บนแซฟไฟร์ [32, 33] แต่อย่างไรก็ตามก็ได้มีการนำเสนอตัวอุปกรณ์ที่สร้างด้วยเทคโนโลยี CMOS ซึ่งมีค่าความไว (Sensitivity) ถึง $25V/T$ [34]

2.1.3.3 แมกนีโต-ออปติคัล (Magneto-optical sensor)

เซนเซอร์แมกนีโต-ออปติคัล (Magneto-optical sensor) โดยการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์โพลาไรเซชันของฟาราเดย์ซึ่งทิศทางการโพลาไรเซชันของแสงจะเปลี่ยนไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุแม่เหล็ก [35]

2.1.3.4 ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟ (Giant magnetoresistive sensor)

ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟ (Giant magnetoresistive sensor) จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่อาจสูงถึง 70% ซึ่งขึ้นกับสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน [36] อุปกรณ์ไจแอนท์แมกนีโตรีซิสทีฟประกอบไปด้วยระบบเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) และนอนเฟอร์โรแมกเนติก (Non-ferromagnetic) แบบหลายชั้น ความต้านทานของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกบางๆ สองแผ่นซึ่งถูกขึ้นด้วยชั้นการนำของนอนเฟอร์โรแมกเนติก สามารถถูกปรับเปลี่ยนโดยการเปลี่ยนแปลงแนวโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) ของชั้นเฟอร์โรแมกเนติกจากที่ขนานกันแบบสวนทิศทาง (Antiparallel) เป็นทิศทางเดียวกันโดยสนามแม่เหล็กภายนอก ชั้นที่มีโมเมนต์แม่เหล็กขนานกันมีความเป็นไปได้ที่จะมีการกระเจิงที่ผิวต่ำ ชั้นพวกนี้จะมีระยะทางก่อนการชน (Mean free path) ที่ยาว ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานลดลง โดยความหนาของชั้นต้องมีค่าน้อยกว่าระยะทางก่อนการชนของอิเล็กตรอนในชั้น ซึ่งน้อยกว่า 10 นาโนเมตร [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ฮอลล์ เป็นเซนเซอร์ที่ใช้หลักการของฮอลล์ [38] นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพราะใช้ตรวจวัดปริมาณสนามแม่เหล็กที่ไม่สูงมากนักมีความเชื่อถือได้สูง มีความง่ายในการใช้งานและสามารถรวมเข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ อุปกรณ์ชนิดนี้เหมาะอย่างยิ่งกับการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรซึ่งอยู่ในช่วงไม่กี่ mT หรือตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยกระแสไฟฟ้า การทำงานของมันอาศัยการเบี่ยงเบนพาหะจากแรงลอเรนซ์ซึ่งทำให้เกิดแรงดันในทิศตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส เพราะฉะนั้นในการใช้งานที่ต้องการความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วง mT เซนเซอร์ฮอลล์คือตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ประสิทธิภาพโดยรวม หลักการโครงสร้างพื้นฐานของฮอลล์ยังนิยมนำไปใช้ในโครงสร้างอื่น ๆ อีกเช่น MAGFET [39-42] Magnetic FinFET (MAGFinFET) [43]

2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device)

2.2.1 ปรากฏการณ์กัลวานแมกเนติก (Galvanomagnetic effect)

ปรากฏการณ์กัลวานแมกเนติกทั้งหมดเกิดจากการที่แรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ในตัวกลาง และแรงลอเรนซ์ก็คือแรงที่กระทำกับอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเราสามารถแสดงได้ดังสมการ

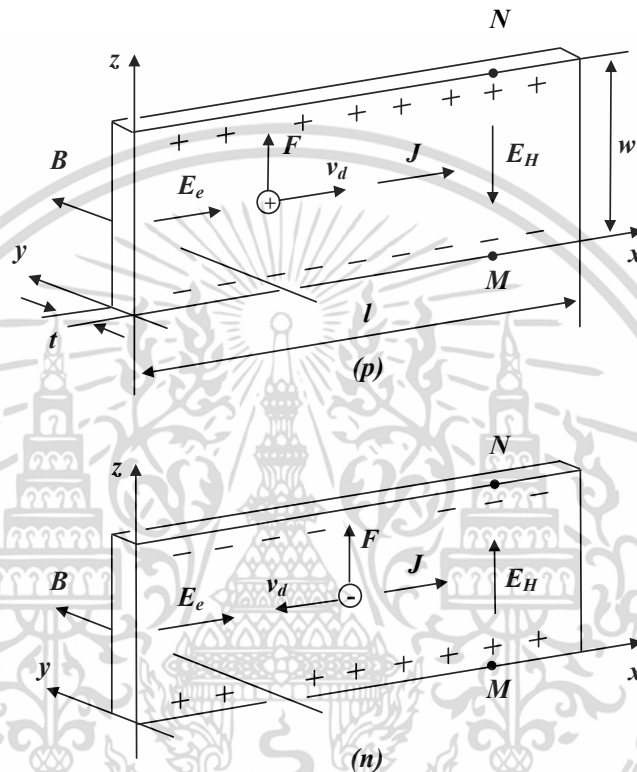
$$F = eE + e[v \times B] \quad (2.1)$$

โดย e คือประจุของอนุภาค (สำหรับอิเล็กตรอน $e = -q$ สำหรับโฮล $e = q$ ซึ่ง q คือขนาดของประจุอิเล็กตรอน), E คือสนามไฟฟ้า, v คือความเร็วของพาหะ และ B คือขนาดของสนามแม่เหล็ก เทอมแรกของฝั่งขวามือจะใช้อ้างถึงแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และเทอมที่สองจะเป็นแรงลอเรนซ์ บางครั้งเราอาจเรียกเทอมทั้งสองว่าส่วนของไฟฟ้าและส่วนของแม่เหล็กตามลำดับ ในการพิจารณาส่วนแม่เหล็กของแรงลอเรนซ์เพื่อที่จะเข้าสู่สมการลอยเลื่อนของพาหะ เราจะประมาณค่าซึ่งประกอบไปด้วยสมมติฐานว่าประจุพาหะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมออันเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าหรือแรงขับอื่นๆ และความเร็วของพาหะทั้งหมดจะมีขนาดเท่ากันและเท่ากับค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ดังนั้นเราจึงสามารถแทนที่ความเร็ว (v) ของอนุภาคแต่ละตัวด้วยความเร็วลอยเลื่อนเฉลี่ยของพาหะทั้งหมด และเราจะไม่พิจารณาการเคลื่อนที่เชิงความร้อน (thermal motion) ของพาหะเพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อพาหะ

2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่ตั้งอยู่ในกลุ่มของปรากฏการณ์กัลวานแมกเนติก ซึ่งถูกค้นพบโดย เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปี ค.ศ. 1879 [44, 45] อุปกรณ์การทดลองของฮอลล์ดั้งเดิมนั้นจะใช้แผ่นตัวนำยาวซึ่งทำมาจากทอง (long gold leaf) ในปัจจุบันจะใช้หลักการของฮอลล์บนเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำโดยมีการพัฒนาออกมาเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย [46, 47]

พิจารณาการเคลื่อนที่ของพาหะในแท่งสารกึ่งตัวนำบางและยาว รูปที่ 2.1 คำว่า “ยาว” ในที่นี้หมายความว่าความยาวของแผ่น l มีค่ามากกว่าความกว้าง w ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเราสามารถละเลยอิทธิพลของขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่แผ่นสารกึ่งตัวนำได้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวโดยส่วนใหญ่จะมีระยะทางที่สั้นจึงส่งผลให้เกิดผลกระทบที่น้อยจนละเลยได้ เราจะให้แผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวถูกกำหนดประเภทเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p อย่างละแผ่น โดยเราจะไม่คิดผลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยในแผ่นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดเพื่อความง่ายต่อการอธิบาย



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n

ในรูปที่ 2.1 E_e คือสนามไฟฟ้าภายนอก, B คือสนามแม่เหล็ก, v_d คือความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ, F คือแรงแม่เหล็ก, J คือความหนาแน่นกระแส, และ E_H สนามไฟฟ้าฮอลล์ แรงแม่เหล็กจะผลักพาหะที่มีประจุลบและบวกไปยังขอบข้างบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ปรากฏระหว่างประจุที่ขอบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ

จากรูปสมมุติว่าให้สนามไฟฟ้าตามแนวแกนเขียนในรูปฟังก์ชัน x ($E_e = E_x, 0, 0$) และสนามแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ ดังนั้นแรงลอเรนซ์ ในสมการ $F = eE + e[v \times B]$ จะมีเพียงเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งคือเทอมแรงทางไฟฟ้า แรงทางไฟฟ้าจะทำให้พาหะที่มีประจุจะลอยเลื่อนไปตามแผ่นในทิศทางที่ตรงข้ามกัน (แกน x และ $-x$ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ) โดยความเร็วลอยเลื่อนนั้นหาได้จาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือสภาพคล่องของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสจะหาได้ด้วย

$$J_p = q\mu_p pE_e \quad J_n = q\mu_n nE_e \quad (2.3)$$

ซึ่ง p และ n แทนความหนาแน่นโฮลและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ

2.2.2.1 สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำในแนวแกน y ตอนนี้พาดที่มีประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทั้งสองส่วน เนื่องจากเราสมมุติให้ความเร็วของพาดทั้งหมดในแผ่นสารกึ่งตัวนำมีค่าสม่ำเสมอ ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อพาดในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p จะเป็น

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

แรงที่เกิดขึ้นกับพาดประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางเดียวกัน เนื่องจาก $e = q$ และ $e = -q$ สำหรับโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นจากการรวมสมการจากด้านบนจะได้ว่า

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

โดยแรงที่เกิดขึ้นกับพาดในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะอยู่ในแกน z จึงสามารถเขียนอยู่ในรูปขนาดของแต่ละแนวแกนเป็น

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

แรงนี้จะผลักพาดไปทางขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความเข้มข้นของพาดที่ขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของพาดที่ขอบด้านล่างจะเริ่มลดลง ด้วยเหตุนี้ความสมดุลของประจุจะถูกรบกวนและทำให้มีสนามไฟฟ้าปรากฏระหว่างขอบด้านบนและด้านล่าง สนามไฟฟ้าที่ปรากฏนั้นดังรูปที่ 2.1 จะกระทำต่อพาดที่กำลังเคลื่อนที่เช่นเดียวกับแรงทางแม่เหล็ก ซึ่งผลจากสนามไฟฟ้าจะผลักพาดไปยังทิศที่จะลดประจุส่วนเกินที่ขอบจนในที่สุดแรงทางไฟฟ้าจะมีค่ามากพอที่จะสมดุลกับแรงทางแม่เหล็ก

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

หลังจากนี้พาหะที่เคลื่อนที่ในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองจะเคลื่อนที่ในแนวขนานกับแกน x ซึ่งเหมือนกับมีแรงทางไฟฟ้าภายนอกกระทำเพียงอย่างเดียว สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส (E_H) ซึ่งถ่วงดุลกับแรงทางแม่เหล็กจะเรียกว่า “สนามไฟฟ้าฮอลล์”

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

จากสมการ $v_{dp} = \mu_p E_e$ และ $v_{dn} = \mu_n E_e$ 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 ส่วนแม่เหล็กของแรงมีแนวโน้มที่จะดันไฟฟ้าไปชิดกับขอบด้านหนึ่งของตัวอย่าง (คำว่า “การดันกระแสไฟฟ้า” หรือ “pressing electricity” เป็นแนวคิดที่ถูกใช้โดยเอ็ดวิน ฮอลล์)

2.2.2.2 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)

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

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

และสำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p จะได้ (ในที่นี้เราจะแสดงเฉพาะขนาดโดยละเลยเครื่องหมายลบไว้และ w หมายถึงความกว้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์และแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปมักจะเรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ ในปรากฏการณ์ฮอลล์ยังมีคุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งนั่นก็คือ มุมฮอลล์

2.2.2.3 มุมฮอลล์ (Hall angle)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง สนามไฟฟ้าลัพท์ที่เกิดในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าว $E = E_e + E_H$ จะไม่ได้อยู่ในแนวแกนเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก E_e ในกรณีปกติกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกจำกัดทิศทางตามสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้ความหนาแน่นกระแสอยู่ในแกนเดียวกับกับสนามไฟฟ้าภายนอกดังในรูปที่ 2.1 เนื่องจากสนามไฟฟ้าลัพท์ไม่ได้มีทิศทางร่วมกับแนวแกนของความหนาแน่นกระแส (แนวแกนของสนามไฟฟ้าภายนอก) ดังนั้นปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวจะแสดงผ่านการเอียงของสนามไฟฟ้าลัพท์ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอกและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง มุมที่เกิดจากการเอียง θ_H จะเรียกว่า “มุมฮอลล์” จากรูปที่ 2.1 สามารถหามุมฮอลล์ได้จาก

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

จากสมการข้างต้นเราสามารถหามุมฮอลล์ได้ตามความสัมพันธ์ของทิศทางสนามไฟฟ้าทั้งหมด นอกจากนี้ยังอาจจะหามุมฮอลล์เป็นมุมเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส J ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าลัพท์ E ตามรูปที่ 2.1 (เนื่องจากความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศทางเดียวกัน) ด้วยสมการ $E_{Hp} = -\mu_p [E \times B]$, $E_{Hn} = \mu_n [E \times B]$ และสมการ $\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E_e|}$ เราสามารถหามุมฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น

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

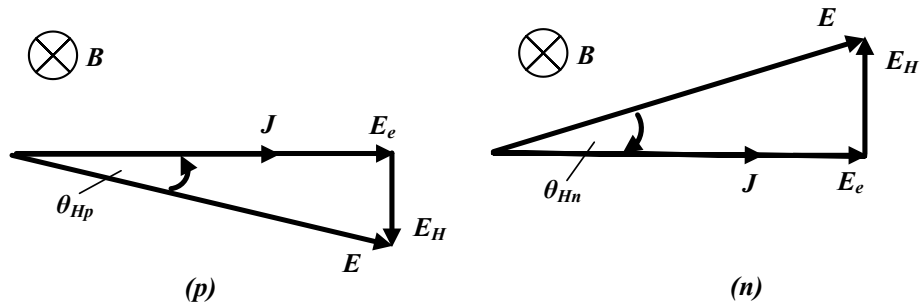
ค่าของมุมฮอลล์จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กและสภาพคล่องของประจุพาหะเท่านั้น เครื่องหมายของมุมฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของประจุพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำ

2.2.2.4 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)

จากสมการ $J_p = q\mu_p pE_e$, $J_n = q\mu_n nE_e$ และสมการ $E_{Hp} = -\mu_p [E \times B]$, $E_{Hn} = \mu_n [E \times B]$ เราสามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าฮอลล์เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาว

จากแผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวชนิด $p(p)$ และชนิด $n(n)$ โดย J คือความหนาแน่นกระแส, E_e สนามไฟฟ้าภายนอก, E_H สนามไฟฟ้าฮอลล์, E สนามไฟฟ้าลัพธ์, และ θ_H คือมุมฮอลล์

จากสมการ $E_{Hp} = -\frac{1}{qp}[J \times B]$, $E_{Hn} = \frac{1}{qn}[J \times B]$ สามารถเขียนใหม่เป็น

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

ซึ่ง R_H คือตัวแปรที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ สมการข้างบนเป็นข้อสรุปจากการทดลองของฮอลล์

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

จากการเทียบสมการ $E_{Hp} = -\frac{1}{qp}[J \times B]$, $E_{Hn} = \frac{1}{qn}[J \times B]$ และ $E_H = -R_H [J \times B]$ เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดเป็น

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

เครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของพาหะข้างมาก และขนาดของสัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรผกผันกับความเข้มข้นของพาหะข้างมาก สำหรับการนำไปใช้จริงนั้น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้โดยอาศัยสมการ

$$V_H = \int_M^N E_H dz \quad \text{และสมการ } E_H = -R_H [J \times B] \quad \text{ได้เป็น}$$

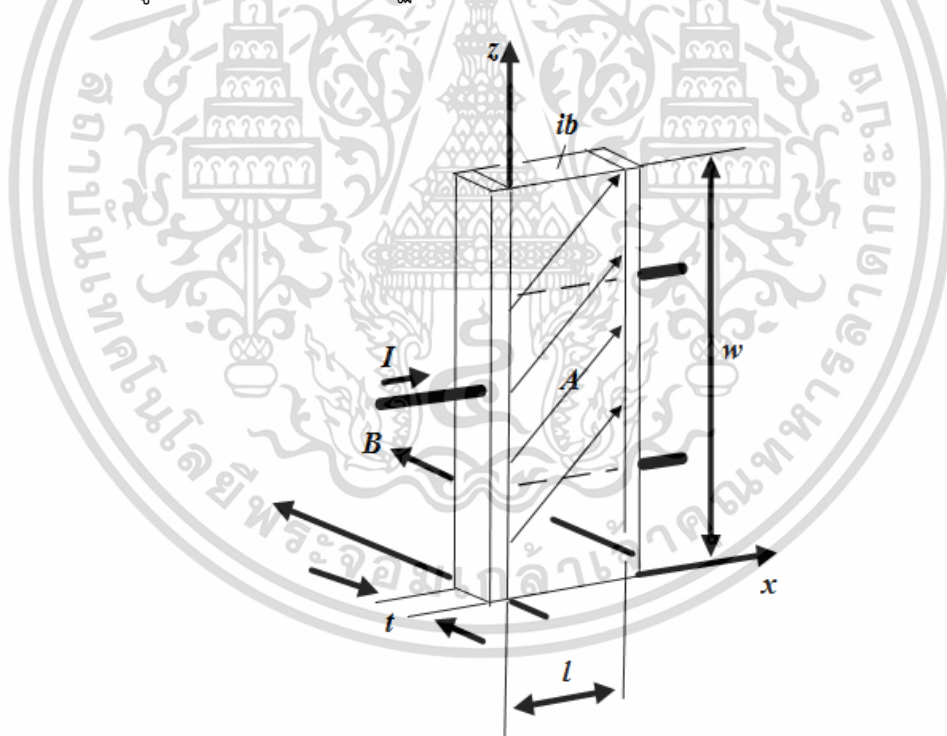
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.2.2.5 ปฏิกิริยาการเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection effect)

พิจารณาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น แผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่างสำหรับการทดลองนี้จะเรียกว่าสั้นก็ต่อเมื่อขนาดตามทิศทางกระแสมีค่าน้อยกว่าขนาดตามทิศทางแรงที่กระทำต่อพาหะ ตัวอย่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นจะแสดงในรูปที่ 2.3 โดยใช้ระบบพิกัดและสัญลักษณ์เหมือนกับรูปที่ 2.1 ด้วยความที่เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น $l \ll w$ ทำให้รูปร่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำคล้ายกับแซนวิชที่ประกบกันระหว่างขั้วไฟฟ้า ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดในรูปแบบซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส



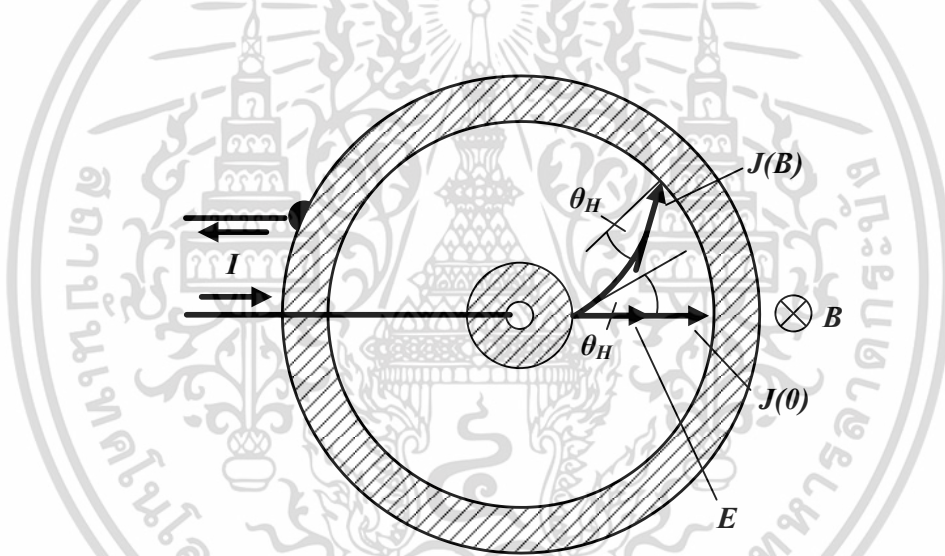
รูปที่ 2.3 แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)

แผ่นคอปีโน (Corbino disc)

เพื่อที่จะเข้าใจลักษณะพิเศษของปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น เราจะพิจารณากรณีพิเศษข้อแรกคือ แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นที่มีรูปร่างเป็นวงแหวนซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 แผ่นดังกล่าวจะถูกเรียกว่า “แผ่นคอปีโน” [48] แผ่นคอปีโนมีลักษณะเป็นแผ่นหรือวงแหวนของวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำ เช่น สารกึ่งตัวนำ ซึ่งถูกติดด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงไว้ที่ตรงศูนย์กลางและรอบๆแผ่น ถ้าทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เส้นศักย์ไฟฟ้า (equipotential line) จะมีจุดร่วมศูนย์กลางเดียวกันและสนามไฟฟ้าจะแผ่ออกตามแนวรัศมี ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก กระแสจะไหลในแผ่นไปตามแนวรัศมีของวงกลม เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับแผ่นกระแสจะเอียงไปเมื่อเทียบกับทิศทางของรัศมีดูรูปที่ 2.4 ในแผ่นคอร์บิโนนั้นจะไม่มีบริเวณขอบที่เป็นฉนวนให้พาหะสามารถสะสมอยู่ได้เหมือนกับกรณีแผ่นสารกึ่งตัวนำยวาก่อนหน้านี้ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะไม่ปรากฏออกมาทำให้ไม่มีตัวไปถ่วงดุลแรงทางแม่เหล็กส่งผลให้พาหะถูกแรงทางแม่เหล็กเบี่ยงเบนเส้นทางจากเส้นทางที่สั้นที่สุด

แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นในรูปที่ 2.3 สามารถมองเป็นแผ่นคอร์บิโนที่มีรัศมีขนาดใหญ่ไม่สิ้นสุด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าส่วนภายในของตัวอย่าง (A) ซึ่งห่างจากขอบที่เป็นฉนวน (ib) ควรจะเหมือนส่วนของแผ่นคอร์บิโนจริงๆ ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นนั้นจะไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นแต่จะมีการเบี่ยงเบนของกระแสเกิดขึ้นแทน



รูปที่ 2.4 แผ่นคอร์บิโน เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำกลมที่มีขั้วหนึ่งขั้วอยู่ตรงกลางและอีกขั้วอยู่ล้อมรอบเส้นรอบวงของแผ่น ในแผ่นคอร์บิโนสนามไฟฟ้า E จะแผ่ตามรัศมีวงกลมโดยไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ส่วนความหนาแน่นกระแส J จะถูกทำให้เอียงตามมุมฮอลล์ θ_H

นอกจากนี้การที่แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ไม่ปรากฏในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นยังสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองวงจรไฟฟ้า ตามแบบจำลองนี้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์จะไม่ปรากฏเพราะแรงเคลื่อนไฟฟ้าทางแม่เหล็ก (magnetic electromotive force) จะถูกลดทวงจรรด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่

การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection)

ตอนนี้เราจะมาหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส เรา จะใช้การประมาณค่าที่พูดไปก่อนหน้านี้อีกครั้งนั่นคือ เราจะไม่สนใจการเคลื่อนที่เชิงความร้อนของ พาหะและสมมุติว่าพาหะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอภายใต้การกระทำของแรงลอเรนซ์ สมการ $F = eE + e[v \times B]$ 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 ในสมการด้านล่าง เทียบเท่ากับแรงทางไฟฟ้า qE_p และ $-qE_n$ ได้เป็น

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

พาหะจะลอยเลื่อนเนื่องจากสนามไฟฟ้าสมมูล (equivalent electric field) E_p และ E_n ในทิศทาง เดียวกับที่แรงลอเรนซ์กระทำ เมื่อนำ $\mu_p p$ และ $-\mu_n n$ คูณทั้งสองสมการด้านบน

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

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

ซึ่ง $J_p(B)$ และ $J_n(B)$ คือความหนาแน่นกระแสโฮลและอิเล็กตรอนในกรณีที่มีสนามแม่เหล็ก B ตัดผ่านตามลำดับ

$$J_p(B) = q\mu_p pE_p = \mu_p pF_p = qp v_p \quad (2.22)$$

$$J_n(B) = q\mu_n nE_n = \mu_n nF_n = -qn v_n$$

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

$$J_p(0) = q\mu_p pE \quad J_n(0) = q\mu_n nE \quad (2.23)$$

จากสามสมการด้านบนจะแสดงออกมาเป็นแผนภาพในรูปที่ 2.5 ทิศทางของเวกเตอร์ E และ B จะสอดคล้องกับ

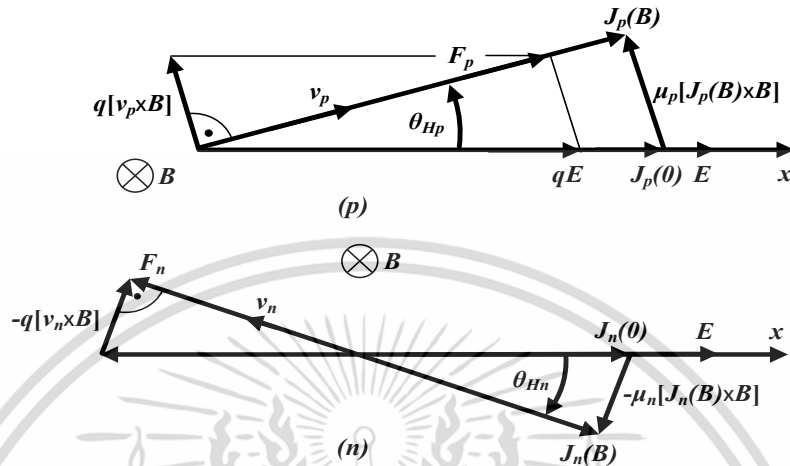
รูปที่ 2.2 ซึ่งสนามไฟฟ้าภายนอก E จะมีทิศทางตามแนวแกน x สนามแม่เหล็กมีทิศในแนวแกน y

และสมมุติว่าสนามไฟฟ้าภายนอกและสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ คุณสมบัติที่สำคัญของแผนภาพในรูปที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คือเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าภายนอก E และความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้น $J_p(B)$ และ $J_n(B)$ จะไม่ได้อยู่ร่วมแกนเดียวกัน สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานแม่เหล็กจะเบี่ยงเบนกระแสจากเส้นทางปกติตามสนามไฟฟ้า

มุมฮอลล์ (Hall angle)



รูปที่ 2.5 แผนภาพสมการเวกเตอร์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานกึ่งตัวชนิด p (p) และ n (n)

ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานปรากฏการณ์ฮอลล์จะแสดงออกมาในรูปการเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส $J(B)$ จากสนามไฟฟ้าภายนอก E มุมของการเบี่ยงเบนคือมุมฮอลล์ θ_H

ในกรณีเงื่อนไขวิกฤตของแผ่นคอร์บีโนจะไม่มีสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นเลยและสนามไฟฟ้าภายนอกจะเป็นสนามไฟฟ้าลัทธิ ดังนั้นมุมฮอลล์ก็คือมุมการเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแสเทียบกับทิศของสนามไฟฟ้าลัทธิในแผ่นตัวอย่าง ค่าจำกัดความของมุมฮอลล์จะเหมือนกับที่เสนอไว้ก่อนหน้า

หน้า $\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E_e|}$ ยิ่งไปกว่านั้นด้วยการใช้แผนภาพในรูปที่ 2.5 เราจะได้

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

ความสัมพันธ์ที่กำหนดค่าและเครื่องหมายของมุมฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวและสั้นจะเหมือนกัน

$$\text{ดังเช่นสมการ } \tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E_e|} \text{ และสมการ } \tan \theta_{Hp} = \mu_p B_{\perp}, \tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_{\perp}$$

โปรดสังเกตว่าในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐาน เราจะได้กล่าวถึงความหนาของแผ่น t ในรูปที่ 2.3 นั้นหมายความว่าไม่เหมือนกรณีของปรากฏการณ์ฮอลล์ธรรมดา อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสอาจไม่จำเป็นต้องเป็นแผ่นบางเสมอไป แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่มีความบางจะทำให้มีค่าความต้านทานสูงและทำให้ต้องการกระแสในการทำงานต่ำ ด้วยเหตุผลนี้รูปร่างที่คล้ายกับแผ่นยังคงเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่อาศัยการเบี่ยงเบนของ

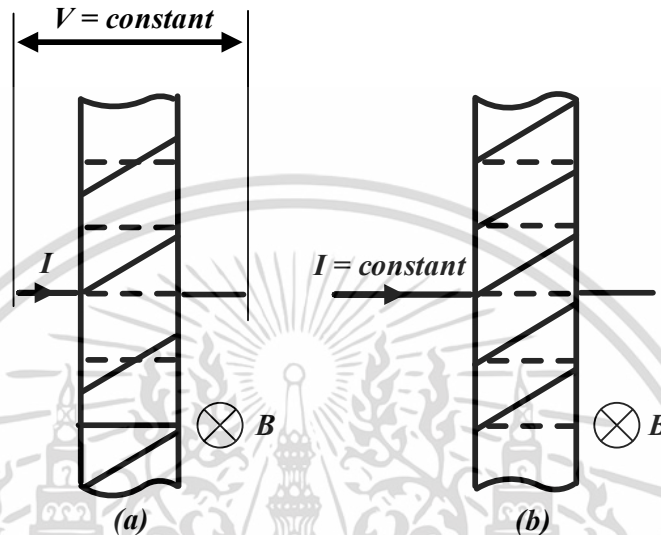
กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.6 ปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance effect)

จากแผนภาพในรูปที่ 2.5 เราจะสังเกตเห็นว่าเวกเตอร์ความหนาแน่นกระแส $J(B)$ จะมีขนาดน้อยกว่า $J(0)$ นั้นหมายความว่าในแผ่นสารกึ่งตัวนำแบบสัณฐานแม่เหล็กยังทำให้เกิดปรากฏการณ์เพิ่มเติม โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทำให้ความหนาแน่นกระแสลดลง



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานแม่เหล็กที่ถูกป้อนด้วย (a) แรงดันคงที่ และ (b) กระแสคงที่ เส้นประคือเส้นกระแสที่ $B = 0$ เส้นทึบคือเส้นกระแสที่ $B \neq 0$

ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานแม่เหล็กที่ถูกป้อนด้วยแรงดันคงที่จะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6 (a) และในแผ่นสารกึ่งตัวนำสัณฐานแม่เหล็กที่ถูกป้อนด้วยกระแสคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (b) ความหนาแน่นกระแสเมื่อมีสนามแม่เหล็กจะน้อยกว่าตอนที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก การลดทอนความหนาแน่นกระแสเป็นผลมาจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส โดยเส้นกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนระหว่างขั้วไฟฟ้าของแผ่นตัวอย่างจะยาวขึ้น ด้วยเส้นทางการเดินกระแสที่ยาวขึ้น นั้นหมายความว่า มันจะส่งผลให้ความต้านทานของแผ่นตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับแผ่นตัวอย่างที่ถูกไบอัสด้วยแรงดันคงที่ เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านแผ่นตัวอย่างลดลง ในขณะที่แผ่นตัวอย่างที่ถูกไบอัสด้วยกระแสคงที่จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมแผ่นตัวอย่างสูงขึ้น

เพื่อที่จะหาว่าความหนาแน่นกระแสลดลงไปเนื่องจากสนามแม่เหล็ก เราจะหาผลเฉลยของสมการ $J_p(B) = J_p(0) + \mu_p [J_p(B) \times B]$, $J_n(B) = J_n(0) - \mu_n [J_n(B) \times B]$ สำหรับสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉาก $E \cdot B = 0$ ผลเฉลยของสมการจะเป็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ได้ทราบความสัมพันธ์ σ_B จากสมการด้านบน ใช้สำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น เนื่องจากเราพิจารณาแผ่นกึ่งตัวนำสั้นโดยนำมาจากส่วนของแผ่นคอร์บิโน ดังนั้นเราจะเรียกสัมประสิทธิ์ σ_B ว่าสภาพนำไฟฟ้าของคอร์บิโน (Corbino conductivity)

จากสองสมการด้านบน 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 “ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์” การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในแผ่นตัวอย่างสั้นจะถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์แมกนีโตรีซิสแตนซ์เชิงเรขาคณิต (geometrical magnetoresistance effect)” คำว่าเชิงเรขาคณิตสะท้อนถึงความจริงที่ว่าปรากฏการณ์เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของเส้นกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.6

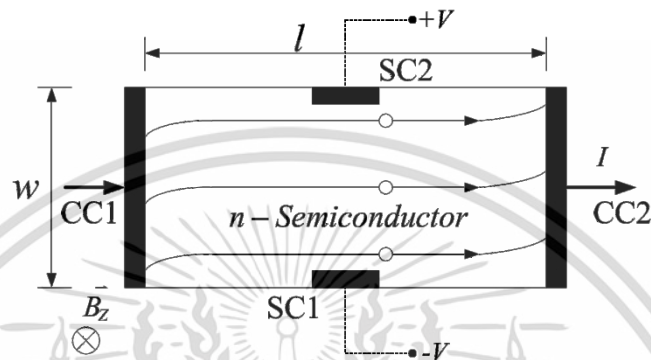
2.2.2.7 โครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

โครงสร้างฮอลล์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ถูกพัฒนาบนเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำจะนำแนวคิดมาจากแผ่นตัวนำที่ใช้ในการทดลองของฮอลล์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของฮอลล์จะตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศที่ตั้งฉากกับพื้นผิวและให้กำเนิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในแนวราบที่ขนานกับพื้นผิว เราจึงอาจเรียกอุปกรณ์ที่มีลักษณะแบบนี้ว่า Hall-plate หรืออุปกรณ์ฮอลล์แนวราบ (Horizontal Hall Device หรือ Lateral Hall Device) [49, 50] โดยมองที่ทิศทางการวิ่งของกระแส ลักษณะโครงสร้างของตัวอุปกรณ์จะถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายแผ่นของตัวนำบาง ซึ่งอาจสร้างด้วยการยิงฝังประจุ การแพร่สารเจือหรืออาจใช้ฐานรองเป็นตัวอุปกรณ์โดยตรง แต่สำหรับการสร้างบนเทคโนโลยี CMOS จะนิยมสร้างเป็นบ่อ (well) ด้วยการยิงฝังประจุหรือการแพร่ เพราะสามารถควบคุมบริเวณทำงาน (active area) ของตัวอุปกรณ์ได้ ตัวอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยขั้ว 4 ขั้วที่ถูกสร้างลงบนบ่อ แต่ละขั้วจะถูกเจือด้วยความเข้มข้นสูงเพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก ตำแหน่งของขั้วจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้ว CC1 และ CC2 จะใช้สำหรับการไปอัสกระแสเรียกว่า “ขั้วกระแส” (current contact) ส่วนขั้ว SC1 และ SC2 จะใช้สำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เรียกว่า “ขั้วรับรู้” (sense contact) มีระยะความกว้างเท่ากับ w มีระยะความยาวเท่ากับ l การสร้างอุปกรณ์ฮอลล์บนเทคโนโลยี CMOS โดยส่วนใหญ่จะสร้างลงบนฐานรองชนิด p เนื่องจากการสร้างตัวอุปกรณ์ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n มีข้อดีก็คือ สารกึ่งตัวนำชนิด n มีสภาพคล่องของพาหะที่สูงกว่าชนิด p ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าฮอลล์



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบและโครงสร้างอุปกรณ์ฮอลล์

ตัวประกอบโครงสร้าง (Geometrical correction factor)

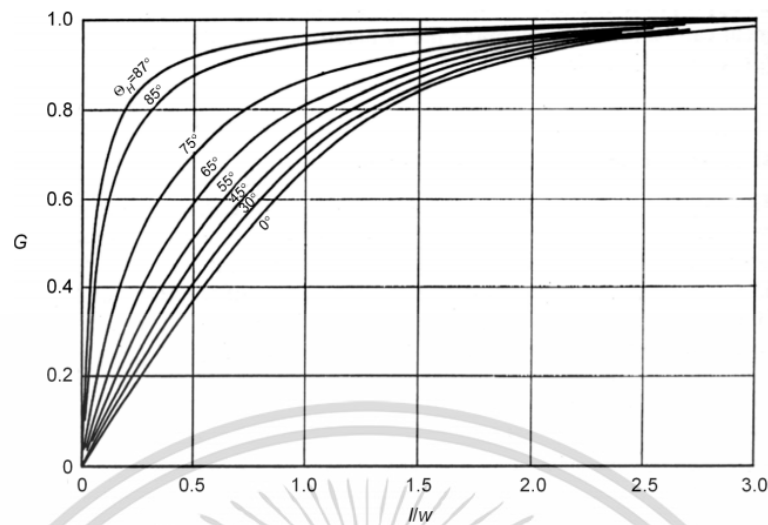
รูปร่างของตัวอุปกรณ์ยังสามารถออกแบบให้มีรูปร่างที่ต่างกันออกไปเพื่อให้ได้ความไวการตอบสนองที่ดีที่สุด [51] สำหรับแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์ฮอลล์ แต่เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างที่อาจทำให้ลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์มีความแตกต่างกัน เพื่อความถูกต้องเราจะกำหนดตัวแปรขึ้นมาเพิ่มอีกตัวเรียกว่าตัวประกอบโครงสร้าง “Geometrical correction factor” (G) ดังนั้นจะได้

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

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

สำหรับตัวประกอบโครงสร้าง Geometrical factor ของโครงสร้างฮอลล์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมได้ถูกคำนวณโดย Lippmann และ Khurt [52] และ Haeusler [53] ด้วยวิธีการ conformal mapping ซึ่งได้ผลแสดงดังรูปที่ 2.8 เราจะสมมุติว่าขั้วรับรู้มีขนาดเล็กมากและวางอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขั้วกระแสทั้งสอง ซึ่งตัวประกอบโครงสร้างจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับอัตราส่วนความยาว (l) ต่อความกว้าง (w) และมุมฮอลล์ (θ_H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ตัวประกอบโครงสร้างของแผ่นฮอลล์สี่เหลี่ยม

สำหรับแผ่นฮอลล์หรืออุปกรณ์ฮอลล์ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและมีขั้วรับรู้อยู่ที่เล็กมากเราสามารถประมาณค่าตัวประกอบโครงสร้างได้จาก

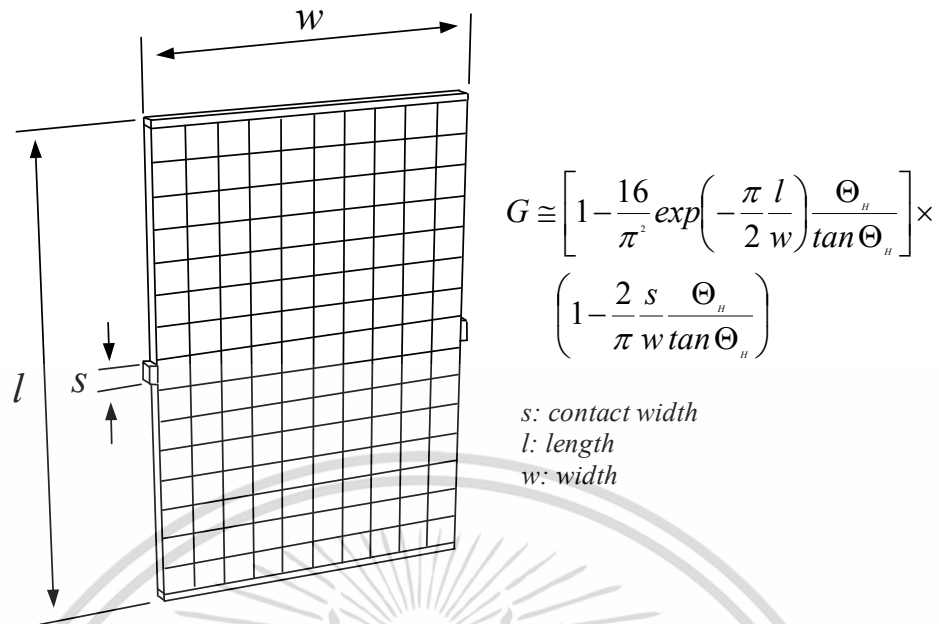
$$G \cong 1 - \frac{16}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi l}{2w}\right) \left[1 - \frac{8}{9} \exp\left(-\frac{\pi l}{2w}\right)\right] \left(1 - \frac{\theta_H^2}{3}\right) \quad (2.29)$$

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

พิจารณาจากรูปที่ 2.9 สำหรับแผ่นฮอลล์ที่ค่อนข้างยาว $l/w > 1.5$ และมีขนาดขั้วรับรู้อยู่ที่เล็ก $s/w < 0.18$ s คือความกว้างของขั้วรับรู้อยู่ ค่าตัวประกอบโครงสร้างของอุปกรณ์จะเข้าใกล้ 1 เมื่ออัตราส่วน $l/w > 3$ และ $s/w < 20$ [53]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตัวประกอบโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม

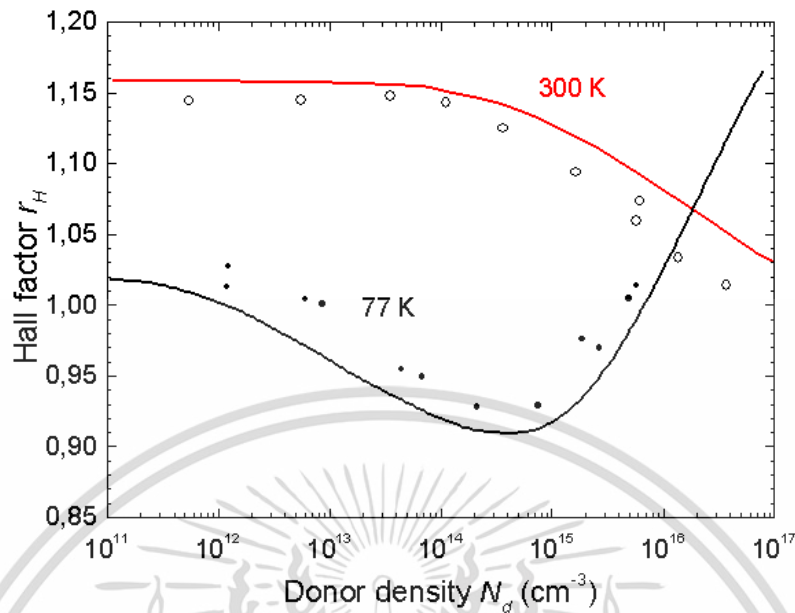
ดังที่กล่าวมาเราจะไม่ได้พูดถึงการกระเจิงเนื่องจากการชนของพาหะ เพื่อให้สมการเข้าใจค่าความจริงมากยิ่งขึ้นเราจะทำการเพิ่มตัวแปรที่ขึ้นกับการชนของพาหะเรียกว่า “Hall scattering factor หรือ Hall factor” (r_H) เข้าไปดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ $V_H = G \frac{R_H}{t} IB_{\perp}$ ใหม่โดย

อาศัยความสัมพันธ์ตามสมการ $R_{Hp} = \frac{1}{qp}$, $R_{Hn} = -\frac{1}{qn}$ ได้เป็น

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

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

ตัวประกอบฮอลล์ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือผู้ให้ในสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่อุณหภูมิห้องจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10 [54] โดยเส้นทึบคือผลจากการคำนวณส่วนสัญลักษณ์จุดและวงกลมคือผลที่ได้จากการทดลอง

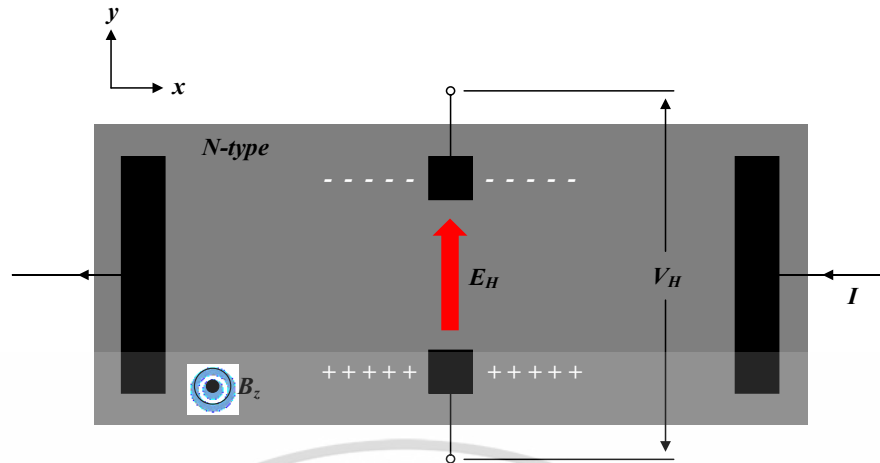


รูปที่ 2.10 ตัวประกอบโครงสร้างของฮอลล์ที่ขึ้นกับความเข้มข้นอะตอมของสารเจือผู้ให้

นอกจากอุปกรณ์ฮอลล์แนวราบที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวแกนที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์แล้วยังมีการพัฒนาอุปกรณ์ฮอลล์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในแนวแกนที่สนามแม่เหล็กขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ เรียกว่า “อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง” (Vertical Hall Device) ซึ่งถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย R.S. Popovic [55-57] แต่ไม่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ฮอลล์ถึงแม้จะมีปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสและปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์เกิดขึ้น แต่ด้วยการออกแบบให้อุปกรณ์มีความยาวมากกว่าความกว้างเพื่อตอบสนองต่อปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ดีและมีขั้วกระแสที่เข้าและออกเพียงสองขั้วจึงทำให้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสไม่สามารถนำมาใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ถ้าจะใช้งานจะต้องออกแบบให้มีขั้วตรวจวัดมากกว่าหนึ่ง ส่วนปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์เนื่องจากอุปกรณ์ไม่ได้ออกแบบมาให้มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานและเพื่อทำให้กระแสสำหรับปรากฏการณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอ เราไปฮัสอุปกรณ์ด้วยกระแสคงที่ดังนั้นอุปกรณ์ฮอลล์จึงมีเฉพาะปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เด่นชัดกว่าปรากฏการณ์อื่น แต่ถ้าต้องการใช้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแสก็ต้องออกแบบให้มีโครงสร้างสอดคล้องกัน เช่นเดียวกับปรากฏการณ์แมกนีโตริซิสแตนซ์ในการใช้งานก็ต้องมีวงจรวัดที่เหมาะสมสอดคล้องกับหลักการทำงานที่เซนเซอร์จะวัดความเปลี่ยนแปลงของความต้านทานอันเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

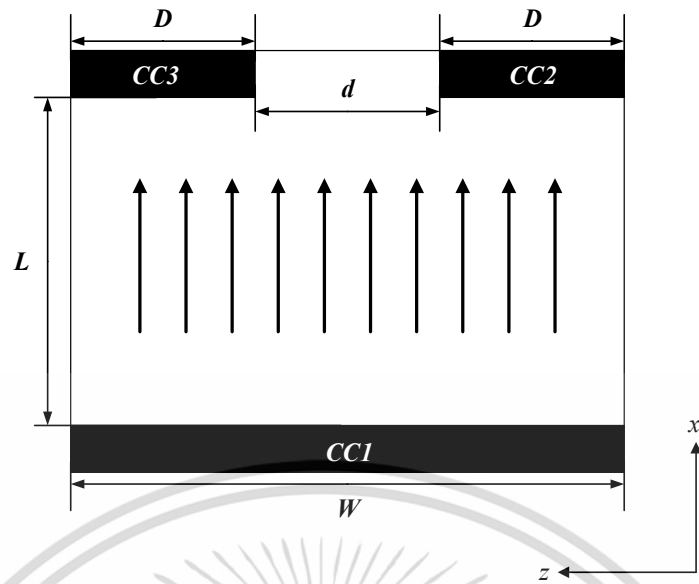
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



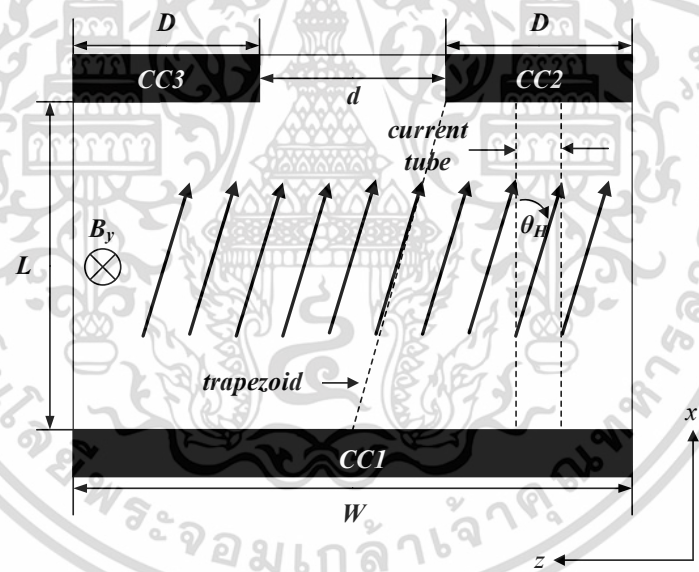
รูปที่ 2.11 ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดบนอุปกรณ์ฮอลล์

2.2.2.8 การคำนวณการเบี่ยงเบนท่อกระแส

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส ตัวอุปกรณ์มักจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมือนแผ่นฮอลล์แบบสี่เหลี่ยมและมีขั้วกระแสอย่างน้อย 3 ขั้ว ดังรูปที่ 2.12 เพื่อที่จะบ่อนกระแสให้ขั้วหนึ่งและอีกสองขั้วใช้สำหรับวัดความแตกต่างของกระแสที่ออกมาจากขั้วทั้งสอง โดยตัวอุปกรณ์ประเภทนี้สามารถพิจารณาการเกิดความแตกต่างของกระแสได้ตามรูปที่ 2.12 ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กกระแสจะแบ่งไหลไปยังขั้วทั้งสองฝั่งเท่า ๆ กันและรูปที่ 2.13 เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาบรรจบกัน สนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะทำให้พาหะมีเส้นทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะหรือการเบี่ยงเบนของพาหะจะทำให้เกิดมุมการเบี่ยงเบนหรือมุมฮอลล์เกิดขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการ $\tan \theta_{Hp} = \mu_p B_{\perp}$, $\tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_{\perp}$ เพื่อความง่ายในการพิจารณาความแตกต่างของกระแส (ΔI) เราอาจประมาณค่ากระแสจากท่อกระแสเล็ก ๆ (current tube) ตามรูปที่ 2.14

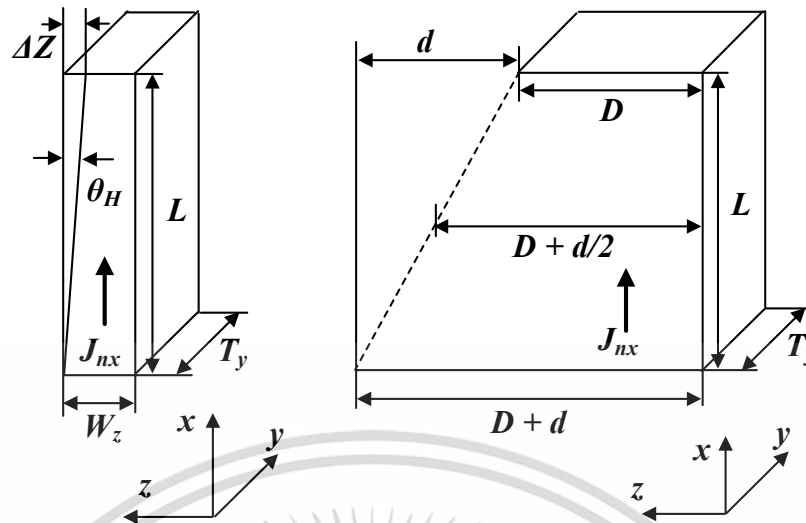


รูปที่ 2.12 อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็กขณะ
ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสในการตรวจจับสนามแม่เหล็กขณะมี
สนามแม่เหล็กตัดผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ท่อกระแสและท่อกระแสที่ถูกเบี่ยงเบนที่เป็นไปได้ทั้งหมด (รูปสี่เหลี่ยมคางหมู)

ท่อกระแสตามรูปที่ 2.14 จะถูกประมาณว่ามีอิเล็กตรอนไหลจากฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่ง และมีความหนาแน่นกระแสที่ไหลในท่อคงที่และสม่ำเสมอ โดยความหนาแน่นกระแสภายในท่อคือ J_{nx} ความกว้างของท่อกระแสคือ W_z ความหนาของช่องทางเดินกระแสคือ T_y และ L คือความยาวช่องทางเดินกระแส เราจะอนุมานว่าด้านที่มีสองขั้วมีระยะห่างระหว่างขั้ว $d \ll W$ กระแสที่ไหลในท่อกระแสขณะไม่มีสนามแม่เหล็กสำหรับฝั่งขั้ว CC2 สามารถเขียนได้เป็น

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

เพื่อหาความแตกต่างของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็ก การไหลของกระแสจะถูกเบี่ยงเบนด้วยมุม θ_H ตามสมการ

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

การเปลี่ยนแปลงของกระแสในท่อกระแสเนื่องจากการเบี่ยงเบนของกระแสสามารถคำนวณได้จาก

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

จากสองสมการด้านบนเราจะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสมการ $I_{2,0} = J_{nx,2} T_y W_{z,2}$ และ $\Delta I_2 = J_{nx,2} T_y \mu B_y L$ เราสามารถแทน $J_{nx,2}$ เป็นฟังก์ชันของ $I_{2,0}$ ได้เป็น

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

จากสมการด้านบน สามารถทำให้ครอบคลุมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoid) ซึ่งเป็นความกว้างของท่อกระแสที่เป็นไปได้ทั้งหมด ด้วย $W_{z,CC0} = D + d/2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็ก B_y ของขั้ว CC2 สามารถเขียนเป็น

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

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

เพราะฉะนั้นผลของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก B_y ทั้งหมดคือ

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

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

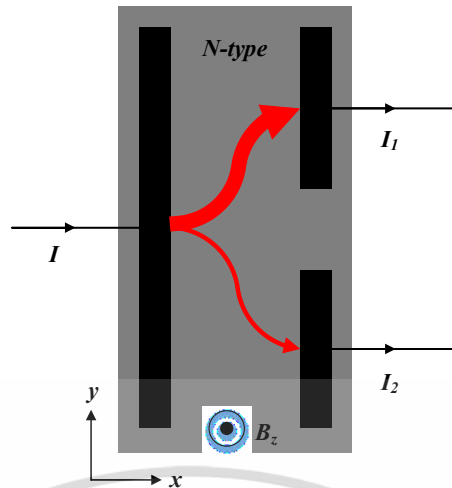
ที่ $B_y = 0$ กระแส $I_{CC2,0} = I_{CC3,0}$ ดังนั้นกระแสทั้งหมดจะเท่ากับ

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

จากสมการที่กล่าวมาสามารถระบุความแตกต่างของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็ก B_y ได้โดย

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

ตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแสไปใช้งานดังรูปที่ 2.15 โดยสร้างบนวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีขั้วกระแสเข้าหนึ่งขั้ว / มีขั้วกระแสออกสองขั้วเพื่อใช้วัดความแตกต่างของกระแส I_1 และ I_2 ไปใช้หาความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแส

2.2.2.9 ความไว (Sensitivity)

ความไว หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เราสามารถระบุความไว (Sensitivity) ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันได้ตามสมการ ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก คือค่าที่บอกความสามารถของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไปเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตได้มากน้อยแค่ไหน

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

ในกรณีที่เราไปอัสอุปกรณ์ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่จะทำให้เราสามารถระบุความไวที่สัมพันธ์กับกระแสที่ไบอัส (current-related sensitivity) ได้ตามสมการ

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

หรือในกรณีที่ไบอัสอุปกรณ์ด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ เราสามารถระบุความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันเป็น

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

หากวัดความไวการตอบสนองของอุปกรณ์ฮอลล์ในโหมดกระแสเราอาจจะระบุความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรืออาจรระบุในรูปแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการนำตัวต้านทานไปต่อที่ขั้วกระแสที่ถูกแบ่งออกเป็นสองขั้ว (CC2 และ CC3) แล้ววัดผลต่างของแรงดันที่เกิดจากความแตกต่างกระแส

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

ดังนั้นความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโหมดกระแสที่สัมพันธ์กับกระแสไปฮัสสามารถระบุได้ตามสมการ

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

และความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันสามารถระบุได้ตามสมการ

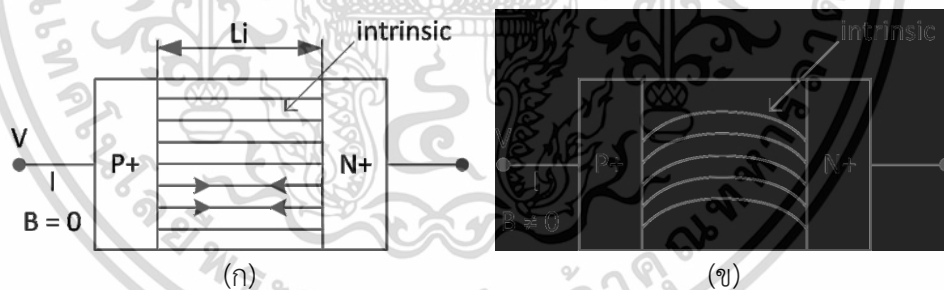
$$S_{\Delta V} = \frac{\Delta I}{V(\Delta B)} \quad [A / VT] \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบไดโอด โดยอาศัยปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์คือ ปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode effect) หรือปรากฏการณ์แมกนีโตคอนเซนเตรชัน (Magneto concentration effect) ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย Stafeev ในปี 1958 [44] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันกับปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ที่ถูกค้นพบโดย Edwin Hall แมกนีโตไดโอดแบบดั้งเดิมนั้นจะมีโครงสร้างแบบ pin diode

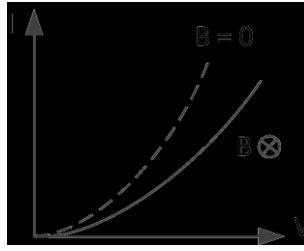
ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของไดโอดสามารถแบ่งได้เป็นสองกรณีรวมกันคือปรากฏการณ์แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode effect) กับปริมาณการรวมตัวใหม่ (Recombination) โดยกรณีที่ใช้โครงสร้างแบบ pin diode มีความยาวของ quasi intrinsic น้อยกว่าระยะการแพร่ของพาหะ $L_i < L_n$ หรือ $L_i < L_p$ โดยที่ L_i คือความยาวของชั้นอินทรินซิก, L_n คือ ระยะการแพร่ของพาหะอิเล็กตรอน และ L_p คือ ระยะการแพร่ของพาหะโฮล ในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง (Forward bias) พาหะถูกฉีดไปที่ชั้น intrinsic และมีการรวมตัวใหม่ที่ชั้น intrinsic รูปที่ 2.16 แสดงความหนาแน่นพาหะของกระแสไฟฟ้าในไดโอด ทิศทางของกระแสไฟฟ้าจะเป็นเส้นตรงในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.16 (ก) และรูปที่ 2.16 (ข) แสดงการตัดผ่านของสนามแม่เหล็กเป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปบริเวณด้านขอบบนของอุปกรณ์ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้า จึงทำให้สามารถตรวจจับปริมาณสนามแม่เหล็กได้



รูปที่ 2.16 ทิศทางกระแสไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่ (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

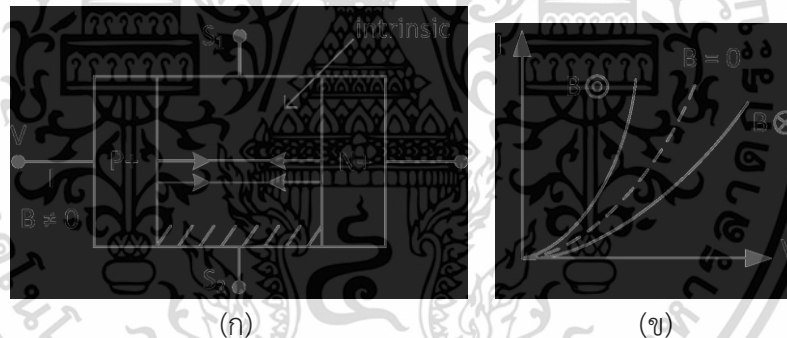
หรืออาจจะมองในอีกแง่หนึ่งผลจากสนามแม่เหล็กจะเสมือนเปลี่ยนแปลงจากไดโอดสั้น (Short diode) ไปเป็นไดโอดที่มีระยะรอยต่อยาว (longer diode) สนามแม่เหล็กนั้นทำให้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ลดลงดัง รูปที่ 2.17 แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีและไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน กระแสของไดโอดลดลงขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านเนื่องจากระดับการฉีดพาหะที่ลดลงและค่าความต้านทานที่สูงขึ้นที่ชั้นอินทรินซิก แต่ในกรณีที่สนามแม่เหล็กกลับทิศทางแมกนีโตไดโอดไม่สามารถตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดกับปริมาณการรวมตัวใหม่

ต่อมาจึงมีการพัฒนาให้สามารถตรวจจับข้อของสนามแม่เหล็กหรือทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ โดยอาศัยการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (Surface recombination) ทำในโครงสร้างของ pin diode ที่มีความยาวชั้นอินทรีนซิกน้อยกว่าระยะการแพร่ของพาหะ มีการเพิ่มชั้น S_1 และ S_2 เพื่อวัดความแตกต่างของรวมตัวใหม่ที่พื้นผิวในด้านตรงข้ามในทิศตัดขวางของรอยต่อแสดงดังรูปที่ 2.18 (ก) และรูปที่ 2.18 (ข) แสดงคุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอด ถ้าพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปรวมตัวใหม่ที่บริเวณพื้นผิวด้าน S_2 กระแสไฟฟ้าจะลดลง แต่ถ้าพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปรวมตัวใหม่ที่บริเวณพื้นผิวด้าน S_1 กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้น ดังนั้นแมกนีโตไดโอดสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ตรงข้ามกันได้ทำให้ทราบทั้งทิศทางและขนาดของสนามแม่เหล็ก

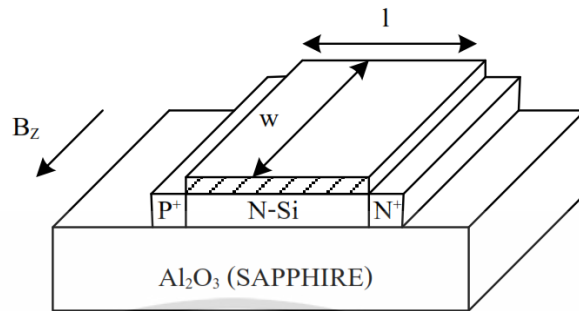


รูปที่ 2.18 กลไกของแมกนีโตไดโอดกับการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (ก) โครงสร้างของ pin diode (ข) คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

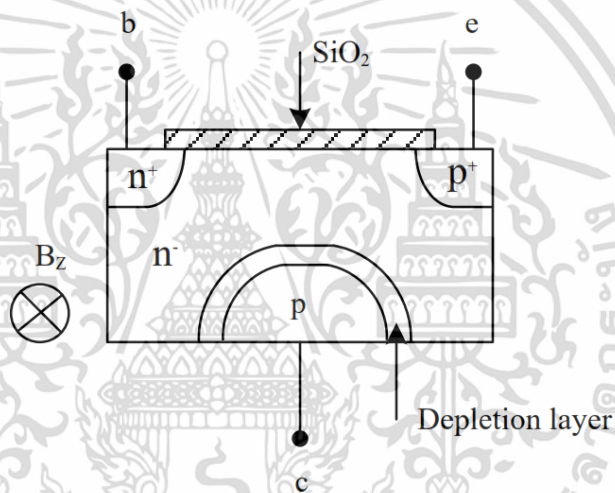
แมกนีโตไดโอดซิลิคอนบนแซปไฟร์ SOS (Silicon-On-Sapphire) รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดซิลิคอนบนแซปไฟร์ ด้วยเทคโนโลยีของวงจรรวม การสร้างรอยต่อ Silicon-Sapphire เป็นการสร้างกลไกการรวมตัวใหม่ระดับสูง แต่ข้อเสียของการสร้างแมกนีโตไดโอดซิลิคอนบนแซปไฟร์ เช่น การสร้าง $\text{Si-Al}_2\text{O}_3$ จะเกิดขึ้นได้ยากในบริเวณผิวหน้า ทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ค่าสูง ๆ ไม่เป็นเชิงเส้น และที่สำคัญอุปกรณ์จะแปรผันกับอุณหภูมิ การสร้างแมกนีโตไดโอดซิลิคอนบนแซปไฟร์ สามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานบนวงจรรวม เช่น CMOS โดยแสดงดังรูปที่ 2.20 โครงสร้างนี้เหมือนกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับไบอัสย้อนกลับที่รอยต่อพีเอ็นกลายเป็นอัตรการรวมตัวที่ผิวหน้าของแมกนีโตไดโอดซิลิคอนบนแซปไฟร์ (Magnetodiode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOS) สนามแม่เหล็กทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปจากคอลเลคเตอร์ ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์เปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันที่รอยต่อเบสอิมิตเตอร์เกิดขึ้น [58]



รูปที่ 2.19 แมกนีโตไดโอดโครงสร้าง SOS



รูปที่ 2.20 แมกนีโตไดโอดโครงสร้าง CMOS

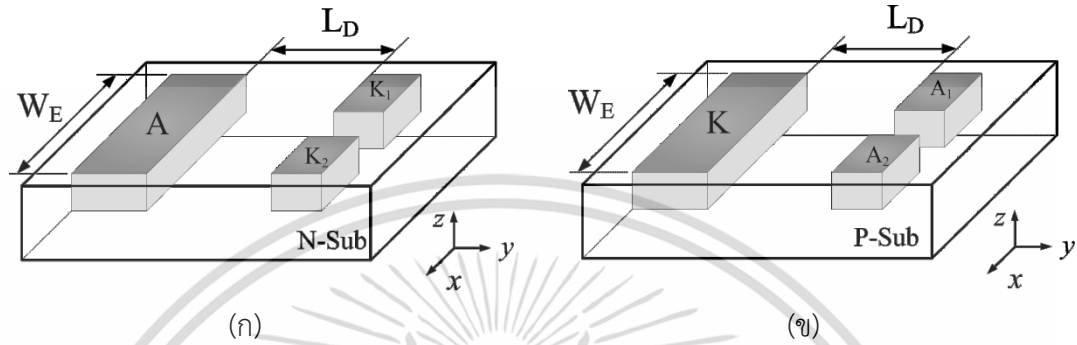
2.4 แมกนีโตไดโอดแบบคู่ (Dual magnetodiode)

เมื่อพบปัญหาของแมกนีโตไดโอดแบบดั้งเดิม ทั้งการสร้างที่ควบคุมเงื่อนไขและปัจจัยต่าง ๆ ทำได้ยาก ความไม่เป็นเชิงเส้นในการวัดสนามแม่เหล็ก ความไม่สมมาตรในการวัดตามทิศทาง สนามแม่เหล็กที่ตรงกันข้ามจึงเกิดการพัฒนามาเป็นแมกนีโตไดโอดแบบคู่

2.4.1 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่

แมกนีโตไดโอดแบบคู่ (Dual Magnetodiode) มีโครงสร้างแบบเดียวกับไดโอด สามารถสร้างได้ทั้งชนิดแคโทดคู่และชนิดแอโนดคู่ โดยมีโครงสร้างที่ตรงกันข้ามกัน จากรูปที่ 2.21 (ก) จะเป็นโครงสร้างแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ซึ่งเป็นรอยต่อชนิดพี - เอ็น (p-n junction) ซึ่งประกอบด้วย แอโนด (p+) และแคโทด (n+) สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น (N - Substrate) เกิดเป็นคุณสมบัติของรอยต่อชนิดพี - เอ็น ที่ขั้วแอโนด และรอยต่อแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) ที่ขั้วแคโทด และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.21 (ข) จะเป็นโครงสร้างแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแอนโนดคู่ซึ่งประกอบด้วย แคโทด (n+) และ แอนโนด (p+) สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น (P - Substrate) เกิดเป็นคุณสมบัติของรอยต่อชนิดพี - เอ็น ที่ขั้วแคโทด และรอยต่อแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) ที่ขั้วแอนโนด ทั้งสองโครงสร้างมีความกว้างพื้นที่ของการฉีดพาหะ เท่ากับ W_E และมีระยะการเบี่ยงเบนพาหะ (Deflection Length) มีค่าเท่ากับ L_D รูปที่ 2.22 แสดงสัญลักษณ์แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ (ก) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอนโนดคู่



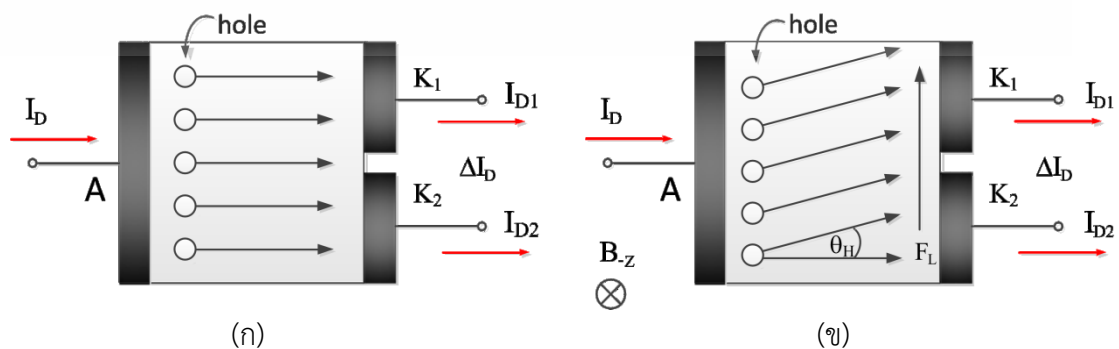
รูปที่ 2.21 โครงสร้างแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ (ก) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอนโนดคู่



รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ (ก) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอนโนดคู่

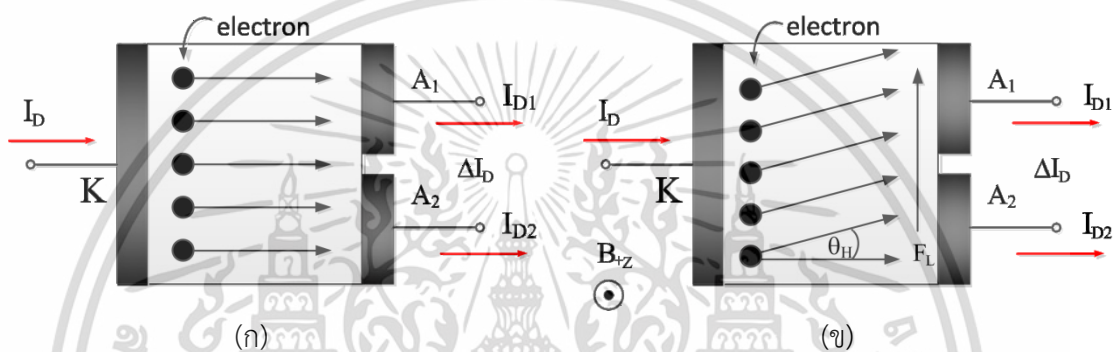
2.4.2 หลักการทำงานของแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่

แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (Carrier deflection) จากแรงลอเรนซ์ ที่มาจากสนามแม่เหล็ก เมื่อให้ไบอัสแก่แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ จากรูปที่ 2.23 แมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ ขั้วแอนโนด (A) จะทำหน้าที่จ่ายพาหะส่วนใหญ่ซึ่งเป็นโฮล โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2 (K_1, K_2) เกิดเป็นกระแสไดโอดทั้งสอง (I_{D1}, I_{D2}) ตามลำดับ



รูปที่ 2.23 โฮลเคลื่อนที่ในแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่ (ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก (ข) มีสนามแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสภาวะปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ($B = 0$) กระแสไดโอดทั้งสอง I_{D1} กับ I_{D2} จะเท่ากัน ดูในรูปที่ 2.23 (ก) เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับระนาบผิวของอุปกรณ์ในทิศ $-Z$ จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะตามหลักปรากฏการณ์ฮอลล์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม θ_H หรือมุมฮอลล์ ดังในรูปที่ 2.23 (ข) เนื่องจากประจุพาหะส่วนมากคือโฮล แรงลอเรนซ์จะมีทิศทางพุ่งขึ้นบน กระแสพาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปทางด้านขั้วแคโทด 1 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นความต่างของกระแสที่ไหลผ่านขั้วแคโทดทั้งสอง (ΔI_D) โดยที่กระแส I_{D1} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแส I_{D2} จะมีค่าลดลง ($I_{D1} > I_{D2}$) แต่ถ้าสนามแม่เหล็กเข้ามาในทิศตรงกันข้าม $+Z$ ทิศทางของแรงลอเรนซ์จะพุ่งลงมาด้านล่าง จะทำให้เกิดสิ่งที่ตรงกันข้ามโดยกระแส I_{D2} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแส I_{D1} จะมีค่าลดลง ($I_{D2} > I_{D1}$)



รูปที่ 2.24 อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ก่อนและหลังได้รับสนามแม่เหล็ก

แมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ รูปที่ 2.24 ขั้วแคโทด (K) ทำหน้าที่จ่ายพาหะอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด 1 และแอโนด 2 (A_1, A_2) เกิดเป็นกระแสไดโอดทั้งสอง (I_{D1}, I_{D2}) สภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B = 0$) กระแสไดโอดทั้งสอง I_{D1} กับ I_{D2} จะเท่ากันดังรูปที่ 2.24 (ก) เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาในทิศ $+Z$ ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเป็นมุม θ_H ดังในรูปที่ 2.24 (ข) เนื่องจากประจุพาหะส่วนมากคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ตามกระแสนิยมที่จะมีทิศสวนทางกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามกฎมือขวาแรงลอเรนซ์จะมีทิศทางพุ่งขึ้นบน กระแสพาหะเบี่ยงเบนไปทางด้านขั้วแอโนด 1 ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นความต่างของกระแสที่ไหลผ่านขั้วแอโนดทั้งสอง (ΔI_D) โดยที่กระแส I_{D1} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแส I_{D2} จะมีค่าลดลง ($I_{D1} > I_{D2}$) แต่ถ้าสนามแม่เหล็กเข้ามาในทิศตรงกันข้าม $-Z$ ทิศทางของแรงลอเรนซ์จะพุ่งลงมาด้านล่าง จะทำให้เกิดสิ่งที่ตรงกันข้ามโดยกระแส I_{D2} จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแส I_{D1} จะมีค่าลดลง ($I_{D2} > I_{D1}$) จะเห็นได้ว่ากลไกการทำงานทั้งสองโครงสร้างนี้จะสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านและชนิดของพาหะ โดยกระแสไดโอด (I_D) เป็นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านขั้วที่ 1 (I_{D1}) กับกระแสที่ไหลผ่านขั้วที่ 2 (I_{D2}) ซึ่งทิศทางการเบี่ยงเบนของกระแสก็จะกลับกันเมื่อสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศตรงกันข้าม จากโครงสร้างที่เรียบง่ายมีความสมมาตรทำให้การนำไปใช้วัดความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีความเป็นเชิงเส้นดี และการปรับแต่งให้มีประสิทธิภาพที่สูงทำได้ง่ายนับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีจุดเด่นอยู่บนโครงสร้างที่น่าสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD

บทนี้กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ขนาน ก็คือ Technology CAD (TCAD) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ สำหรับงานวิจัยนี้เราเลือกใช้การจำลองแบบเพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งการจำลองแบบยังมีข้อดีที่สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ได้ในเชิงลึกหรือในบางบริเวณ ซึ่งการวัดจริงไม่สามารถทำได้ ในช่วงต้นจะเป็นการกล่าวรายละเอียดอย่างคร่าวๆ ถึงหลักการการทำงานของโปรแกรม จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่ ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือการออกแบบโครงสร้างแบบจำลอง หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองที่ได้ไปจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้า โดยทั้งสองส่วนจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานเพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้

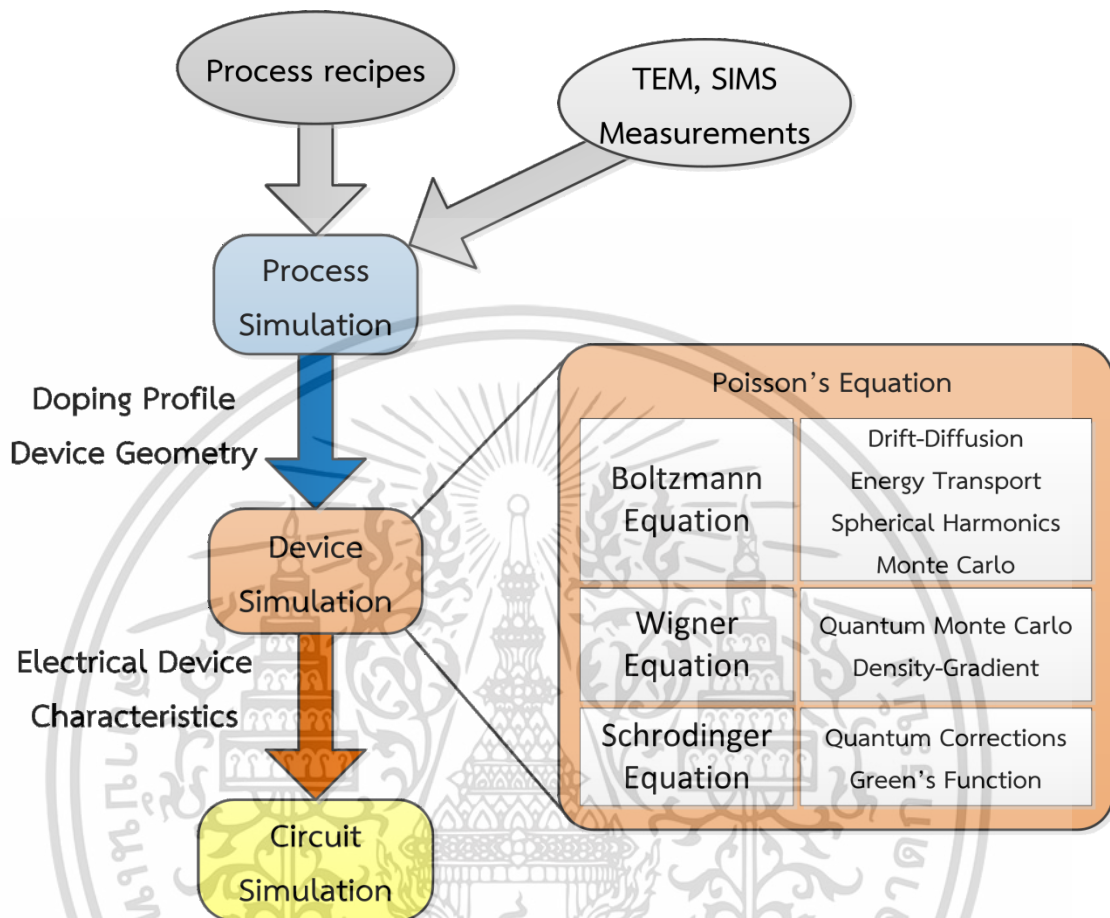
Technology CAD (TCAD) หรือ Technology Computer Aided Design เป็นโปรแกรมที่จัดอยู่ในกลุ่มโปรแกรมออกแบบอัตโนมัติ Electronic Design Automation (EDA) หรืออาจจะเรียกอีกอย่างว่า Electronic Computer Aided Design (ECAD) ซึ่งเป็นกลุ่มโปรแกรมสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรรวม, แผ่นวงจรพิมพ์ PCB เครื่องมือกลุ่มนี้ถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์วงจรรวมและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั้งหมด เนื่องจากวงจรรวมและอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่มีส่วนประกอบจำนวนมาก ทำให้เครื่องมือ EDA กลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั้งในปัจจุบันและอนาคต

TCAD เป็นโปรแกรมที่ทำการประมวลผลในรูปแบบไฟล์ข้อมูล ไฟล์ข้อมูลประกอบไปด้วยข้อมูลโครงสร้างเงื่อนไขต่างๆ และกฎการออกแบบซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการออกแบบวงจรรวม ประเด็นที่พิจารณาในการออกแบบที่สำคัญมีเรื่องความละเอียดแม่นยำความแปรปรวนในกระบวนการผลิตเงื่อนไขในการทำงานของไอซี สิ่งแวดล้อมในการทดสอบ ค่าแฝงต่าง ๆ รวมทั้งสภาวะที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ไฟฟ้าสถิตไฟกระชากแรงดันเกินกว่าค่าที่กำหนด ประสิทธิภาพผลผลิต และความน่าเชื่อถือ เทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแบบอุตสาหกรรม ส่งผลต่อความก้าวหน้าในการพัฒนาอุปกรณ์การออกแบบผลิตภัณฑ์และการประกันคุณภาพสินค้า การสร้างแบบจำลองและการจำลองแบบมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนกระบวนการผลิตเหล่านี้

เป้าหมายในการสร้างโปรแกรม TCAD ขึ้นมาในตอนต้นเพื่อต้องการจะอธิบายรายละเอียดลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในวงจรรวม โดยประเด็นสำคัญคือการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางกายภาพกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าในการออกแบบวงจรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างแบบจำลองทางฟิสิกส์ของอุปกรณ์เป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาวิธีการผลิตวงจรรวม การหาปริมาณพารามิเตอร์สำคัญ ๆ ที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบ



รูปที่ 3.1 การจำลองแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย TCAD

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองแบบ มีที่มาเริ่มต้นพัฒนาจากการจำลองแบบในหนึ่งมิติ เป็นการวิเคราะห์ที่เฟสตรงต่อมาเป็นการจำลองแบบสองมิติและสามมิติในเวลาต่อมา สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งไฟสลับและเฟสตรง การจำลองแบบทำได้หลาย ๆ อุปกรณ์แล้วนำมาทำงานร่วมกันเป็นวงจรและไปถึงขั้นจำลองฟังก์ชันการทำงาน การจำลองแบบระดับอุตสาหกรรมต้นน้ำหรือระดับพื้นฐานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ส่วนหลักๆ ที่ต้องใช้งานคือการจำลองแบบกระบวนการผลิต (Process simulation) และการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ (Device simulation) ดังรูปที่ 3.1 เริ่มต้นจะมาจากการรับสูตรหรือเงื่อนไขในกระบวนการผลิต (Process Recipes) เข้ามาจำลองแบบกระบวนการผลิต (Process Simulation) โดยสามารถดูผลเลียนแบบการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อดูชิ้นงานที่ได้จำลองไว้ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้รูปร่างมิติของอุปกรณ์ (Device Geometry) และรูปทรงที่เติมอะตอมสารเจือ (Doping Profile) ซึ่งต่อไปจะนำไปใช้เป็นอินพุตของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์ (Device Simulation) การประมวลผลในการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์จะใช้สมการปัวซอง (Poisson's Equation) สมการโบลทซ์มานน์ (Boltzmann's Equation) สมการวิกเนอร์ (Wigner equation) สมการคลื่นชโรดิงเงอร์ (The Schrodinger wave equation) เป็นต้น สิ่งที่ได้จากการจำลองการทำงานจะได้เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ (Electrical Device Characteristics) ที่จะนำไปใช้จำลองแบบวงจร (Circuit Simulation) ได้ต่อไป ในปัจจุบันงานทางด้านนี้ค่อนข้างจะซับซ้อนและมีขนาดใหญ่มากเช่นในวงจรไอซี VLSI โดยสามารถเลียนแบบจำลองกระบวนการผลิตและจำลองการทำงานที่ใกล้เคียงกับของจริงซึ่งจะก้าวหน้าไปตามเทคโนโลยีการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากในปัจจุบัน [59, 60]

3.1 การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor process simulation) คือการสร้างแบบจำลองเลียนแบบกระบวนการผลิตจริงของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่นทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวเก็บประจุ เป็นต้น เป้าหมายสำคัญของการจำลองกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คือการคาดคะเนการกระจายตัวของสารเจือที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งจะกระจายไปตามความเข้มข้นของสารเจือและขึ้นอยู่กับรูปทรงของอุปกรณ์ การจำลองกระบวนการจะเป็นวิธีหรือขั้นตอนหนึ่งในเบื้องต้นที่จะสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ในการออกแบบวงจรรวมจะมีลำดับการออกแบบเริ่มจากออกแบบฟังก์ชันการใช้งานแล้วไปออกแบบวงจรแล้วแตกเป็นขั้นตอนย่อย ๆ เช่นการออกแบบทางตรรกะ ในการออกแบบก็จะมีทั้งที่ออกแบบเป็นตัวเดียว และที่ประกอบเป็นวงจรขนาดใหญ่ ขั้นตอนการออกแบบในกระบวนการผลิตจะประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย ๆ หลายขั้นตอนซึ่งการจำลองแบบก็ต้องทำตามลำดับเช่นเดียวกับของจริง อินพุตที่จะป้อนเข้าไปสำหรับการจำลองกระบวนการผลิตคือขั้นตอนการสร้างและขนาดมิติโครงสร้างของอุปกรณ์ที่จะสร้าง โดยส่วนใหญ่ก็จะใช้รูปหน้าตัดตามระนาบต่าง ๆ สำหรับการจำลองแบบ 2 มิติ หรือการใช้พื้นที่หน้าตัดแล้วสร้างขึ้นเป็นปริมาตรสำหรับการจำลองแบบ 3 มิติในการจำลองแบบก็ต้องการความแม่นยำที่สูงใกล้เคียงกับของจริงแต่ก็อาจจะต้องแลกกับเวลาที่ใช้นานขึ้น บางครั้งเมื่ออุปกรณ์มีขนาดที่เล็กมากการจำลองแบบก็ต้องแบ่งเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กละเอียดมาก ยิ่งขึ้นก็ยิ่งต้องใช้เวลานาน แต่ก็มีความจำเป็นเพราะต้องการผลที่ใกล้เคียงกับความจริงมากยิ่งขึ้น การจำลองแบบกระบวนการผลิตจะต้องปรับเปลี่ยนไปตามเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่พัฒนาไป นักวิจัยจึงต้องทำความเข้าใจกระบวนการผลิตและทำการปรับปรุงแบบจำลองโดยตลอดให้ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริงมากที่สุด

3.2 การจำลองแบบกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่

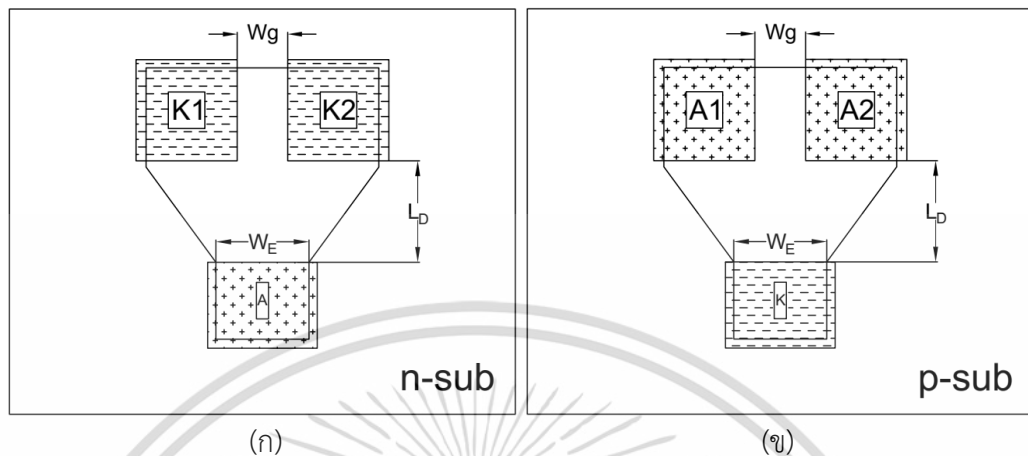
การจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีโตไดโอดแบบคู่ตัวโครงสร้างของอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยขั้ว 3 ขั้วเป็นขั้วสำหรับให้กระแสไหลเข้าหรือออก เราจะเรียกว่า “ขั้วกระแส” (current contact) ส่วนอีกสองขั้วที่เหลือเรียกว่า “ขั้วรับรู้” (sense contact) จะไว้ใช้สำหรับการวัดกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ ในการจำลองแบบเราจะไปใส่กระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้ทำงานในโหมดกระแส โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ เพื่อศึกษาผลความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวอุปกรณ์ เราจะทำการป้อนสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์และตั้งฉากกับทิศทางของกระแส จากนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เพื่อดูผลความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ว่ามากน้อยแค่ไหน เอาต์พุตที่จะวัดความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมีอยู่สองลักษณะ อย่างแรกก็คือแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ซึ่งได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ส่วนเอาต์พุตอีกรูปแบบก็คือ ความต่างของกระแสที่ขั้วกระแสสองขั้วซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส ซึ่งเอาต์พุตรูปแบบหลังนั้นนอกจากจะวัดในรูปความแตกต่างของกระแสได้แล้ว ยังสามารถวัดในรูปของแรงดันไฟฟ้าได้ โดยการนำตัวต้านทานเข้าไปต่อที่ขั้วรับรู้สองฝั่งแล้วอาศัยการวัดผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานทั้งสอง การจำลองแบบอุปกรณ์แมกนีโตไดโอดแบบคู่ด้วยโปรแกรม TCAD เราจะแบ่งการดำเนินการเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการขึ้นโครงสร้างและกำหนดโครงตาข่ายหรือ mesh ให้กับตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือประเภท Structure Editor ส่วนต่อมาหลังจากขึ้นโครงสร้างเสร็จ เราจะทำการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือ Device simulation ซึ่งขั้นตอนการจำลองแบบสามารถอธิบายได้ตามหัวข้อต่อไปนี้ [61]

3.2.1 การสร้างแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่

การสร้างแบบของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ เริ่มจากการกำหนดขนาดอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรมประเภท Layout Editor การทำแบบเป็นการจำลองการทำงานที่คล้ายกับการสร้างลวดลายบนกระจกต้นแบบ (Mask) ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) แนวคิดการทำงานจะเป็นการแบ่งออกเป็นชั้นต่าง ๆ แล้วนำมาซ้อนกันตามชนิดของสารเจือและชั้นวัสดุต่างๆ รวมทั้งชั้นโลหะที่ทำขั้วไฟฟ้าและทางเดินไฟฟ้า ในเบื้องต้นเริ่มกำหนดบริเวณที่จะจำลองแบบเป็น 2 มิติ ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะจำลองแบบทั้งสองโครงสร้างทั้งชนิดแคโทดคู่รูปที่ 3.2 (ก) และแอโนดคู่รูปที่ 3.2 (ข) กำหนดขนาดของตัวอุปกรณ์ที่แทนฐานรองของตัวอุปกรณ์เป็นลำดับแรก มีความยาวเท่ากับ 50 ไมโครเมตรและกว้าง 40 ไมโครเมตร ระยะปลายพาหะ W_E ระยะเบี่ยงเบนพาหะ L_D ระยะห่างขั้วไฟฟ้า W_g ขึ้นต่อมาทำการกำหนดบริเวณที่ใต้ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (+) และเอ็น (-) ขึ้นต่อมา กำหนดชั้นสร้างขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ขั้วโดยการออกแบบบริเวณเจือสารเพื่อทำให้อรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกไม่ให้เป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ ขึ้นต่อมาทำการกำหนดบริเวณสำหรับสร้างชั้นโลหะในการทำเป็นขั้วไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์โดยกำหนดเป็นขั้วแอโนด (A) และ แคโทด (K) ขึ้นต่อมาทำการกำหนดบริเวณสำหรับสร้างชั้นออกไซด์เพื่อบ่งคับพาหะบริเวณพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เรียงเบนไปตามทิศทางที่ต้องการ หลังจากกำหนดชั้นต่างๆ (layer) และวาดโครงสร้างของแต่ละชั้นลงบนแบบเสร็จ ก็เป็นอันจบขั้นตอนการออกแบบ จากนั้นจะได้นำไปใช้ในลำดับกระบวนการสร้างต่อไป

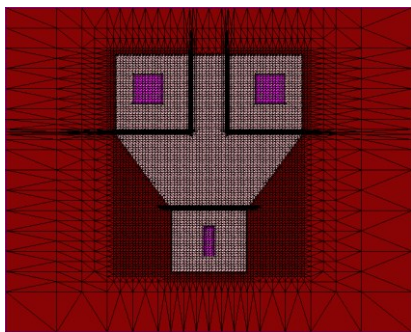


รูปที่ 3.2 แบบของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ (ก) ชนิดแคโทดคู่ (ข) ชนิดแอโนดคู่

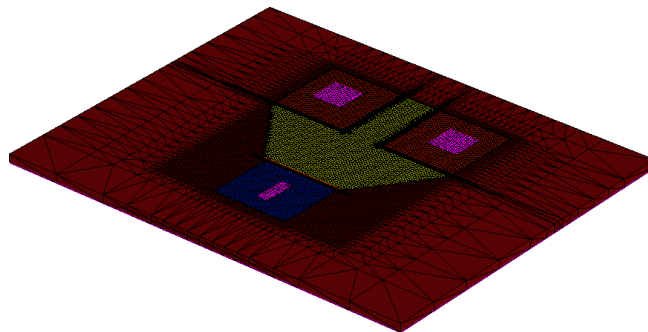
3.2.2 การสร้างโครงตาข่าย (Mesh)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งมีการนำมาใช้กับปัญหาที่หลากหลายทางวิศวกรรม ในการทำงานจะแบ่งปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ แล้วทำการแก้ปัญหาด้วยสมการอนุพันธ์ย่อยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณแล้วผลในชิ้นส่วนย่อย ๆ นำไปใช้คำนวณต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ในการประมวลผลจะประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และมีการใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนหรือขอบเขตขนาดหรือปริมาตรของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อนทางกลศาสตร์เพราะสามารถแก้ปัญหารูปทรงที่ซับซ้อนได้โดยสะดวก ต่อมาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสายงานที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์พื้นฐานจนถึงฟิสิกส์อนุภาค เพราะระเบียบวิธีนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นสามารถทำนายผลการคาดการณ์การทดลองจริงหรือการเสนอแนวความคิดใหม่ทางทฤษฎี ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรมและในภาคอุตสาหกรรม การแก้สมการที่มีความซับซ้อนสูงบนโดเมนที่ใหญ่จะทำได้ยากการแบ่งโดเมนทั้งหมดออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่มีขนาดเล็กกว่า มีข้อดีหลายประการ การแทนรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนด้วยชิ้นส่วนเล็ก ๆ กรณีการใช้คุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน การหาคำตอบทั้งหมดจะทำได้ง่าย เมื่อแบ่งปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเล็ก ๆ แล้วทำการแก้ปัญหาละเอียด หลังจากนั้นก็รวบรวมผลของคำตอบทั้งหมดในแต่ละส่วนเป็นคำตอบในขั้นสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 การกำหนดโครงตาข่ายในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การกำหนดโครงตาข่าย (Mesh) เป็นขั้นตอนแรก ๆ ที่จะต้องทำกับการจำลองแบบในโปรแกรม TCAD เพื่อจำลองการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำดังรูปที่ 3.3 (ก) ลักษณะโครงตาข่าย 2 มิติ (ข) โครงตาข่าย 3 มิติ โดยขั้นตอนการประมวลผลต่าง ๆ เช่นการหาค่าตอบของสมการขนส่งพาหะ ต้องแบ่งพื้นผิวหรือปริมาตรออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมเล็ก ๆ รูปร่างที่เป็นที่นิยมและใช้กันบ่อยที่สุดคือรูปสามเหลี่ยม ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจะต้องมีการคำนวณเรื่องของเวลาและพื้นที่อย่างเช่นการคำนวณการแพร่กระจายความเข้มข้นของสารเจือโดยจะคำนวณด้วยสมการอนุพันธ์ย่อย แล้วรวมคำตอบทั้งหมดเป็นผลเฉลยทั้งชิ้นงาน ระยะห่างในการคำนวณตาข่ายแบ่งเป็นตารางย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่า "กริด" จะต้องกำหนดกริดให้เหมาะสมมีความหนาแน่นเพียงพอเพื่อให้รูปทรงในการเจือสารถูกต้องตรงใกล้เคียงกับของจริงให้มากที่สุด การคำนวณถ้ามีการแบ่งระยะเวลาที่คำนวณให้เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ อย่างละเอียดก็จะทำให้ผลการคำนวณทางฟิสิกส์ถูกต้องมากยิ่งขึ้นแต่ไม่ควรมากเกินไปจนกินเวลาโดยรวมมากเกินไป

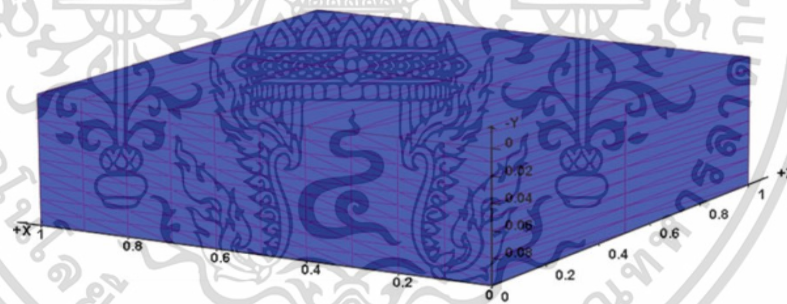
รูปร่างของโครงตาข่ายหรือกริดในโครงสร้างการจำลองแบบเป็นสิ่งสำคัญมาก ในการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations : PDE) เนื่องจากเป็นตัวกำหนดโดยตรงว่า แบบจำลองที่สร้างนั้นเป็นตัวแทนของปัญหาได้ใกล้เคียงของจริงหรือไม่ มีข้อควรพิจารณาหลายประการเกี่ยวกับการเลือกกริด ประการแรกต้องมีการกำหนดจุดกริดหรือบริเวณที่น่าสนใจมีการประมวลคร่าว ๆ จากความเข้าใจในเชิงทฤษฎีทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องเช่นศักดาทางไฟฟ้า, ความหนาแน่นสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแส รวมทั้งรูปทรงของแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นมีผลอย่างไรต่อค่าต่างๆ ประการที่สองเนื่องจากเวลาในการคำนวณโดยรวมขึ้นอยู่กับจำนวนกริดทั้งหมด ระยะหรือค่าของกริดควรได้รับการปรับให้เหมาะสมในภายหลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณและจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในภาวะที่มีการจัดไฟให้อุปกรณ์ ตัวแปรผลเฉลยในสมการอนุพันธ์ย่อย เช่น ศักดาไฟฟ้า, ประจุไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็วในบริเวณรอยต่อพีเอ็น (p-n junctions) การกำหนดกริดในบริเวณนี้ต้องมีความละเอียดที่ค่อนข้างสูง ส่วนบริเวณเนื้อสารในบางบริเวณของอุปกรณ์ การเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ค่อนข้างน้อยเราสามารถใส่กริดที่หยาบกว่าได้ค่าผล

เฉลี่ยที่คำนวณได้ก็จะไม่ค่อยผิดพลาดมากนัก สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงที่สำคัญคือแบบจำลองที่ได้นั้นควรจะได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุดและใช้เวลาที่เหมาะสม

การสร้างโครงตาข่าย (mesh) สำหรับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เราจะกำหนดความละเอียดให้ มีการเปลี่ยนแปลงความละเอียดตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารเจือ สามารถแบ่งบริเวณกำหนดความละเอียดเป็นส่วน ๆ ได้ให้ความละเอียดของ mesh อยู่ระหว่าง 0.001 ไมโครเมตร ถึง 2 ไมโครเมตร (สำหรับทุกแนวแกน x, y, z) ครอบคลุมบริเวณข้อไฟฟ้าและตัวฐานรองทั้งหมด โดยบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นแนวบริเวณข้อทั้ง 3 จะถูกสร้างให้มีความละเอียด mesh มากที่สุดในทุกแนวแกน เพื่อให้ได้ความละเอียดใกล้เคียงของจริงมากที่สุดในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์

3.2.3 การสร้างฐานรองและพื้นผิวออกไซด์ (Oxidation process)

การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เริ่มจากการสร้างฐานรองขึ้นเป็นอันดับแรกดังรูปที่ 3.4 โดยสามารถจะระบุขนาด เลือกรวัสดุ (material), ความเข้มข้นสารเจือ (concentration), สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity), ระบายผลึก (orientation) อาจสร้างเป็นสารกึ่งตัวอินทรีนซิกหรือสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือใด ๆ ลงไป หรืออาจจะกำหนดให้เป็นฐานรองชนิดพีที่ถูกเจือด้วยโบรอน หรือชนิดเอ็นที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส (phosphorus)

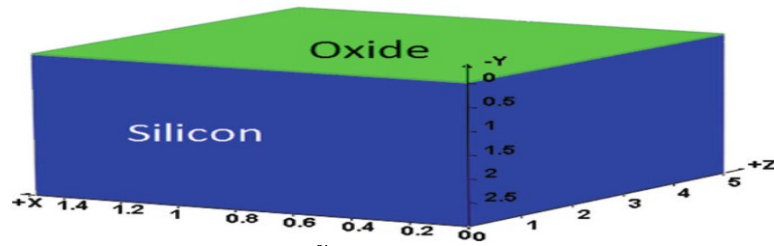


รูปที่ 3.4 ฐานรองซิลิคอนในการจำลองแบบ



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการสร้างพื้นผิวซิลิคอนออกไซด์ลงบนฐานรองซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ภาพสามมิติการสร้างพื้นผิวซิลิคอนออกไซด์ลงบนฐานรองซิลิคอน

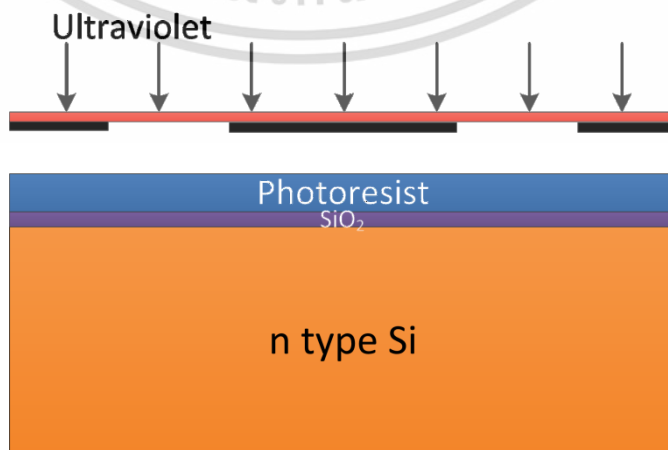
ขั้นตอนต่อมาสร้างพื้นผิวออกไซด์ลงบนฐานรองดังรูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการสร้างพื้นผิวซิลิคอนออกไซด์ และ รูปที่ 3.6 ภาพสามมิติพื้นผิวซิลิคอนออกไซด์เพื่อเตรียมขั้นตอนต่อไป

3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

โดยการจำลองแบบ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) นี้จะเลียนแบบการถ่ายแบบจริง (Patterning) จากมาสก์ (mask) หรือ เรติเคิล (reticle) จากการที่ได้ออกแบบไว้ ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ดังรูปที่ 3.7 แล้วทำการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นทำการลอกน้ำยาไวแสงออกคล้ายกับการกัด (Etching) เป็นกระบวนการในการกำจัดสารออกจากผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ เพื่อให้เข้าถึงชั้นซิลิคอนออกไซด์ดังรูปที่ 3.9 จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นทำการเปิดช่องหน้าต่างในชั้นซิลิคอนออกไซด์ออกด้วยขั้นตอนการกัดอีกครั้งหนึ่งดัง รูปที่ 3.10 ชิ้นงานก็พร้อมที่จะแพร่สารเจือต่อไป



รูปที่ 3.7 การสร้างชั้นน้ำยาไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นซิลิคอนออกไซด์



รูปที่ 3.8 การฉายแสง (Ultraviolet) ลงบนน้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



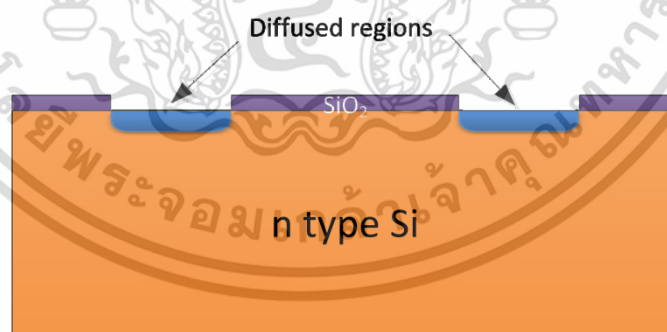
รูปที่ 3.9 การลอกน้ำยาไวแสง (Photoresist) ออกจากผิวซิลิคอนออกไซด์



รูปที่ 3.10 การกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ออกได้เป็นช่องสำหรับการแพร่สารเจือ

3.2.5 การแพร่สารเจือและการอบ (Diffusion and Annealing)

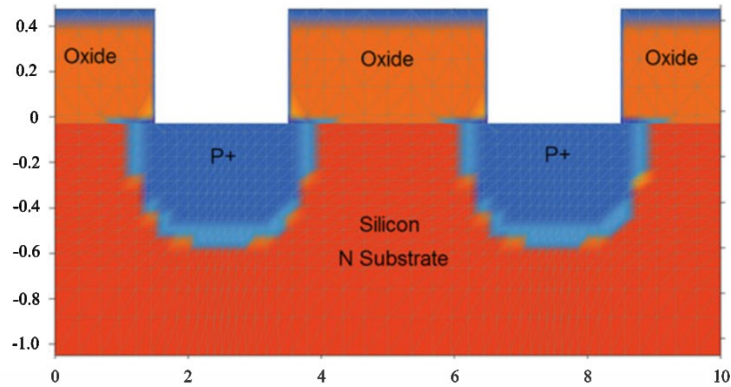
ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองแบบกระบวนการการแพร่สารเจือและการอบ (Diffusion and Annealing) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่งในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพราะสามารถสร้างเนื้อสารตามที่ต้องการทั้งชนิดพีและเอ็นสร้างรอยต่อกำหนดความเข้มข้นพาหะ โดยเราใช้วิธียิงฝังประจุ (Ion implantation) ไอออนจะทะลุลงไปผ่านช่องหน้าต่างที่ได้เปิดไว้ดังรูปที่ 3.11 โดยสามารถกำหนดความเข้มข้นความลึกได้ตามที่ต้องการ จากนั้นทำการอบ (Anneal) เพื่อปรับสภาพหลังการยิงฝังประจุ



รูปที่ 3.11 การแพร่สารเจือผ่านช่องออกไซด์ที่เปิดไว้

การอบ (Anneal) โดยเราจำลองเป็นการอบด้วยความร้อนมีการอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสนาน 30 นาทีที่ความดันบรรยากาศ 1 atm เพื่อให้โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายหลังการยิงฝังประจุเกิดการจับตัวขึ้นมาใหม่มีการกระจายตัวในโครงผลึกสม่ำเสมอ จากนั้นจะได้เป็นรอยต่อและที่แพร่สารเจือเรียบร้อยดังรูปที่ 3.12

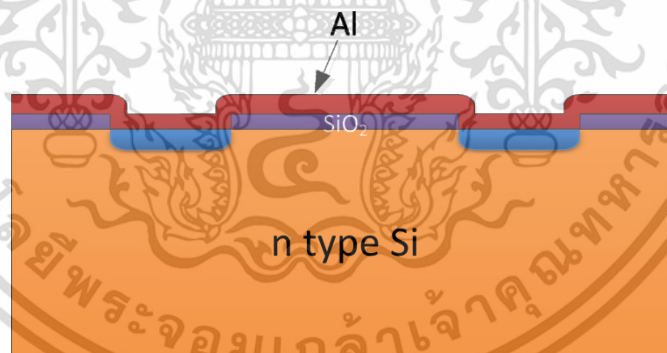
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



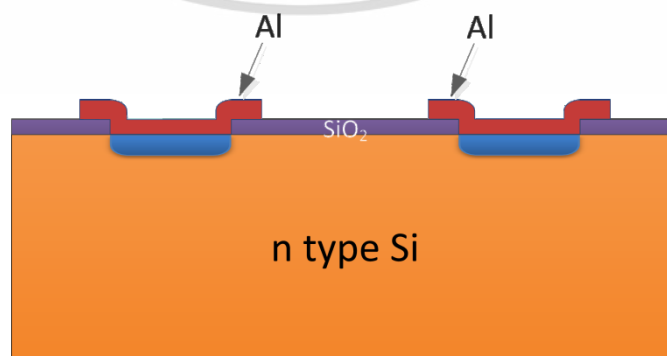
รูปที่ 3.12 ภาพตัด 2 มิติรูปทรงที่แพร่สารเจือแล้ว

3.2.6 การสร้างและกำหนดหน้าสัมผัสขั้วไฟฟ้า (Metallization)

การจำลองแบบสร้างชั้นโลหะ (Metallization) เป็นขั้นตอนของการสร้างชั้นของโลหะเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยวัสดุโลหะที่ถูกนำมาใช้จำลองแบบจะมีให้เลือกหลายชนิดด้วยกัน เช่น อะลูมิเนียม (Aluminum), ไททาเนียม (Titanium) ทองแดง (Copper) เป็นต้น และอาจจะเลือกใช้โพลีซิลิคอน (Polysilicon) ก็ได้ จากการสร้างชั้นโลหะทำขั้วไฟฟ้าด้วยกระบวนการ deposition เราจะได้ชั้นโลหะอะลูมิเนียมหนา 1 ไมโครเมตร เพื่อสร้างการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นจึงกัดเอาอะลูมิเนียมในบริเวณที่ไม่ต้องการออกไปดังรูปที่ 3.14 ได้เป็นขั้วไฟฟ้า รูปที่ 3.15 แสดงภาพตัดแมกนีโตเดอโดพร้อมขั้วไฟฟ้าพร้อมใช้งาน

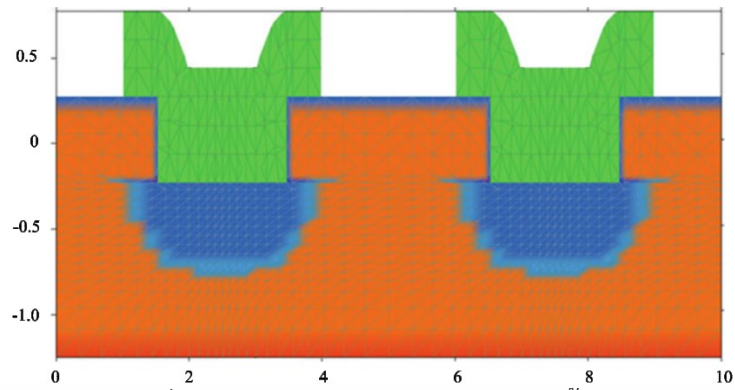


รูปที่ 3.13 ภาพหน้าตัดการสร้างชั้นอะลูมิเนียมก่อนการกัด



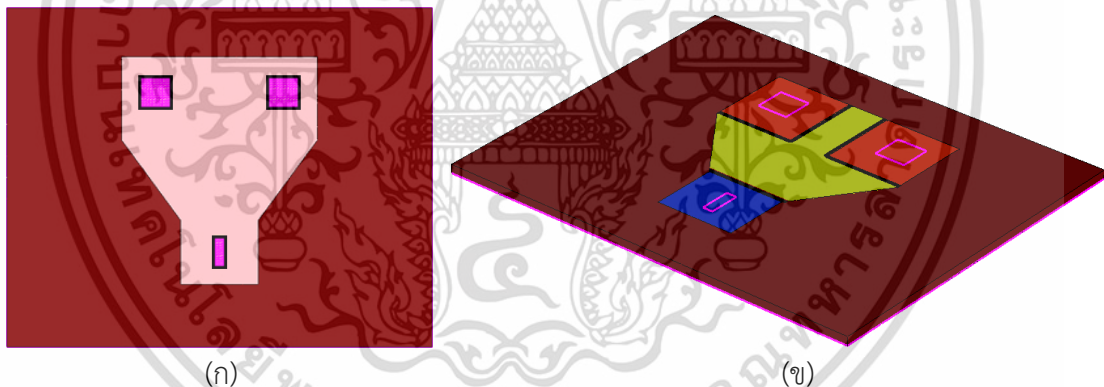
รูปที่ 3.14 ขั้วไฟฟ้าหลังจากกัดอะลูมิเนียมออกไปแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

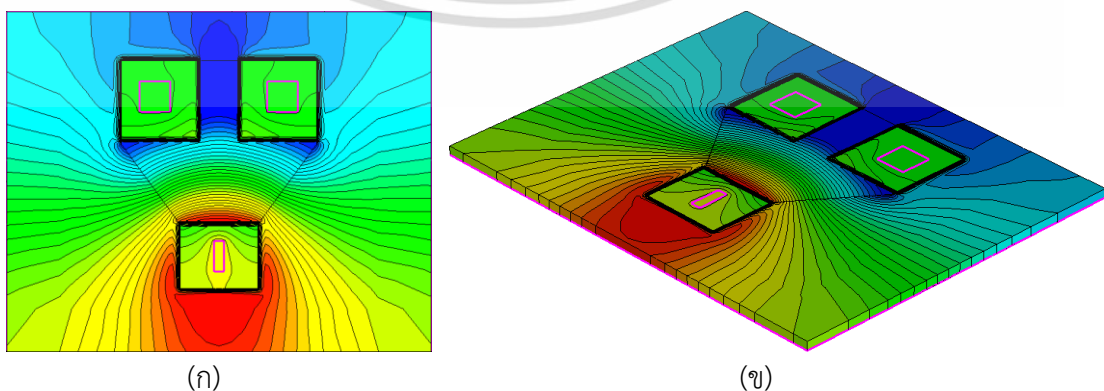


รูปที่ 3.15 ภาพตัดแมกนีโตไดโอดพร้อมขั้วไฟฟ้า

การกำหนดบริเวณหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ มีประโยชน์เพื่อกำหนดจุดสำหรับการป้อนไฟไบอัสจุดอ้างอิงในการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวัดทดสอบอุปกรณ์ โดยระบุชื่อและตำแหน่งเป็นพิกัดในแต่ละแนวแกนให้อยู่ในส่วนของขั้วโลหะทั้ง 3 ที่เราสร้างขึ้นมา โดยขั้วโลหะสำหรับรอยสัมผัสโอห์มมิคสามารถกำหนดเป็นค่าความต้านทานได้โดยตรง โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจากกำหนดบริเวณจุดหน้าสัมผัสไฟฟ้าเสร็จแล้วดังรูปที่ 3.16 (ก) แสดงรูป 2 มิติและ (ข) แสดงรูป 3 มิติ บริเวณพื้นที่ที่สัมผัสจะเป็นขั้วของอุปกรณ์ทั้งสามจุด



รูปที่ 3.16 โครงสร้างของอุปกรณ์หลังจากกำหนดบริเวณจุดหน้าสัมผัสไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 แบบจำลองแมกนีโตไดโอดแบบคู่

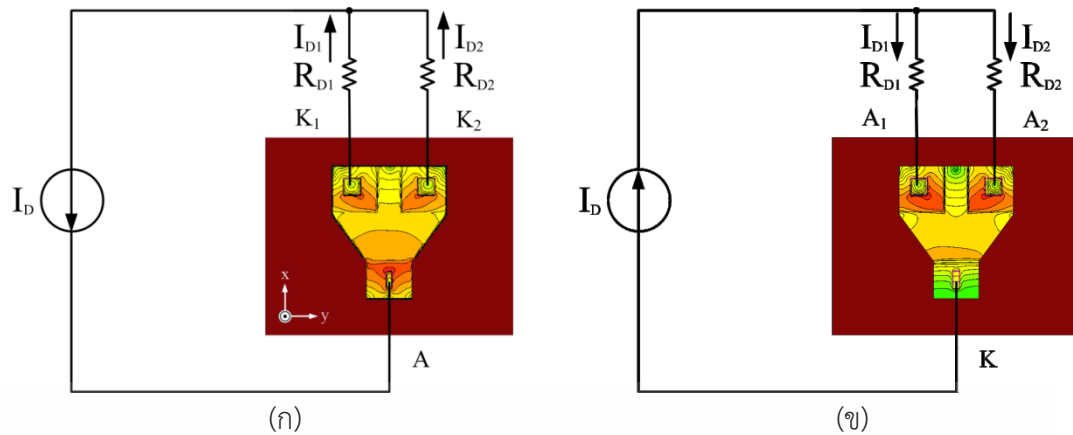
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.17 (ก) แบบจำลองแมกนีโตไดโอดแบบคู่ 2 มิติและ (ข) แบบจำลอง 3 มิติ ที่ได้จากการบวนการจำลองแบบกระบวนการสร้าง มีการจำลองแบบการเจือสารให้เกิดเป็นโครงสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยทั้งหมดจะมีชั้น 3 ชั้นที่พร้อมจะไวใช้งานในการจ่ายไฟไบอัสให้กับอุปกรณ์และทำการวัดกระแสเมื่อนำไปจำลองแบบการวัดกับสนามแม่เหล็ก

3.3 การจำลองแบบการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

การจำลองแบบการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Device simulation) สามารถสร้างแบบจำลองผลการตอบสนองต่อปริมาณทางฟิสิกส์เช่นคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆแสงความร้อนสนามแม่เหล็กและแม้แต่คุณสมบัติเชิงกลของอุปกรณ์ โดยโปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างอิสระหรือสามารถนำผลที่ได้จากโปรแกรมการจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor process simulation) นำมาใช้ต่อได้ทันที โปรแกรมเหล่านี้จะช่วยในการออกแบบและทำงานร่วมกันกับวิศวกรรมหลาย ๆ สาขาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตช่วยนำทางในการออกแบบเพื่อให้ได้ผลออกมาดีที่สุดซึ่งจะทำให้ได้ยากและเสียเวลาถ้าจะใช้การทดลองจากของจริงเพียงอย่างเดียว การจำลองแบบอุปกรณ์ในปัจจุบันทั้งหมดนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้าง 2 มิติ หรือ 3 มิติเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าความร้อนและแสงของอุปกรณ์ที่สร้างจากสารประกอบหรือสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยทั่วไปโปรแกรมจำลองการทำงานสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในชุดโปรแกรม TCAD จะประกอบด้วยชุดแบบจำลองทางฟิสิกส์ที่อธิบายการส่งผ่านพาหะในวัสดุที่มาทำอุปกรณ์ รูปแบบการจำลองเริ่มตั้งแต่การแพร่กระจายพาหะธรรมดาแบบดริฟท์ซึ่งอาศัยการแก้สมการปัวซองและสมการความต่อเนื่อง ไปจนถึงโมเดลที่ซับซ้อนในการคำนวณเช่นสมการพลังงานซึ่งจะต้องแก้ปัญหาด้วยการใช้สมการขนส่งพาหะของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann transport equation : BTE) นอกจากนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีขนาดที่เล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้ยุ่งยากในการคำนวณ อาจจะต้องใช้เทคนิคการคำนวณแบบมอนติคาร์โล (MC) ที่เป็นเทคนิคการแก้สมการแบบสุ่มตัวแปรเพื่อหาคำตอบ ซึ่งสามารถจะใช้แก้ปัญหาสมการขนส่งพาหะของโบลทซ์มันน์ (BTE) ได้ไวมากยิ่งขึ้น และการใช้เทคนิคการแก้ปัญหาแบบชโรดิงเจอร์ (Schrödinger) ที่อธิบายถึงผลต่าง ๆ ในเชิงกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics) เช่นในอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือมอสเฟส (MOSFET) ทางเลือกต่าง ๆ ในการพัฒนาแบบจำลองขึ้นอยู่กับปัญหาและระดับรายละเอียดที่ต้องการรู้จากแบบจำลองนั้น ๆ แม้ว่าในปัจจุบันความก้าวหน้าทางฟิสิกส์และเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมทางด้านนี้ที่นับวันจะมีขนาดยิ่งเล็กลงและมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นความสามารถของ TCAD ในการจำลองอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีความสำคัญ ในการที่จะทำนายผลคุณสมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์ที่จะสร้างในอนาคต ถึงแม้ผลออกมาอาจจะไม่แม่นยำถึงร้อยเปอร์เซ็นต์แต่ก็เป็นแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์กันพอที่จะเชื่อถือได้ และสามารถทำนายข้อจำกัดต่าง ๆ ในการออกแบบช่วยให้การออกแบบง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การจำลองแบบการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Device simulation)

เมื่อได้โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการจำลองแบบการทำงาน (Device simulation) ของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ดังรูปที่ 3.18 (ก) เป็นการจำลองแบบการทำงานแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ รูปที่ 3.18 (ข) เป็นการจำลองการทำงานแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่ โดยการกำหนดอุปกรณ์ประกอบใช้คำสั่งสร้างแหล่งจ่ายไฟกระแสคงที่ I_D กำหนดค่าความต้านทาน R_{D1} และ R_{D2} กำหนดจุดการเชื่อมต่อวงจรเข้ากับอุปกรณ์ที่ได้มาจากการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Process simulation) แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่กับแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่การจำลองแบบจะคล้ายกันต่างกันที่ทิศทางของกระแส เมื่อกำหนดการต่อวงจรเรียบร้อยแล้วก็นำไปกำหนดแบบจำลองทางฟิสิกส์ต่อไป

3.3.1 แบบจำลองทางฟิสิกส์

การจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วย Device simulator ซึ่งการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จะต้องระบุโมเดลทางฟิสิกส์ที่จำเป็นพื้นฐานจะถูกนำมาใช้จำลองพฤติกรรมต่างๆ โดยโมเดลทางฟิสิกส์สำหรับแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ใช้คือ โมเดลโครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงาน (energy band structure and band gap), โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (mobility), โมเดลการผสมกลับของพาหะ (recombination) และโมเดลทางแม่เหล็ก (galvanomagnetic) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 โมเดลโครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงาน

(Energy band structure and band gap)

- *Physics { EffectiveIntrinsicDensity (Slotboom) }*

โครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงานจะถูกกำหนดอยู่ใน EffectiveIntrinsicDensity โดยเราจะเลือกใช้โมเดลของ Slotboom (โมเดลทั้งหมดจะมีลักษณะเหมือนกัน แตกต่างกันในพารามิเตอร์) ช่องว่างพลังงาน (band gap) และความหนาแน่นสถานะที่ขอบของแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(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 $E_g(T)$ คือช่องว่างพลังงานที่ขึ้นกับอุณหภูมิของแลตทิซกำหนดโดย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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} เป็นการใส่สถิติของ Fermi แทนสถิติของ Maxwell-Boltzmann เพื่อลดข้อผิดพลาดในการคำนวณ bandgap narrowing โดย bandgap narrowing สำหรับโมเดลของ Slotboom [62, 63] 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 band gap 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $1/2$)

3.3.1.2 โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (Mobility models)

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

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

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

และถ้ามีการใช้โมเดลการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High-field saturation) สภาพคล่องของพาหะขั้นสุดท้ายจะถูกคำนวณเป็นสองขั้นตอน อันดับแรกสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำ (μ_{low}) จะถูกกำหนดตามสมการด้านบน อันดับต่อมาสภาพคล่องของพาหะขั้นสุดท้ายจะถูกคำนวณจากสูตรที่เป็นฟังก์ชันของแรงขับ (driving force) (F_{hfs})

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โมเดลมาตรฐานที่ถูกใช้โดย Device simulation เพื่อจำลองสภาพคล่องของพาหะที่ขึ้นกับการเจือ (doping-dependent mobility) ในซิลิคอนถูกนำเสนอโดย Masetti และคณะ [64]

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

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) ซึ่งเป็นโมเดลสภาพคล่องที่ขึ้นกับการกระเจิงจากโฟนอนเท่านั้น (phonon scattering) ดังนั้นตัวโมเดลจึงขึ้นกับอุณหภูมิของผลึกเพียงอย่างเดียว

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ตัวแปร D และ F จะถูกระบุในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของโมเดล Conwell-Weisskopf สำหรับซิลิคอน

Symbol	Value	Unit
D	1.04×10^{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 จะทำให้ระบุมสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มต่ำได้ตามความสัมพันธ์

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

สำหรับโมเดลการอิ่มตัวสภาพคล่องของพาหะที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High-Field Saturation) ในสนามไฟฟ้าความเข้มสูง ความเร็วลอยเลื่อนของพาหะจะไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าอีกต่อไป แต่ความเร็วจะอิ่มตัวสู่ความเร็วจำกัด v_{sat} โมเดลการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะประกอบไปด้วยโมเดลย่อย 3 โมเดลคือ โมเดลสภาพคล่องจริง (actual mobility model),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลการอิ่มตัวของความเร็ว (velocity saturation model) และโมเดลของแรงขับ (driving force model) โดยโมเดลมาตรฐานของการอิ่มตัวที่สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะเป็นโมเดลของ Canali

โมเดลของ Canali [65] สร้างขึ้นจากสูตรของ Caughey-Thomas (Caughey-Thomas formula) [66] 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_{ch}) ด้วยกำลัง β เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิเนื่องจาก

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

โดยค่าของตัวแปรในสมการด้านบน และตัวแปร α ในสมการด้านบน 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

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

ซึ่งค่าตัวแปรในสมการด้านบนจะแสดงในตารางที่ 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	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่ามาตรฐานสำหรับสนามที่ขับ (driving field) อิเล็กตรอนก็คือ

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

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

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

3.3.1.3 โมเดลการผสมกลับของพาหะ (Generation-Recombination)

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

Shockley-Read-Hall (SRH) Recombination ในแมกนีโตไดโอดแบบคู่เราจะพิจารณาผลของการผสมกลับที่เกิดจากข้อบกพร่องในผลึก 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 Device simulation 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) และระดับพลังงาน

อินทรินซิก (intrinsic level) ค่ามาตรฐานสำหรับซิลิคอนคือ $E_{trap} = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการจำลองแบบด้วยการใช้สถิติของเฟอร์มิสมการด้านบนจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็น

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - \gamma_n \gamma_p n_i^{eff2}}{\tau_p (n + \gamma_n n_1) + \tau_p (p + \gamma_p p_1)} \quad (3.23)$$

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) แสดงดังด้านล่าง สำหรับการเรียกใช้งานจะใช้คำสั่งในส่วนฟิสิกส์เป็น SRH (DopingDependence)

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

ซึ่งค่ามาตรฐานของตัวแปรต่าง ๆ เช่นค่าของช่วงชีวิตพาหะ Shockley-Read-Hall ที่ขึ้นกับการเจือสาร (doping-dependent SRH lifetimes) จะแสดงในตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $f(T)$ ดังสมการด้านบน ซึ่งแสดงดังสมการด้านล่าง (ส่วนนี้ในปัจจุบันมีการอธิบายในสองรูปแบบตามการทดลอง [67, 68]) สำหรับการเรียกใช้งานจะใช้คำสั่งในส่วนฟิสิกส์เป็น SRH (TempDependence)

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

หรือแสดงในรูปของเอกซ์โพเนนเชียล จะใช้คำสั่งเป็น SRH (ExpTempDependence)

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

ซึ่งค่าของตัวแปร T_α และ C จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่ามาตรฐานตัวแปรช่วงชีวิตพาหะ 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 ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า ความเข้มสูง เราไม่ควรละเลยถ้าหากสนามไฟฟ้าเกินค่าประมาณ 3×10^5 โวลต์ต่อเซนติเมตร ในบางบริเวณของอุปกรณ์

โมเดลในส่วนนี้จะสามารถระบุได้สองรูปแบบคือ โมเดลการทะลุทะลวงโดยมีกับดักพาหะช่วย (trap-assisted tunneling) ของ Schenk [69] และ Hurkx [70] ซึ่งโมเดลของ Hurkx ยังสามารถใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาอัตราการจับและปลดปล่อยพาหะ (capture and emission rates) ได้ด้วย สำหรับการเรียกใช้งานจะใช้คำสั่งในส่วนฟิสิกส์เป็น SRH (ElectricField (Schenk | Hurkx))

โมเดลของ Schenk จะถูกระบุในฟังก์ชันที่ขึ้นกับความเข้มของสนาม $g_c(F)$ ในสมการช่วงชีวิตของพาหะ Shockley-Read-Hall (สมการ $\tau_c = \tau_{dop} \frac{f(T)}{1 + g_c(F)}$) ในกรณีของอิเล็กตรอน $g_c(F)$ จะอยู่ในรูป

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

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

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

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

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

สำหรับอิเล็กตรอน E_t จะสัมพันธ์กับระดับพลังงานของข้อบกพร่อง (defect level) E_{trap} ของสมการด้านบนโดย

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดล Rydberg ความหนาแน่นอิเล็กตรอน n ในสมการ $R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}$ แทนที่ด้วย

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

โดย E_0 และ E_t แสดงตามสมการด้านบนส่วน 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, $E_{trap} = 0$ eV, $S = 3.5$, และ $\hbar\omega = 0.068$ eV

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

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

ได้ผลเฉลยโดยประมาณ

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

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

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

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

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

ในโมเดลการผสมกลับ SRH ที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น สำหรับแมกนีโตไดโอดแบบคู่เราจะพิจารณาเพียงการผสมกลับที่ขึ้นกับความเข้มข้นของการเจือเพียงอย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองแบบเราจะละเลยเรื่องของอุณหภูมิ โดยจะจำลองแบบอุปกรณ์ในอุณหภูมิกึ่งที่ 300 เคลวิน จึงทำให้เทอมที่ขึ้นกับอุณหภูมิ $f(T)$ ในสมการ $\tau_c = \tau_{dop} \frac{f(T)}{1 + g_c(F)}$ มีค่าเท่ากับ 1 (อ้างอิงตาม

สมการ $f(T) = \left(\frac{T}{300K}\right)^{T_\alpha}$ และ $f(T) = e^{c\left(\frac{T}{300K}-1\right)}$) 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 ของพาหะในสมการ

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad \text{จะถูกแทนที่ด้วย} \quad \frac{\tau_p}{1 + \tau_p / \tau_p^{TAA}} \quad (3.38)$$

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

โดย TAA lifetime ในสมการด้านบนขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะตามการประมาณจาก [71-73]

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

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

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

ดังนั้นอัตราการผสมกลับแบบ TAA จะเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เนื่องจากในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ฮอลล์ของจริงจะมีการสร้างชั้นออกไซด์บริเวณผิวเพื่อทำเป็นชั้นป้องกัน ดังนั้นในส่วนการผสมกลับเราจึงเพิ่มโมเดลการผสมกลับแบบ SRH ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและออกไซด์ และกำหนดหน้าสัมผัสระหว่างซิลิคอนและออกไซด์ของซิลิคอนเข้าไปด้วย โดยใช้คำสั่ง

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

โมเดลการผสมกลับที่ผิวเป็นโมเดลที่พัฒนามาจากโมเดล SRH เนื่องจากที่ผิวหรือรอยต่อของวัสดุสองชนิดมักเกิดพันธะที่ขาดหรือข้อบกพร่องผลึกขึ้น (dangling bond or defect) ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าบริเวณเหล่านี้เป็นศูนย์กลางการผสมกลับหรือระดับกับดัก (recombination center or trap level) [74] 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

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

สำหรับสถิติเฟอร์มีตัวสมการจะถูกเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับสมการอัตราการผสมกลับแบบ SRH ในเนื้อสาร โดยทั่วไปแล้วความเร็วในการผสมกลับที่ผิวจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารเจือที่ผิว (อ้างอิงตามผลของ Cuevas สำหรับซิลิคอนที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส [75]) โดยเฉพาะในกรณีที่ความเข้มข้นการเจือมีการเปลี่ยนแปลงไปตามหน้าสัมผัส โมเดลนี้ยิ่งมีความจำเป็นต่อการจำลองแบบอย่างมาก ใน Device simulation โมเดลความเร็วการผสมกลับที่ผิวที่ขึ้นกับการเจือสารจะแสดงดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรของโมเดลการผสมกลับที่ผิวแบบ SRH

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

3.3.1.4 โมเดลสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)

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

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เราจะใช้โมเดลการขนส่งพาหะแบบกัลวานิก (Galvanic transport model) ซึ่งเป็นโมเดลที่อาศัยสมการความหนาแน่นกระแสการแพร่-ลอยเลื่อนที่เพิ่มทอมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไป โดยสิ่งที่กระทำต่อสมการขนส่ง (transport equations) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์นั้น เป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ที่มีต่อพาหะ [75-77] ด้วยเหตุนี้สมการความหนาแน่นกระแสจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1 + (\mu_\alpha^* B)^2} \left[\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha) \right] \quad (3.46)$$

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 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mu_n^* = r_n \mu_n$ 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 $r_p = -0.7$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

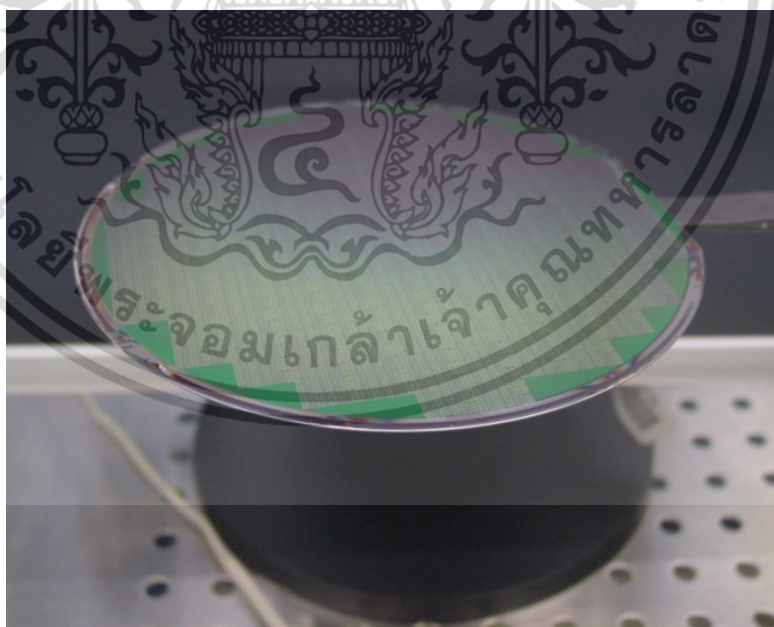
บทที่ 4

ผลการทดลองวิเคราะห์และอภิปรายผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อทำความเข้าใจกลไกการทำงานของกระแสในแมกนีโตไดโอดแบบคู่ โดยจะแบ่งวิธีการทดลองออกเป็นสองส่วนคือในส่วนแรกจะตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าเบื้องต้น หลังจากนั้นจะดูการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ได้สร้างขึ้น ส่วนต่อมากจะทำการศึกษาการจำลองแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่เพื่อศึกษากลไกกระแสที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์และคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ ภายในอุปกรณ์โดยอาศัยโปรแกรม TCAD ความเข้าใจที่ได้จะนำไปสู่การทราบเงื่อนไขในออกแบบเพื่อให้มีความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้น [61]

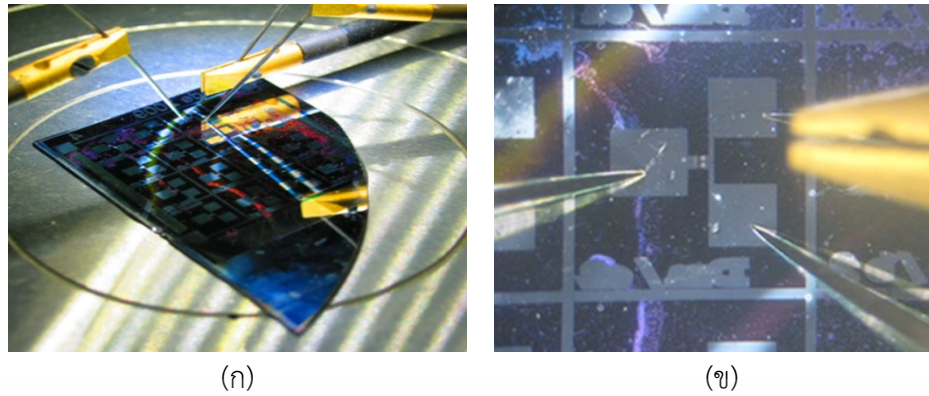
4.1 การวัดคุณสมบัติของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

การวัดคุณสมบัติของแมกนีโตไดโอดแบบคู่จะวัดคุณสมบัติที่สำคัญสองส่วนคือ การวัดคุณสมบัติของรอยต่อเพื่อยืนยันถึงการที่อุปกรณ์มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อของไดโอดและการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยจะทดสอบกับสนามแม่เหล็กหลาย ๆ ค่าเพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าความไวการตอบสนองสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.1 แมกนีโตไดโอดแบบคู่ในแผ่นซิลิคอนที่สร้างเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การตรวจสอบแมกนีไทด์ไดโอด (ก) การใช้โพรบวัดที่แผ่นซิลิคอน (ข) ตัวอุปกรณ์ที่ทดสอบ



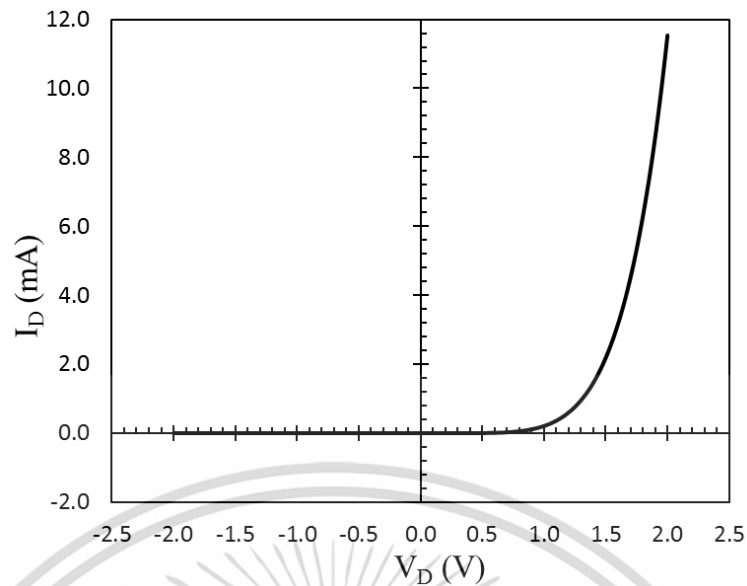
รูปที่ 4.3 แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ที่เชื่อมต่อลวดโลหะติดตั้งลงในบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

จากรูปที่ 4.1 แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่ในแผ่นซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างแล้วเสร็จจะนำมาตรวจสอบโดยอาจจะตัดแบ่งออกมาจากแผ่นดังรูปที่ 4.2 (ก) การใช้โพรบวัดลงที่แผ่นซิลิคอนเพื่อตรวจสอบโดยจะเห็นหัวทั้งสามของอุปกรณ์อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.2 (ข) เมื่อได้ตัวที่สมบูรณ์ไม่ผิดพลาดจะนำไปบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ดังรูปที่ 4.3 อุปกรณ์ที่ได้ก็พร้อมใช้งาน

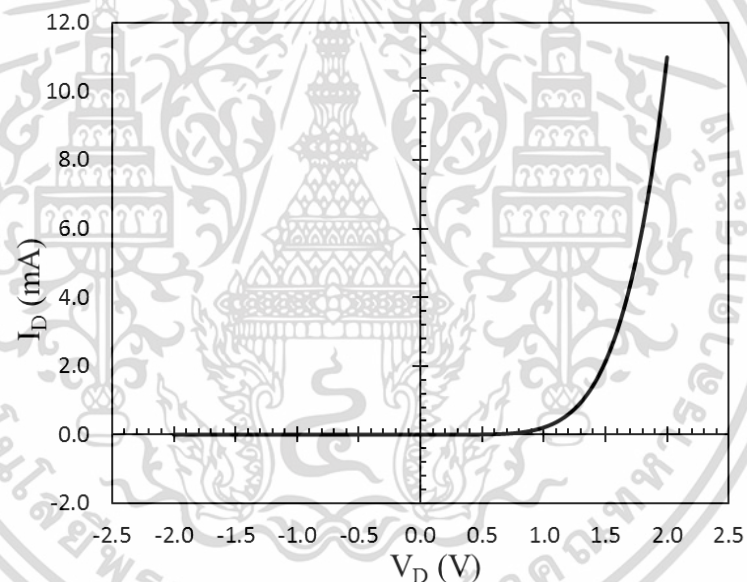
4.1.1 การวัดคุณสมบัติรอยต่อแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่

การวัดคุณสมบัติรอยต่อแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่เป็นวิธีการทดสอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขั้นพื้นฐานที่สำคัญที่ควรทำในลำดับแรก เพื่อยืนยันความเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานได้ผลการวัดกราฟกระแสแรงดันจะยืนยันลักษณะรอยต่อที่เป็นไดโอด ผลการวัดแสดงดังกราฟของกระแสกับแรงดันในรูปที่ 4.4 ที่ระยะความยาวของอุปกรณ์ $L_D = 50 \mu\text{m}$ และ รูปที่ 4.5 ระยะความยาวของอุปกรณ์ $L_D = 60 \mu\text{m}$ ซึ่งแสดงให้เห็นความสมบูรณ์ของรอยต่อภายในอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 คุณสมบัติกระแสแรงดันของรอยต่อที่ขนาด $L_D = 50 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.5 คุณสมบัติกระแสแรงดันของรอยต่อที่ขนาด $L_D = 60 \mu\text{m}$

4.1.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่

ในการใช้งานแมกนีโตไดโอดแบบคู่เพื่อวัดสนามแม่เหล็กจะต้องใช้อุปกรณ์ประกอบเช่นวงจรวัด แหล่งจ่ายสนามแม่เหล็กและเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเพื่อสอบเทียบหาความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง โดยส่วนนี้จะกล่าวถึงวงจรวัดชนิดกระแสคงที่ที่นำมาใช้ทำการทดลอง ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแรงดันในส่วนต่าง ๆ ของวงจรร และผลการทดสอบกับสนามแม่เหล็ก

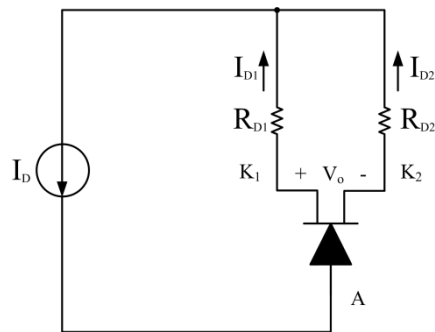
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 วงจรวัดผลตอบสนองของสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่

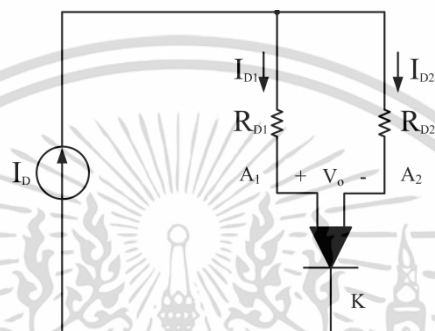
ในการวัดการตอบสนองของสนามแม่เหล็กของเซนเซอร์แมกนีโตไดโอดแบบคู่จะใช้แหล่งจ่ายแรงดันและกระแสที่มีความแม่นยำสูงสัญญาณรบกวนต่ำ เพราะจะทำให้สะดวกในการควบคุมเงื่อนไขในการวัด อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ตัวต้านทาน เครื่องมือวัดสอเทียบขนาดสนามแม่เหล็ก และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการวัด เนื่องจากขนาดของกระแสและแรงดันในวงจรวัดอยู่ในระดับต่ำมาก ๆ และถูกรบกวนได้ง่าย

วงจรวัดสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 วงจรประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสให้ไดโอดแบบคู่ในที่นี้คือกระแส I_D ที่มีความคงที่และสามารถปรับค่าได้ โดยเราจะตั้งค่ากระแสจ่ายเข้าไปให้กับอุปกรณ์ที่จะวัด การทดลองนี้จะทดสอบใช้ค่ากระแส 0.5, 1, 2 และ 3 mA ตามลำดับ ตัวของแมกนีโตไดโอดแบบคู่มีขาใช้งานทั้งหมด 3 ขาในชนิดแคโทดคู่จะมีขาแอนด (A) 1 ขา แคโทด (K) 2 ขาแยกกันออกมา K_1 และ K_2 ส่วนชนิดแอนดคู่ จะมีขาแคโทด (K) 1 ขา แอนด (A) 2 ขาแยกกันออกมา A_1 และ A_2 จากขาที่แยกกันออกมาจะต่อเข้ากับตัวต้านทานสองตัวทำหน้าที่เป็นโหลด คือ R_{D1} กับ R_{D2} โดยมีกระแสไหลออกเป็นสองเส้นทางคือ I_{D1} กับ I_{D2} โดยจะสามารถวัดความแตกต่างออกมาในรูปแรงดันคือวัดที่จุดวัดแรงดัน V_O และวัดความแตกต่างออกมาในรูปของกระแส คือความต่างของกระแส I_{D1} และ I_{D2} กระแสที่ไหลในอุปกรณ์ทั้งสองชนิดแคโทดคู่กับแอนดคู่จะมีทิศทางของกระแสที่ไหลกลับทางกันเท่านั้น

ซึ่งในการวัดสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ($B = 0$) กระแสไดโอดทั้งสองจะมีค่าคงที่ทำให้แรงดันเอาต์พุต (V_O) ที่วัดได้มีค่าคงที่อยู่ที่ค่าหนึ่ง แต่เมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ ($B \neq 0$) โดยมีสองลักษณะคือสนามแม่เหล็กพุ่งเข้ากับพุ่งออกตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ ในกรณีแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ โฮลที่ฉีดจากขั้วแอนด เกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้กระแสไดโอดที่ไหลระหว่างแอนด (A) กับแคโทด 1 (K_1) และกระแสไดโอดที่ไหลระหว่างแอนด (A) กับแคโทด 2 (K_2) เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่วนในกรณีแมกนีโตไดโอดชนิดแอนดคู่ อิเล็กตรอนที่ฉีดจากขั้วแคโทด เกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้กระแสไดโอดที่ไหลระหว่างแคโทด (K) กับแอนด 1 (A_1) และกระแสไดโอดที่ไหลระหว่างแคโทด (K) กับแอนด 2 (A_2) เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ($\Delta I_{D1} \neq 0$ และ $\Delta I_{D2} \neq 0$) ซึ่งเราสามารถวัดในรูปแบบของกระแสได้โดยตรง หรือเมื่อวัดออกมาในรูปแบบแรงดันเอาต์พุตระหว่างขาเกิดเป็นผลต่างของแรงดัน (V_O)



รูปที่ 4.6 วงจรวัดการตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ (Split Cathode)



รูปที่ 4.7 วงจรวัดการตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่ (Split Anode)

4.1.2.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในวงจรวัด

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่กล่าวว่า ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า ณ จุดใด ๆ ของวงจรไฟฟ้าย่อมมีค่าเท่ากับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลออก ณ จุดจุดนั้นของวงจร หรือผลรวมของกระแสไหลเข้าเท่ากับผลรวมของกระแสไหลออกจากจุดนั้นดังในรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 กระแส I_D ที่จ่ายออกไปจะแยกไหลออกเป็นสองเส้นทาง I_{D1} กับ I_{D2} แล้วกลับมารวมกันใหม่ที่แหล่งจ่ายกระแสซึ่งเราสามารถนำมาเขียนได้เป็นความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (4.1)$$

แรงดันขาออก V_o ระหว่างขั้วทั้งสอง

$$V_o = I_{D2}(R_{D2}) - I_{D1}(R_{D1}) \quad (4.2)$$

ในที่นี้เราใช้ R_D ค่าเดียวกัน

$$R_{D1} = R_{D2} = R_D \quad (4.3)$$

ได้แรงดันเอาต์พุตกับกระแสไดโอด

$$V_o = \Delta I_D (R_D) \quad (4.4)$$

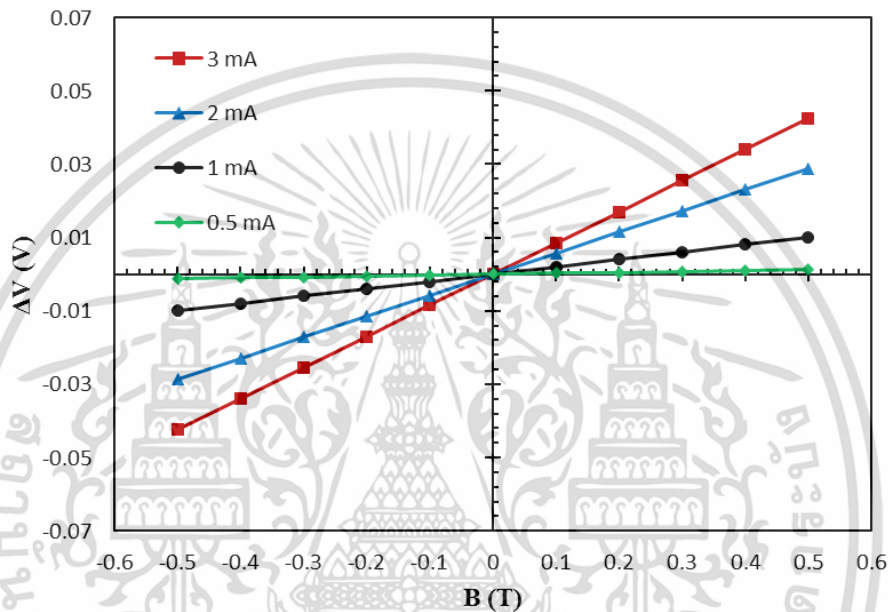
ความแตกต่างกระแสแมกนีโตไดโอดแบบคู่

$$\Delta I_D = I_{D2} - I_{D1} \quad (4.5)$$

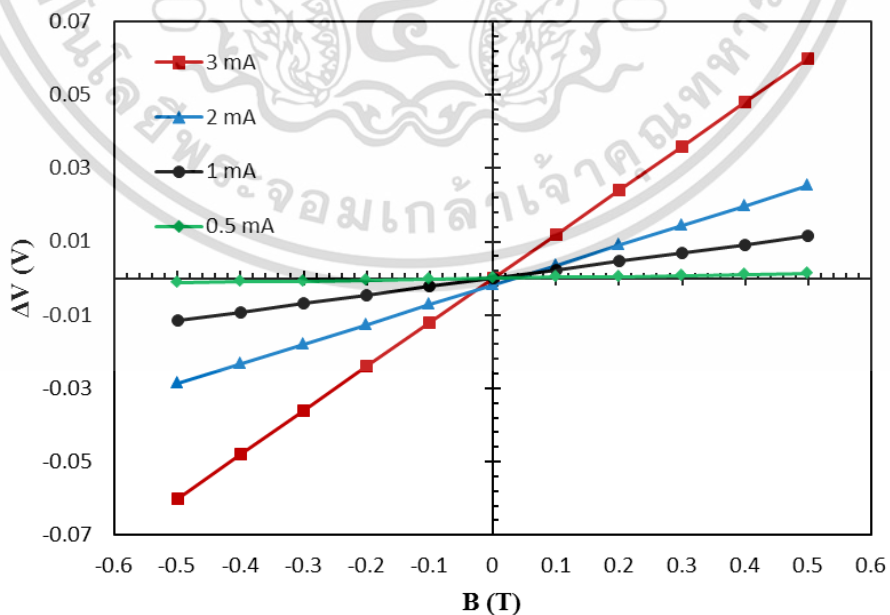
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสอินพุตค่าแตกต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงกระแสอินพุตที่มีผลต่อเอาต์พุตของแมกนีโตไดโอดแบบควีนในการตอบสนองกับสนามแม่เหล็ก โดยมีระยะเบี่ยงเบนพาหะ $L_D = 50 \mu\text{m}$ และความกว้างของขั้วฉีดพาหะ $W_E = 50 \mu\text{m}$ จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.1 แสดงกระแสไบอัสแตกต่างกัน 4 ค่าคือ 0.5, 1, 2 และ 3 mA ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง -0.5 ถึง 0.5 T โดยลักษณะกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่สมมาตรทั้งช่วงบวกและช่วงลบ และมีความชันเพิ่มมากขึ้นถ้าให้กระแสไบอัสที่มากขึ้นทำให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดีขึ้น



รูปที่ 4.8 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก $W_E = 50 \mu\text{m}$, $L_D = 50 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.9 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก $W_E = 60 \mu\text{m}$, $L_D = 60 \mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.1 ซึ่งจะมีขนาดของอุปกรณ์ $L_D = 60 \mu\text{m}$ และ $W_E = 60 \mu\text{m}$ ทดสอบด้วยสนามแม่เหล็ก B ขนาด -0.5 ถึง 0.5 T ใช้กระแสไบอัส $0.5, 1, 2$ และ 3 mA ตามลำดับ โดยวัดออกมาในรูปแรงดันเออร์ทพุด (V_o) โดยจะพบว่ากราฟการตอบสนองจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่สมมาตรทั้งช่วงบวกและช่วงลบและมีความชันเพิ่มมากขึ้น ถ้าให้กระแสไบอัสที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน

ในการหาความไวในการตอบสนองจะใช้ความไวในการตอบสนองแบบสัมบูรณ์ (S_A) โดยหาได้จากความแตกต่างของกระแสไดโอด ΔI_D ต่อค่าความต่างของสนามแม่เหล็ก (ΔB)

$$S_A = \frac{\Delta I_D R_D}{\Delta B} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไบอัสแตกต่างกัน

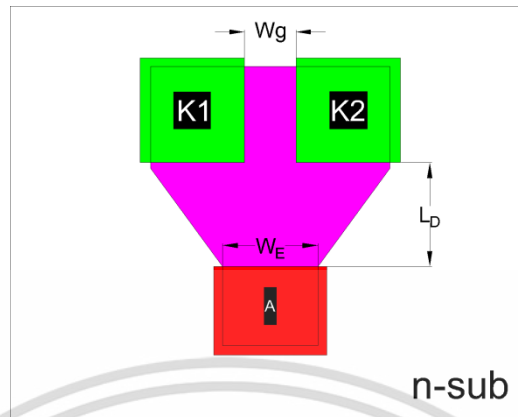
กระแสไบอัส (mA)		0.5	1	2	3
ความไวการตอบสนอง (S_A) (T^{-1})	$W_E = 50$ $L_D = 50$	0.0025	0.0200	0.0575	0.085
	$W_E = 60$ $L_D = 60$	0.0025	0.0230	0.0540	0.1200

จากการหาความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบสัมบูรณ์ (S_A) ที่ขนาดขนาดขั้วปล่อยพาหะ $W_E = 50 \mu\text{m}$ และระยะเบี่ยงเบนพาหะ $L_D = 50 \mu\text{m}$ ได้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก $0.0025, 0.0200, 0.0575$ และ 0.085 mV/T โดยให้กระแสไบอัส $0.5, 1, 2$ and 3 mA ตามลำดับ และที่ขนาดขั้วปล่อยพาหะ $W_E = 60 \mu\text{m}$ และระยะเบี่ยงเบนพาหะ $L_D = 60 \mu\text{m}$ ได้เป็นความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก $0.0025, 0.0230, 0.0540$ และ 0.1200 mV/T ที่กระแสไบอัส $0.5, 1, 2$ และ 3 mA ตามลำดับ เราจะพบว่าที่ระยะ $L_D = 60 \mu\text{m}$ มีค่าความชันของกราฟ หรือความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กมากกว่าระยะ $L_D = 50 \mu\text{m}$

4.2 ผลการจำลองการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ด้วยโปรแกรม TCAD

ผลการจำลองแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่เพื่อดูผลการตอบสนองต่อแม่เหล็กที่ได้ทำการศึกษาทั้งสองโครงสร้างคือแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่ โดยศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะเป็นประเด็นสำคัญ เพื่อจะได้รู้ถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่จะทำให้ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสูงขึ้น คาดว่าเมื่อเข้าใจกลไกกระแสเหล่านี้จะนำไปออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ดีขึ้นต่อไป

4.2.1 การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

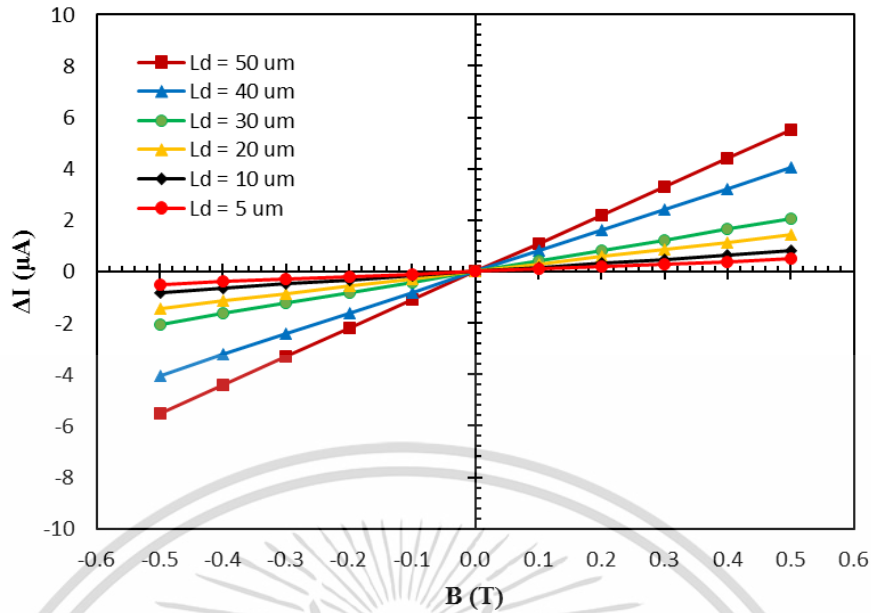


รูปที่ 4.10 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่สำหรับการจำลองแบบ

การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่มีโครงสร้างและขนาดดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่ามีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีขั้วแอโนดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี และมีขั้วแคโทดสองขาเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทด W_g มีระยะห่างระหว่างขั้วฉีดพาหะขั้วแอโนดกับแคโทด L_D และความกว้างของพื้นที่ปล่อยหรือฉีดพาหะ W_E

4.2.1.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะแตกต่างกัน

ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวให้แตกต่างกันดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.2 ใช้สนามแม่เหล็ก -0.5 ถึง 0.5 T ในการจำลองแบบ ใช้กระแสไบอัสที่ 1 mA ผลการจำลองแบบความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์ (S_R) ได้เป็น $0.987, 1.611, 2.870, 4.097, 8.076,$ และ 11.01 T⁻¹ ที่ระยะ L_D เท่ากับ $5, 10, 20, 30, 40$ และ 50 μm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะความยาว L_D มากขึ้นจะได้รับความชันของกราฟที่มากขึ้นหรือมีการตอบสนองที่มากขึ้นกว่าระยะ L_D ที่สั้น สำหรับในช่วงความยาว 5 ถึง 50 μm

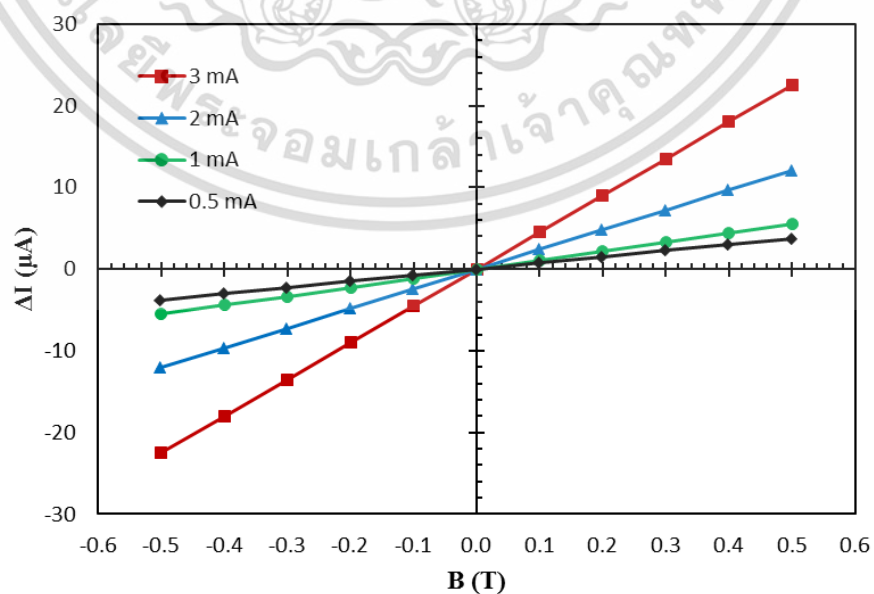


รูปที่ 4.11 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน

ตารางที่ 4.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน

ระยะเบี่ยงเบนพาหะ (L_D) (μm)	5	10	20	30	40	50
ความไวการตอบสนอง (S_R) (T^{-1})	0.987	1.611	2.870	4.097	8.076	11.01

4.2.1.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสไบอัสแตกต่างกัน



รูปที่ 4.12 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสต่างกัน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การตอบสนองของสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสต่างกัน

กระแสไบอัส (mA)	0.5	1	2	3
ความไวการตอบสนอง (S_R) (T^{-1})	7.506	11.09	24.08	45.08

การจำลองแบบเพื่อทดสอบการเปลี่ยนค่ากระแสไบอัสจากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.3 ใช้สนามแม่เหล็ก -0.5 ถึง 0.5 T ใช้ค่าระยะ $L_D = 50$ μm ผลปรากฏว่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์ (S_R) ได้เป็น 7.506, 11.09, 24.08 และ 45.08 T^{-1} โดยใช้ค่ากระแสไบอัส 0.5, 1, 2 และ 3 mA ตามลำดับ ที่ค่ากระแสไบอัสค่าสูงจะมีความไวในการตอบสนองมากกว่าค่ากระแสต่ำ

4.2.1.3 ความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

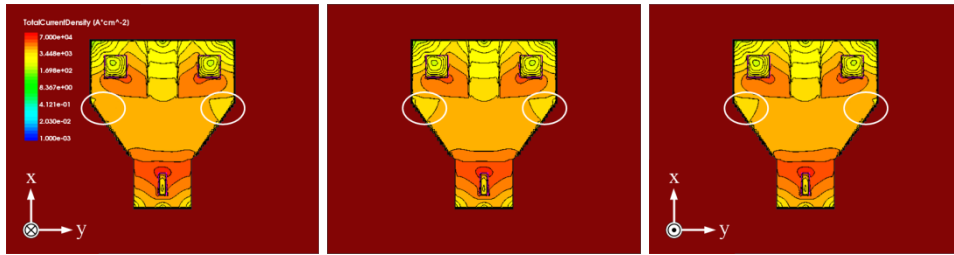
ความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ในการวิเคราะห์จะแยกได้ออกมาเป็นกระแส 3 ส่วนด้วยกันคือกระแสรวมกระแสโฮลและกระแสอิเล็กตรอน โดยผลการจำลองแบบแสดง ความเข้มข้นของพาหะจะแสดงตามลำดับของสี่ตั้งแต่น้อยสุดสี่ฟ้าไปยังมากที่สุดสี่แดง โดยการสังเกต รูปทรงของพาหะที่เคลื่อนที่ไปจะทำให้ทราบทิศทางและขนาดของกระแสได้ ทิศทางการเบี่ยงเบนของกลุ่มพาหะก็จะขึ้นอยู่กับชนิดว่าเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งจะเบี่ยงเบนไปตามแรงลอเรนซ์ กระแสรวมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากกระแสโฮลเป็นหลักมีส่วนของกระแสอิเล็กตรอนเป็นส่วนน้อย

ความหนาแน่นกระแสรวมในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

จากรูปที่ 4.13 จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งแสดงออกมาในรูปของกระแสรวม (Total current : I_T) หรือกระแสโฮลกับอิเล็กตรอนรวมกันจะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลมาจากขั้วแอโนดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีแล้วไหลออกไปยังพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะแล้วแยกไหลออกไปยังขั้วแคโทดทั้งสองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูปตรงกลางจะเป็นสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามา ในรูปวงกลมสีขาวที่เป็นจุดสังเกต บริเวณวงกลมทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่สมมาตรกันทำให้กระแสรวม ที่ขั้วแคโทดทั้งสองไหลออกไปในปริมาณที่เท่าๆกัน จากรูปที่ 4.13 ด้านซ้ายจากสัญลักษณ์กากบาทปลายลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าไปตั้งฉากกับผิวหน้า(-z) ในวงกลมสีขาวที่เป็นจุดสังเกต บริเวณวงกลมทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกัน โดยจะเบี่ยงไปด้านซ้ายทำให้กระแสรวม ที่ขั้วแคโทดทั้งสองไหลออกไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลออกไปยังขั้วแคโทด 1 มากกว่า แคโทด 2 จากรูปที่ 4.13 ด้านขวาจากสัญลักษณ์จุดหัวลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งออกมาตั้งฉากกับผิวหน้า(+z) ในวงกลมสีขาวที่เป็นจุดสังเกต บริเวณวงกลมทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านขวา ทำให้กระแสรวมที่ขั้วแคโทดทั้งสองไหลออกไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลออกไปยังขั้วแคโทด 2 มากกว่า แคโทด 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กระแสรวมแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ Total current (I_T)

ความหนาแน่นกระแสโฮลในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

จากรูปที่ 4.14 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งแยกแสดงออกมาเฉพาะกระแสโฮล (Hole current : I_h) จะเห็นได้ว่าจะมีกระแสโฮลไหลมาจากขั้วแอโนดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีแล้วไหลออกไปยังพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะแล้วแยกไหลออกไปยังขั้วแคโทดทั้งสองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูปกลางจะเป็นสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามา ในรูปสังเกตรูปทรงของพาหะที่เคลื่อนที่ไปมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่สมมาตรกัน ทำให้กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองไหลออกไปในปริมาณที่เท่า ๆ กัน จากรูปที่ 4.14 ด้านซ้ายจากสัญลักษณ์กากบาทปลายลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าไปตั้งฉากกับผิวหน้า (-z) มีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านซ้ายทำให้กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองมีปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแคโทด 1 มากกว่า แคโทด 2 จากรูปที่ 4.14 ด้านขวาจากสัญลักษณ์จุดหัวลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งออกมาตั้งฉากกับผิวหน้า (+z) สังเกตรูปทรงบริเวณทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านขวา ทำให้กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแคโทด 2 มากกว่า แคโทด 1



รูปที่ 4.14 กระแสโฮลแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ Hole current (I_h)

ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

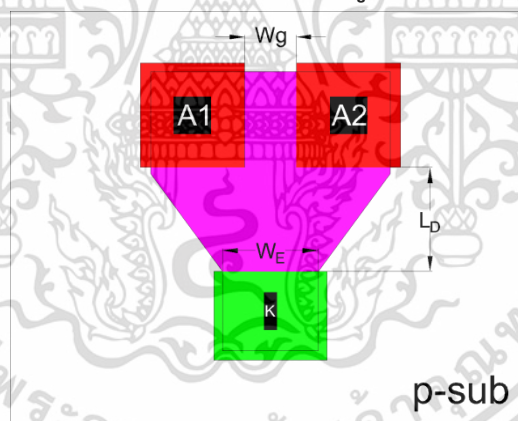
จากรูปที่ 4.15 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งแยกแสดงออกมาเฉพาะกระแสอิเล็กตรอน (Electron current: I_e) จะเห็นได้ว่ามีอิเล็กตรอนไหลเนื่องจากสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นกระแสแตริฟท์มาจากขั้วแคโทดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วไหลออกไปยังพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะ โดยจะชดเชยอิเล็กตรอนที่รวมตัวกับโฮลที่ฉีดมาจากขั้วแอโนดสังเกตได้ว่าจะมีความหนาแน่นมากที่บริเวณขั้วแคโทดแล้วค่อย ๆ ลดลงไปยังขั้วแอโนด รูปตรงกลางจะเป็นสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามา ในรูปสังเกตรูปร่างของพาหะที่เคลื่อนที่ไปมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่สมมาตรกันทำให้กระแส ที่ขั้วแคโทดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่เท่าๆกัน จากรูปที่ 4.15 ด้านซ้ายจากสัญลักษณ์กากบาทปลายลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าไปตั้งฉากกับผิวหน้า(-z) มีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านซ้ายทำให้กระแสที่ปรากฏยังขั้วแคโทดทั้งสองมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน มีกระแสไหลไปยังขั้วแคโทด 1 มากกว่า แคโทด 2 จากรูปที่ 4.15 ด้านขวาจากสัญลักษณ์จุดหัวลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งออกมา (+z) ตั้งฉากกับผิวหน้า สังเกตรูปร่างบริเวณทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านขวา ทำให้กระแสที่ปรากฏยังขั้วแคโทดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแคโทด 2 มากกว่า แคโทด 1



รูปที่ 4.15 กระแสอิเล็กตรอนแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ Electron current (I_e)

4.2.2 การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่



รูปที่ 4.16 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่สำหรับการจำลองแบบ

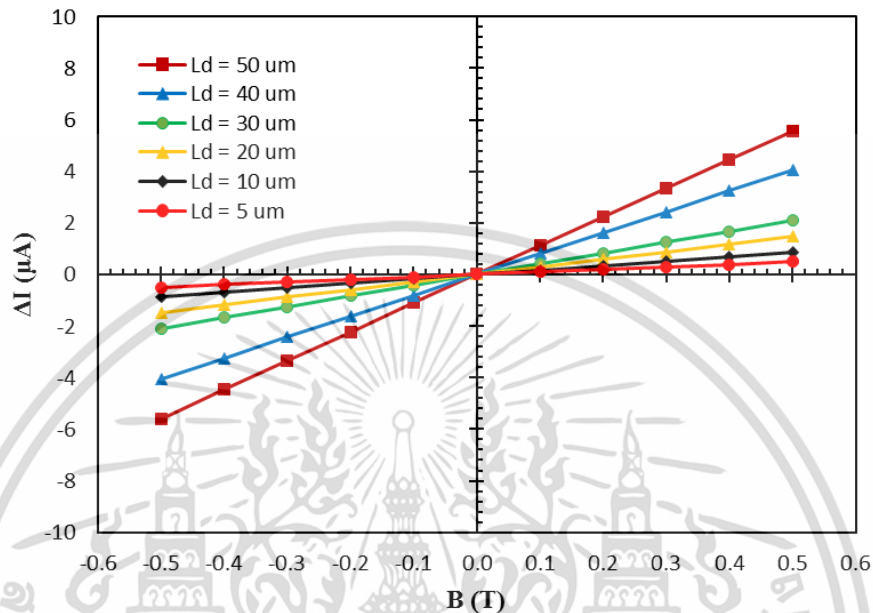
การจำลองแบบแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่มีโครงสร้างและขนาดดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่ามีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีขั้วแคโทดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และมีขั้วแอนโนดสองขาเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระยะห่างระหว่างขั้วแอนโนด W_g มีระยะห่างระหว่างขั้วฉีดพาหะขั้วแคโทดกับแอนโนด L_D และความกว้างของพื้นที่ปล่อยหรือฉีดพาหะ W_E

4.2.2.1 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะแตกต่างกัน

ผลการตอบสนองสนามแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนแปลงระยะความยาวให้แตกต่างกันดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.4 ใช้สนามแม่เหล็ก -0.5 ถึง 0.5 T ในการจำลองแบบใช้กระแสไบอัสที่ 1 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองแบบความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์ (S_R) ได้เป็น 0.989, 1.702, 2.936, 4.177, 8.106 และ 11.19 T^{-1} ที่ระยะ L_D เท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 μm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะความยาว L_D มากขึ้นจะได้รับความชันของกราฟที่มากขึ้นหรือมีการตอบสนองที่มากขึ้นกว่าระยะ L_D ที่สั้น สำหรับในช่วงความยาว 5 ถึง 50 μm



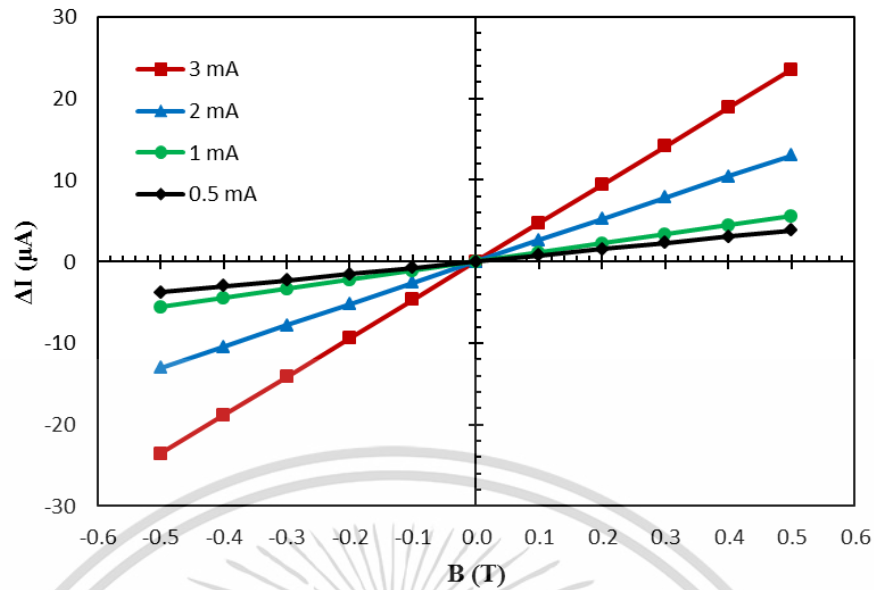
รูปที่ 4.17 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคูที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน

ตารางที่ 4.4 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคูที่ระยะเบี่ยงเบนพาหะต่างกัน

ระยะเบี่ยงเบนพาหะ (L_D) (μm)	5	10	20	30	40	50
ความไวการตอบสนอง (S_R) (T^{-1})	0.989	1.702	2.936	4.177	8.106	11.19

4.2.2.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็กที่กระแสไบอัสแตกต่างกัน

การจำลองแบบเพื่อทดสอบการเปลี่ยนค่ากระแสไบอัสจากรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.5 ใช้สนามแม่เหล็ก -0.5 ถึง 0.5 T ใช้ค่าระยะ $L_D = 50 \mu m$ ผลปรากฏว่าความไวในการตอบสนองสนามแม่เหล็กแบบสัมพัทธ์ (S_R) ได้เป็น 7.606, 11.18, 26.09 และ 47.09 T^{-1} โดยใช้ค่ากระแสไบอัส 0.5, 1, 2 และ 3 mA ตามลำดับ ที่ค่ากระแสไบอัสค่าสูงจะมีความไวในการตอบสนองมากกว่าค่ากระแสสั้น



รูปที่ 4.18 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดดคู่ที่กระแสไบอัสต่างกัน

ตารางที่ 4.5 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสแตกต่างกัน

กระแสไบอัส (mA)	0.5	1	2	3
ความไวการตอบสนอง (S_R) (T^{-1})	7.606	11.18	26.09	47.09

4.2.2.3 ความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดดคู่

ความหนาแน่นกระแสในแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดดคู่ในการวิเคราะห์จะแยกได้ออกมาเป็นกระแส 3 ส่วนด้วยกันคือกระแสรวมกระแสอิเล็กตรอนและกระแสโฮล โดยผลการจำลองแบบแสดง ความเข้มข้นของพาหะจะแสดงตามลำดับของสีตั้งแต่น้อยสุดสีฟ้าไปยังมากที่สุดสีแดง โดยการสังเกต รูปทรงของพาหะที่เคลื่อนที่ไปจะทำให้ทราบทิศทางและขนาดของกระแสได้ ทิศทางการเบี่ยงเบนของ กลุ่มพาหะก็จะขึ้นอยู่กับชนิดว่าเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮล ซึ่งจะเบี่ยงเบนไปตามแรงลอเรนซ์ กระแสรวมที่เกิดขึ้นจะเกิดจากกระแสอิเล็กตรอนเป็นหลักมีส่วนของกระแสโฮลเป็นส่วนน้อย

ความหนาแน่นกระแสรวมในแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดดคู่

จากรูปที่ 4.19 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งแสดงออกมาในรูปของกระแสรวม (Total current : I_T) หรือกระแสโฮลกับอิเล็กตรอนรวมกันจะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลมาจากขั้ว แคโทดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วไหลออกไปยังพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะแล้วแยกไหลออกไปยัง ขั้วแอนโดดทั้งสองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี รูปตรงกลางจะเป็นสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก เข้ามาบริเวณเบี่ยงเบนพาหะมีลักษณะที่สมมาตรกันทำให้กระแสรวม ที่ขั้วแอนโดดทั้งสองไหลออกไป

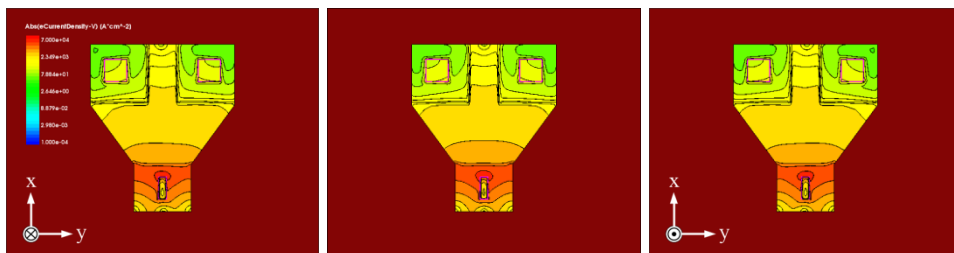
ในปริมาณที่เท่าๆกัน จากรูปที่ 4.19 ด้านซ้ายจากสัญลักษณ์กากบาทปลายลูกศรที่มี สนามแม่เหล็กพุ่งเข้าไปตั้งฉากกับผิวหน้า (-z) บริเวณเบี่ยงเบนพาหะลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกัน ทำให้กระแสรวม ที่ขั้วแอโนดทั้งสองไหลออกไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันโดยจะเบี่ยงไปด้านขวามีกระแสไหลออกไปยังขั้วแอโนด 2 มากกว่า ขั้วแอโนด 1 จากรูปที่ 4.19 ด้านขวาจากสัญลักษณ์จุดหัวลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งออกมาตั้งฉากกับผิวหน้า (+z) ในบริเวณเบี่ยงเบนพาหะมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านซ้าย ทำให้กระแสรวมที่ขั้วแอโนดทั้งสองไหลออกไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลออกไปยังขั้วแอโนด 1 มากกว่า แอโนด 2



รูปที่ 4.19 กระแสรวมแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่ Total current (I_T)

ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนในแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่

จากรูปที่ 4.20 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งแยกแสดงออกมาเฉพาะกระแสอิเล็กตรอน (Electron current : I_e) จะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลมาจากขั้วแคโทดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วไหลออกไปยังพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะแล้วแยกไหลออกไปยังขั้วแอโนดทั้งสองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี รูปตรงกลางจะเป็นสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามา ในรูปสังเกตรูปทรงของพาหะที่เคลื่อนที่ไปมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่สมมาตรกัน ทำให้กระแสที่ขั้วแอโนดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่เท่าๆกัน จากรูปที่ 4.20 ด้านซ้ายจากสัญลักษณ์กากบาทปลายลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าไปตั้งฉากกับผิวหน้า (-z) มีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านขวา ทำให้กระแสที่ขั้วแอโนดทั้งสองมีปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแอโนด 2 มากกว่า แอโนด 1 จากรูปที่ 4.20 ด้านขวาจากสัญลักษณ์จุดหัวลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งออกมาตั้งฉากกับผิวหน้า(+z) สังเกตรูปทรงบริเวณทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านซ้าย ทำให้กระแสที่ขั้วแอโนดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแอโนด 1 มากกว่า แอโนด 2



รูปที่ 4.20 กระแสอิเล็กตรอนแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่ Electron current (I_e)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสโฮลในแมกนีไทโดไดโอดชนิดแอนนาคู่

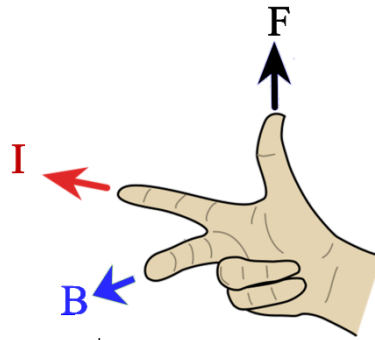
จากรูปที่ 4.21 เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของพาหะซึ่งแยกแสดงออกมาเฉพาะกระแสโฮล (Hole current : I_h) จะเห็นได้ว่าจะมีกระแสไหลมาจากขั้วแอนโนดทั้งสองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีแล้วไหลออกไปยังพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะแล้วไหลออกไปยังขั้วแคโทดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รูปตรงกลางจะเป็นสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามา ในรูปสังเกตรูปทรงของพาหะที่เคลื่อนที่ไปมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่สมมาตรกัน ทำให้กระแสที่ขั้วแอนโนดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่เท่า ๆ กัน จากรูปที่ 4.21 ด้านซ้ายจากสัญลักษณ์กากบาทปลายลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าไปตั้งฉากกับผิวหน้า(-z) มีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านขวาทำให้กระแสโฮลที่ขั้วแอนโนดทั้งสองมีปริมาณไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแอนโนด 2 มากกว่า แอนโนด 1 จากรูปที่ 4.21 ด้านขวาจากสัญลักษณ์จุดหัวลูกศรที่มีสนามแม่เหล็กพุ่งออกมาตั้งฉากกับผิวหน้า(+z) สังเกตรูปทรงบริเวณทั้งสองด้านมีลักษณะความหนาแน่นพาหะที่ไม่สมมาตรกันโดยจะเบี่ยงไปด้านซ้าย ทำให้กระแสโฮลที่ขั้วแอนโนดทั้งสองไหลไปในปริมาณที่ไม่เท่ากันมีกระแสไหลไปยังขั้วแอนโนด 1 มากกว่า แอนโนด 2



รูปที่ 4.21 กระแสโฮลแมกนีไทโดไดโอดชนิดแอนนาคู่ Hole current (I_h)

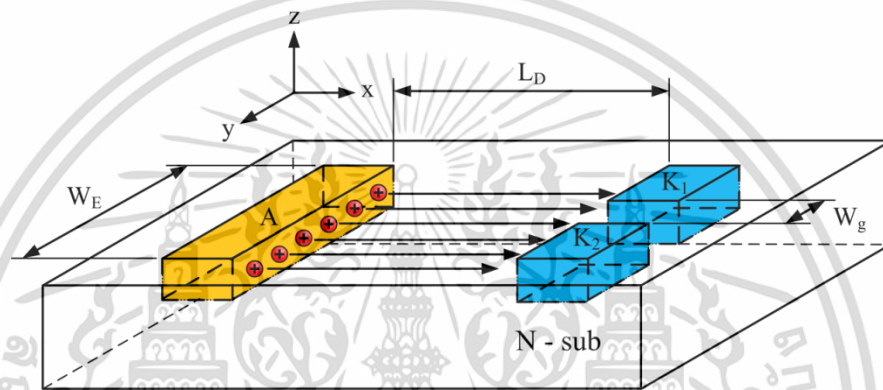
4.3 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทโดไดโอดแบบคู่

แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทโดไดโอดแบบคู่ทั้งสองแบบทั้งชนิดแคโทดคู่และแอนโนดคู่มีความคล้ายคลึงกันแต่จะกลับชนิดเป็นตรงกันข้าม ในที่นี้เราจะพิจารณาเฉพาะพาหะส่วนใหญ่ในแต่ละโครงสร้าง แมกนีไทโดไดโอดชนิดแคโทดคู่ก็จะใช้โฮลและแมกนีไทโดไดโอดชนิดแอนโนดคู่จะใช้อิเล็กตรอนแสดงการทำงาน การหาทิศทางเบี่ยงเบนของพาหะจะใช้กฎมือขวาโดยถ้าเป็นชนิดแคโทดคู่จะใช้กระแสโฮลดังรูปที่ 4.22 โดยนิ้วชี้จะเป็นกระแส I_h โฮลตามทิศของกระแสนิยม ถ้าเป็นชนิดแอนโนดคู่กระแสจะเป็นกระแสอิเล็กตรอน I_e ไหลไปแล้วคิดเป็นทิศกระแสนิยมหรือกระแสสมมุติย้อนสวนกลับมา เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาทางทิศนี้วกกลาง ทิศทางของพาหะจะเบี่ยงเบนไปในทิศนี้ไว้ปั้งหรือหัวแม่มือจึงนำไปใช้หาทิศทางพาหะได้



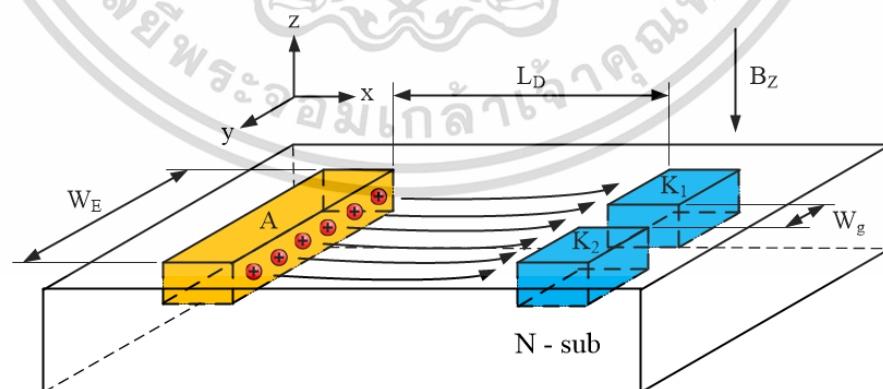
รูปที่ 4.22 กฎมือขวาใช้หาทิศทางแรงเบี่ยงเบนพาหะตามทิศทางกระแสอิเล็กตรอนและโฮล

4.3.1 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่



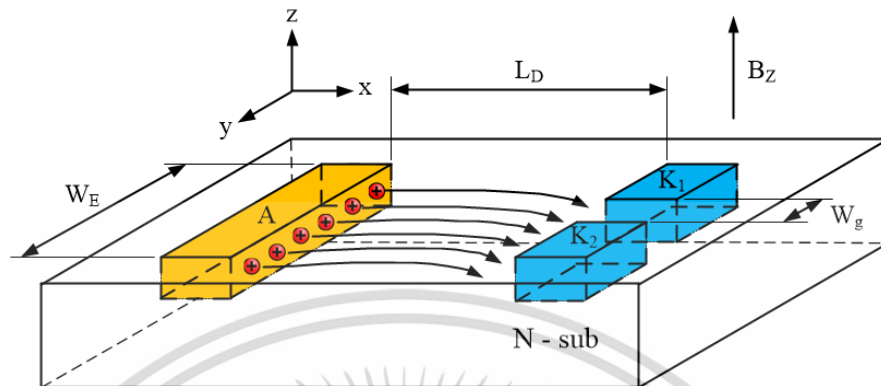
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่ของโฮลแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ไม่มีสนามแม่เหล็ก $B_z = 0$

จากรูปที่ 4.23 แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่มีทั้งพาหะที่เป็นโฮลและอิเล็กตรอนแต่โฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่จึงสร้างแบบจำลองอย่างง่ายได้ตั้งรูปโดยโฮลจะใช้สัญลักษณ์วงกลมแสดงประจุบวกเมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามา $B_z = 0$ โฮลเคลื่อนที่จากขั้วแอโนด A ไหลไปในทิศทาง $+x$ แล้วผ่านบริเวณเบี่ยงเบนพาหะแล้วไหลออกไปยังขั้ว K_1 ในปริมาณใกล้เคียงกับขั้ว K_2



รูปที่ 4.24 การเคลื่อนที่ของโฮลแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่มีสนามแม่เหล็กในทิศ $-B_z$

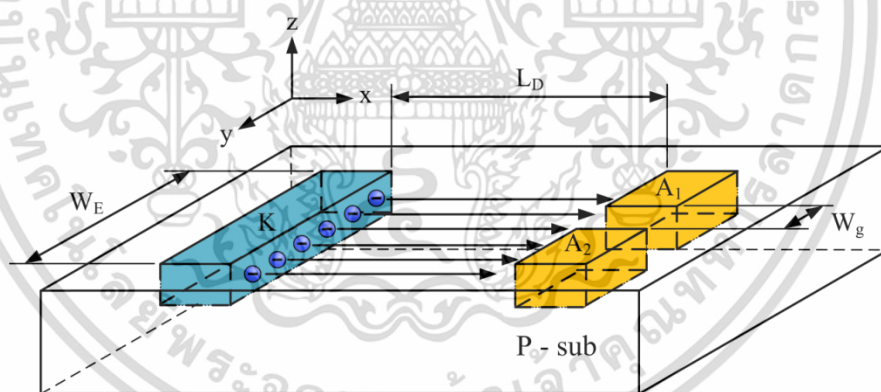
จากรูปที่ 4.24 การเบี่ยงเบนของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลเมื่อมีกระแสไหลในทิศทาง $+x$ แล้วเราให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทาง $-z$ ก็จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์หลักโฮลไปในทิศทางตามแนวแกน $-y$ ทำให้โฮลไหลไปออกยังขั้ว K_1 มากกว่า K_2



รูปที่ 4.25 การเคลื่อนที่ของโฮลแมกนีไทโดโอดชนิดแคโทดคู่มีสนามแม่เหล็กในทิศ $+B_z$

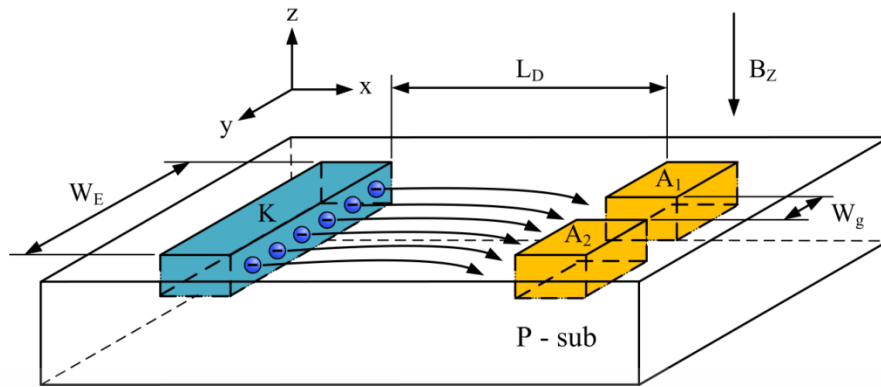
จากรูปที่ 4.25 การเบี่ยงเบนของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮลเมื่อมีกระแสไหลในทิศทาง $+x$ แล้วเราให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทาง $+z$ ก็จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์หลักโฮลไปในทิศทางตามแนวแกน $+y$ ทำให้โฮลไหลไปออกยังขั้ว K_2 มากกว่า K_1

4.3.2 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะแมกนีไทโดโอดชนิดแอนโนดคู่



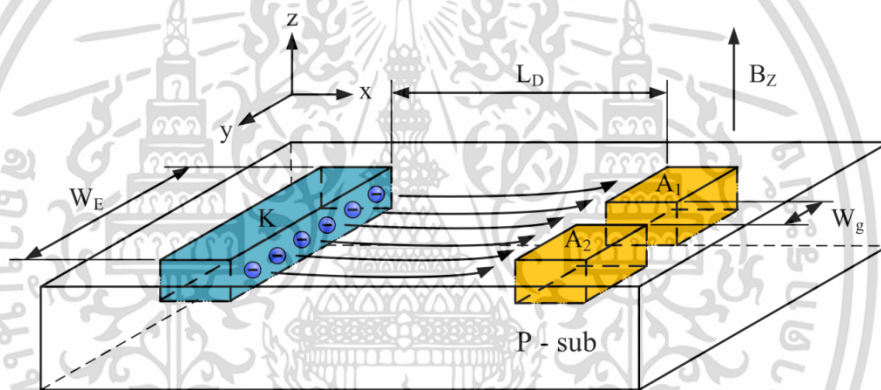
รูปที่ 4.26 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแมกนีไทโดโอดชนิดแอนโนดคู่ไม่มีสนามแม่เหล็ก $B_z = 0$

จากรูปที่ 4.26 แมกนีไทโดโอดชนิดแอนโนดคู่มีทั้งพาหะที่เป็นโฮลและอิเล็กตรอนแต่อิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนใหญ่จึงสร้างแบบจำลองอย่างง่ายได้ดังรูปโดยอิเล็กตรอนจะใช้สัญลักษณ์วงกลมแสดงประจุลบ เมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็กเข้ามา $B_z = 0$ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วแคโทด K ไหลไปในทิศทาง $+x$ แล้วผ่านบริเวณเบี่ยงเบนพาหะแล้วไหลออกไปยังขั้ว A_1 ในปริมาณใกล้เคียงกันกับขั้ว A_2



รูปที่ 4.27 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคูมีสนามแม่เหล็กในทิศ $-B_z$

จากรูปที่ 4.27 การเบี่ยงเบนของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นอิเล็กตรอนเมื่อมีกระแสไหลในทิศทาง $+x$ แล้วเราให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทาง $-z$ ก็จะเกิดแรงลอเรนซ์ผลักอิเล็กตรอนไปในทิศทางตามแนวแกน $+y$ ทำให้อิเล็กตรอนไหลไปออกยังขั้ว A_2 มากกว่า A_1



รูปที่ 4.28 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคูมีสนามแม่เหล็กในทิศ $+B_z$

จากรูปที่ 4.28 การเบี่ยงเบนของพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นอิเล็กตรอนเมื่อมีกระแสไหลในทิศทาง $+x$ แล้วเราให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทาง $+z$ ก็จะเกิดแรงลอเรนซ์ผลักอิเล็กตรอนไปในทิศทางตามแนวแกน $-y$ ทำให้อิเล็กตรอนไหลไปออกยังขั้ว A_1 มากกว่า A_2

4.4 กลไกกระแสของแมกนีโตไดโอดแบบคู่

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกลไกกระแสของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ซึ่งจะทำให้เราเข้าใจได้ถึงการ ทำงานของอุปกรณ์เมื่อตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีประโยชน์ในการนำไปวิเคราะห์และ ออกแบบ แมกนีโตไดโอดแบบคู่ด้วยพื้นฐานโครงสร้างเป็นไดโอด กระแสในเทอมต่าง ๆ จึงคล้ายกับ ไดโอด แต่แตกต่างกันที่แมกนีโตไดโอดแบบคู่คล้ายกับมีไดโอดสองตัวเอามาต่อเข้าด้วยกันเป็นขั้วร่วม ที่ด้านหนึ่งอีกด้านหนึ่งปล่อยแยกกันไว้ตัวอุปกรณ์จึงมี 3 ขา จากสมการกระแสไดโอดพื้นฐานที่เกิด จากพาหะทั้งสองชนิดคือโฮลและอิเล็กตรอน ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ในขณะใช้งานจะ

ใช้ไบอัสตรง ความหนาแน่นกระแสรวมของไดโอด (J_D) เท่ากับความหนาแน่นกระแสของโฮล (J_{px}) รวมกับความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน (J_{nx})

$$J_D = J_{px} + J_{nx} \quad (4.7)$$

$$J_{px} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \left(e^{\left(\frac{V_a}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (4.8)$$

$$J_{nx} = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \left(e^{\left(\frac{V_a}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (4.9)$$

$$J_D = \left[\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right] \cdot \left[\left(e^{\left(\frac{V_a}{kT}\right)} - 1 \right) \right] \quad (4.10)$$

ในที่นี้ q คือประจุของอิเล็กตรอน D_p และ D_n คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอน L_p และ L_n คือระยะการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอน k คือค่าคงที่ของโบลซ์มันน์ T คือค่าอุณหภูมิ V_a คือแรงดันไบอัสที่ให้

4.4.1 กลไกกระแสของแมกนีไทด์ไดโอดชนิดแคโทดคู่

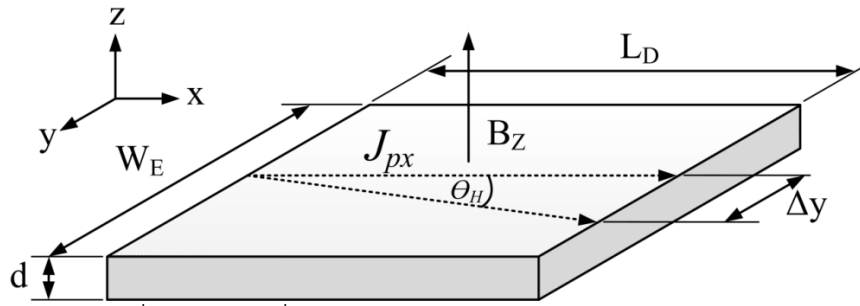
โดยปรกติไดโอดที่สร้างขึ้น J_{px} มักจะมากกว่า J_{nx} ประมาณสิบยกกำลัง 3 เท่าหรือมีการเติมสารเจือให้แก่ซิลิคอนให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีความเข้มข้นสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือประมาณได้ว่าความหนาแน่นกระแสของแมกนีไทด์ไดโอดประมาณให้เท่ากับความหนาแน่นกระแสของโฮล

$$J_D \approx J_{px} \quad (4.11)$$

ความหนาแน่นกระแสของชนิดแคโทดคู่ในโครงสร้างนี้จะมีสองขาเอาต์พุตหรือแบ่งแยกไหล

$$J_{D1} = J_{D2} = \frac{J_{px}}{2} \quad (4.12)$$

เราสามารถเขียนแผนภาพแสดงมุมการเบี่ยงเบนของพาหะออกมาได้ดังรูปที่ 4.29 โดย J_{px} คือพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นโฮล ในแผนภาพจะแสดงมิติของแมกนีไทด์ไดโอด W_E คือความกว้างขั้วที่จ่ายพาหะ L_D คือระยะทางที่พาหะโฮลวิ่งไป มีความหนาเท่ากับ d เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาในทิศทาง $+Z$ มีมุมเบี่ยงเบนที่เกิดจากแรงลอเรนซ์ผลักให้พาหะเบี่ยงเบนไป θ_H มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มพาหะ ระยะที่เบี่ยงเบนไปคือ Δy



รูปที่ 4.29 การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

ในการคำนวณหาค่า ΔI_D หาได้โดย

$$\tan \theta_H = \frac{\Delta y}{L_D} = \mu_p \cdot B_z \quad (4.13)$$

$$\Delta y = L_D \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (4.14)$$

$$B_z = \frac{\Delta y}{L_D \mu_p} \quad (4.15)$$

นำค่า Δy ไปใส่แทนค่าเพื่อหาค่า ΔI_D

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot \Delta y \quad (4.16)$$

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (4.17)$$

เมื่อหา ΔI_D ได้ก็สามารถหาความไวการตอบสนองสัมบูรณ์ได้

$$S_A = \frac{\Delta I_D}{B_z} = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \quad (4.18)$$

ความไวการตอบสนองสัมพัทธ์ขึ้นกับกระแสไบอัสที่ให้

$$S_R = \frac{S}{I} \quad (4.19)$$

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D \cdot B_z} \quad (4.20)$$

โดยที่

$$I_{D1} = J_{n1} = q\mu_n n_1 \cdot A = \left(\frac{J_{px}}{2} - \frac{\Delta J_{px}}{2} + \frac{J_{nx}}{2} \right) \cdot A \quad (4.21)$$

$$I_{D2} = J_{n2} = q\mu_n n_2 \cdot A = \left(\frac{J_{px}}{2} + \frac{\Delta J_{px}}{2} + \frac{J_{nx}}{2} \right) \cdot A \quad (4.22)$$

ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta I_D = I_{n2} - I_{n1} = \Delta J_{px} \cdot A = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (4.23)$$

4.4.2 กลไกกระแสของแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่

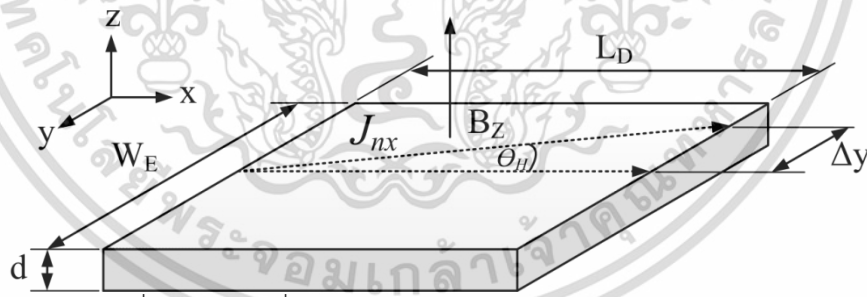
โดยปรกติไดโอดชนิดนี้ที่สร้างขึ้น J_{nx} มักจะมากกว่า J_{px} มีการเติมสารเจือให้แก่ซิลิคอนให้เป็นการกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีความเข้มข้นสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือประมาณได้ว่าความหนาแน่นกระแสของแมกนีโตไดโอดประมาณให้เท่ากับความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน

$$J_D \approx J_{nx} \quad (4.24)$$

ความหนาแน่นกระแสของชนิดแอนโนดคู่ในโครงสร้างนี้จะมีสองขาเอาต์พุตหรือแบ่งแยกไหล

$$J_{D1} = J_{D2} = \frac{J_{nx}}{2} \quad (4.25)$$

เราสามารถเขียนแผนภาพแสดงมุมการเบี่ยงเบนของพาหะออกมาได้ดังรูปที่ 4.30 โดย J_{nx} คือพาหะส่วนใหญ่ที่เป็นอิเล็กตรอน ในแผนภาพจะแสดงมิติของแมกนีโตไดโอด W_E คือความกว้างขั้วที่จ่ายพาหะ L_D คือระยะทางที่พาหะอิเล็กตรอนวิ่งไป มีความหนาเท่ากับ d เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาในทิศทาง $+z$ มีมุมเบี่ยงเบนที่เกิดจากแรงลอเรนซ์ผลักให้พาหะเบี่ยงเบนไป θ_H มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ที่เป็นตัวแทนของกลุ่มพาหะ ระยะที่เบี่ยงเบนไปคือ Δy



รูปที่ 4.30 การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโนดคู่

ในการคำนวณหาค่า ΔI_D หาได้โดย

$$\tan \theta_H = \frac{\Delta y}{L_D} = \mu_n \cdot B_z \quad (4.26)$$

$$\Delta y = L_D \cdot \mu_n \cdot B_z \quad (4.27)$$

$$B_z = \frac{\Delta y}{L_D \mu_n} \quad (4.28)$$

นำค่า Δy ไปใส่แทนค่าเพื่อหาค่า ΔI_D
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta I_D = J_{nx} \cdot d \cdot \Delta y \quad (4.29)$$

$$\Delta I_D = J_{nx} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_n \cdot B_z \quad (4.30)$$

เมื่อหา ΔI_D ได้ก็สามารถหาความไวการตอบสนองสัมบูรณ์ได้

$$S_A = \frac{\Delta I_D}{B_z} = J_{nx} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_n \quad (4.31)$$

ความไวการตอบสนองสัมพัทธ์ขึ้นกับกระแสไบอัสที่ให้

$$S_R = \frac{S}{I} \quad (4.32)$$

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D \cdot B_z} \quad (4.33)$$

โดยที่

$$I_{D1} = J_{p1} = q \mu_p p_1 \cdot A = \left(\frac{J_{nx}}{2} - \frac{\Delta J_{nx}}{2} + \frac{J_{px}}{2} \right) \cdot A \quad (4.34)$$

$$I_{D2} = J_{p2} = q \mu_p p_2 \cdot A = \left(\frac{J_{nx}}{2} + \frac{\Delta J_{nx}}{2} + \frac{J_{px}}{2} \right) \cdot A \quad (4.35)$$

ได้เป็น

$$\Delta I_D = I_{p2} - I_{p1} = \Delta J_{nx} \cdot A = J_{nx} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_n \cdot B_z \quad (4.36)$$

4.4.3 เปรียบเทียบทิศทางการกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่และแอโนดคู่

ความไวการตอบสนองของแมกนีโตไดโอดทั้งสองชนิดหรือความชันของกราฟจะมีเครื่องหมายเดียวกันทั้งชนิดแคโทดคู่รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 เทียบกับชนิดแอโนดคู่รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 กราฟจะอยู่จุดภาค (quadrant) ที่หนึ่งและสาม ทิศทางการกระแสในแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่กับชนิดแอโนดคู่ทั้งสองชนิดจะไหลตรงข้ามกัน สมการความแตกต่างของกระแสสามารถเขียนได้เป็น

$$\Delta I_D = I_{D2} - I_{D1} = (-|I_{D2}|) - (-|I_{D1}|) = |I_{D1}| - |I_{D2}| \quad (4.37)$$

แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่พาหะที่ทำงานเป็นหลักคือโฮล ที่ขั้วแอโนดโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ (majority carrier) จะฉีดข้ามรอยต่อไปยังฐานรองชนิดเอ็นซึ่งจะกลายเป็นพาหะส่วนน้อย (minority carrier) หรือพาหะส่วนเกิน (excess carrier) แล้วเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ (minority carrier) ที่ฐานรองชนิดเอ็น เมื่อจะหาความแตกต่างของกระแส ΔI_D ก็จะนำค่ากระแสที่ขั้วแคโทดมาลบกับ $I_{D2} - I_{D1}$ ตามทิศทางของกระแสนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

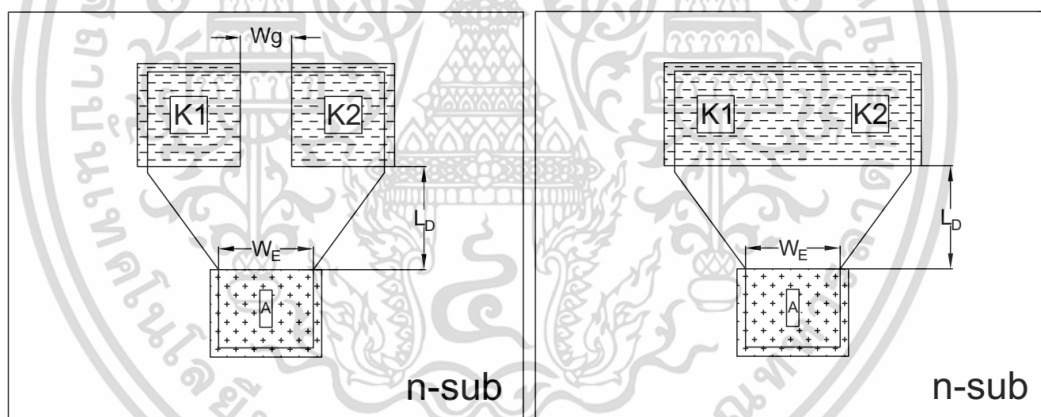
แมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่พาหะที่ทำงานเป็นหลักคืออิเล็กตรอน ที่ขั้วแคโทดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่จะฉีดข้ามรอยต่อไปยังฐานรองชนิดพีซึ่งจะกลายเป็นพาหะส่วนน้อยหรือพาหะส่วนเกินแล้วเกิดการรวมตัวใหม่กับโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ที่ฐานรองชนิดพี เมื่อจะหาความแตกต่างของกระแส ΔI_D ก็จะนำกระแสที่ขั้วแอนโอดมาลบกันโดยคิดแบบค่าสัมบูรณ์ ทิศทางของกระแสจะตรงข้ามกับกับชนิดแคโทดคู่จึงได้เป็น $(-|I_{D2}|) - (-|I_{D1}|)$ หรือ $|I_{D1}| - |I_{D2}|$

4.5 การจำลองแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดแบบคู่

โดยปรกติการจะนำกระแสออกจากจุดใดในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เช่นเซออร์จะนำกระแสไฟฟ้าออกด้วยสารกึ่งตัวนำที่เจือสารความเข้มข้นสูงลงไปทำเป็นบริเวณรับกระแสก่อนที่จะต่อกับโลหะและตัวนำภายนอกอีกที การใช้ประโยชน์จากการลดช่องว่างบริเวณรับกระแสลงก็สามารถจะนำกระแสไฟฟ้าออกจากอุปกรณ์ได้เหมือนกับการสร้างขั้วไฟฟ้าโดยตรงและอาจจะให้ผลที่ดีกว่าซึ่งจะมาศึกษาในประเด็นนี้ดังนี้ [78]

4.5.1 การจำลองแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

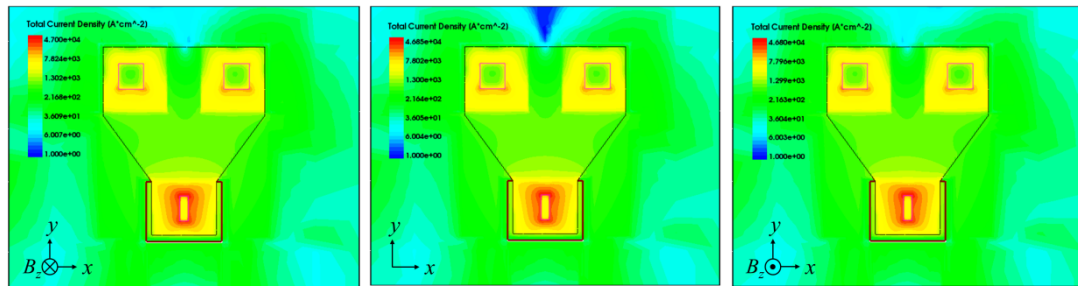
4.5.1.1 โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่



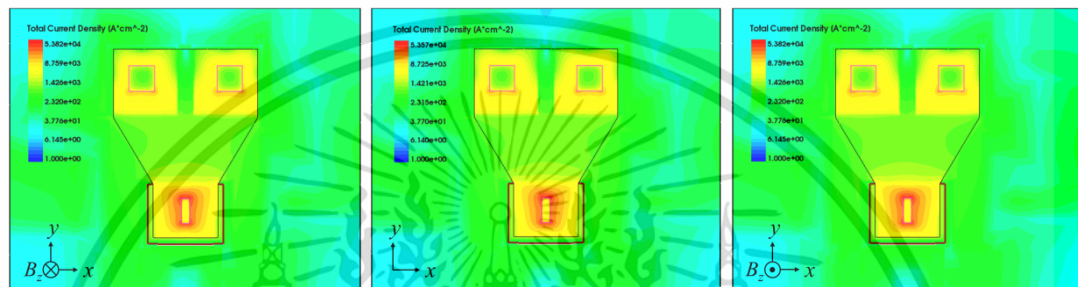
รูปที่ 4.31 โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

การทดลองนี้ใช้ฐานรองสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} แพร่อะตอมสารเจือผู้รับ (acceptor atom) สร้างขั้วแอนโอด (A) p+ ด้วยความเข้มข้น 10^{20} cm^{-3} บนฐานรองทำการสร้างบริเวณรับกระแสเป็นรอยต่อโอห์มมิคใช้เป็นขั้วตรวจจับกระแสแคโทด (K) n+ ไว้จำนวนสองขั้วดังรูปที่ 4.31

4.5.1.2 ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กไนโตไดโอดชนิดแคโทดคู่



รูปที่ 4.32 ความหนาแน่นกระแสชนิดแคโทดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 5 \text{ } \mu\text{m}$



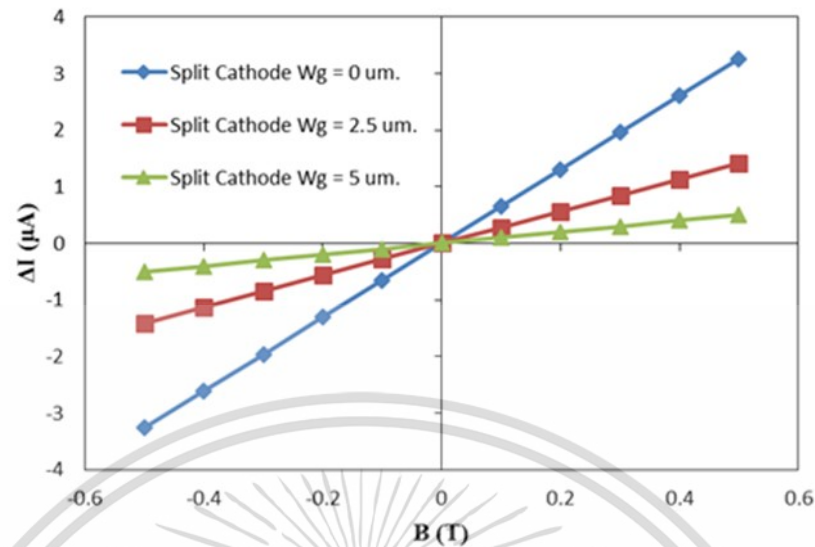
รูปที่ 4.33 ความหนาแน่นกระแสชนิดแคโทดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 2.5 \text{ } \mu\text{m}$



รูปที่ 4.34 ความหนาแน่นกระแสชนิดแคโทดคู่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 0 \text{ } \mu\text{m}$

การทดลองหาแนวโน้มในการปรับระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแส (W_g) จากรูปที่ 4.32 การทดลองจะใช้ระยะห่าง $W_g = 5 \text{ } \mu\text{m}$ แล้วทำการลดระยะห่างระหว่างขั้วลงมาเป็น $W_g = 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 4.33 จากนั้นจะใช้ติดกันหรือเนื้อสารกึ่งตัวนำขึ้นเดียวกัน $W_g = 0 \text{ } \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 4.34 ในการทดลองจะใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ทำให้ปริมาณพาหะไหลเข้าและออกเท่ากัน จากการสังเกตแนวโน้มการเบี่ยงเบนของพาหะ เมื่อสนามแม่เหล็กกระทำต่อพาหะจะเบี่ยงเบนไปตามทิศทางของแรงลอเรนซ์ จะเห็นว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแสลงมาจาก $W_g = 5 \text{ } \mu\text{m}$ พาหะจะไปออกกันที่บริเวณรับกระแสน้อยกว่าระยะ $W_g = 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ และพาหะจะไปออกกันที่บริเวณรับกระแสดีที่สุดคือ $W_g = 0 \text{ } \mu\text{m}$

4.5.1.3 การตอบสนองของสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่



รูปที่ 4.35 การตอบสนองของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน

การตอบสนองของสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่จากรูปที่ 4.35 ที่ $W_g = 5 \mu\text{m}$ ความชันของกราฟจะต่ำสุด อยู่ในระดับปานกลางคือ $W_g = 2.5 \mu\text{m}$ และที่ $W_g = 0 \mu\text{m}$ ความชันจะสูงสุดหรือการตอบสนองจะดีที่สุด เมื่อนำมาหาความไวในการตอบสนองสัมพัทธ์ที่กระแสไบอัส 1 mA

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D B_z} \quad (4.38)$$

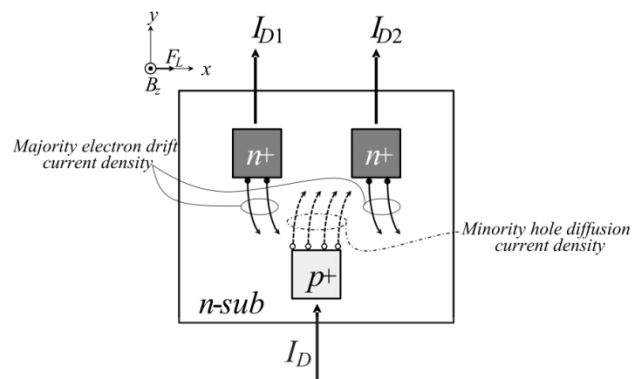
ได้ความไวการตอบสนอง 5, 2.5, 0 μm ได้ 0.0010, 0.0028 และ 0.0065 T^{-1} ตามลำดับซึ่งแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่แบบไม่มีบริเวณรับกระแสจะได้ความไวการตอบสนองดีที่สุดดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การตอบสนองของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน

ระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแส (W_g) (μm)	5	2.5	0
ความไวการตอบสนอง (S_R) (T^{-1})	0.0010	0.0028	0.0065

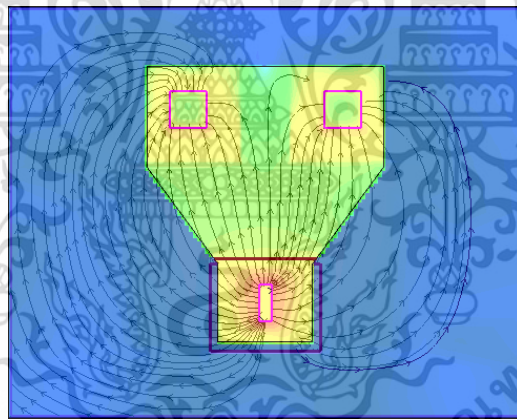
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1.4 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

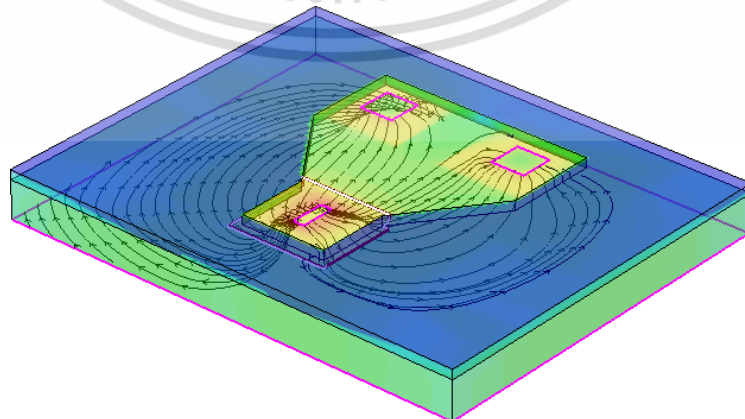


รูปที่ 4.36 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ จากรูปที่ 4.36 ในการไบอัสจ่ายกระแส I_D จากขั้วแอโนด (A) p+ ตามทิศทางกระแสสมมุติ กระแสแพร่โฮลพาหะส่วนน้อย (Minority hole diffusion current) จะแพร่ไปทางขั้วแคโทด (K) โดยเบี่ยงไปทางขวา ที่ขั้วแคโทด (K) n+ กระแส drift ให้อิเล็กตรอนพาหะส่วนใหญ่ (Majority electron drift current) จะเคลื่อนที่ไปทางขั้วแอโนด (A) โดยเบี่ยงไปทางขวาตามทิศทางของแรงลอเรนซ์

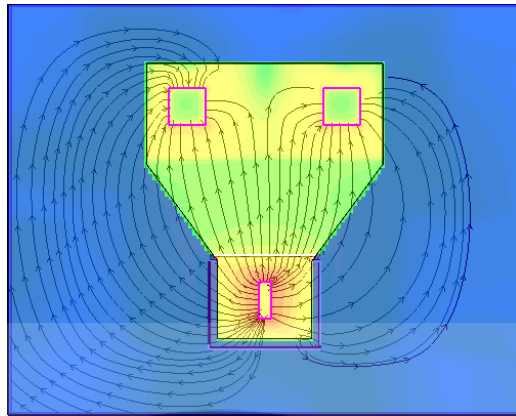


รูปที่ 4.37 การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 5 \mu\text{m}$

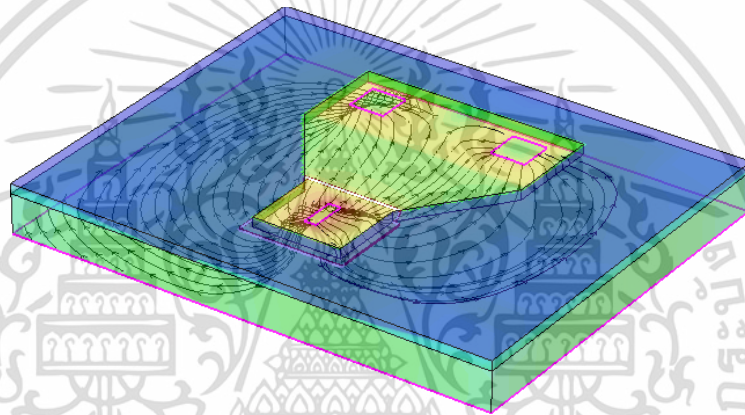


รูปที่ 4.38 การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 5 \mu\text{m}$

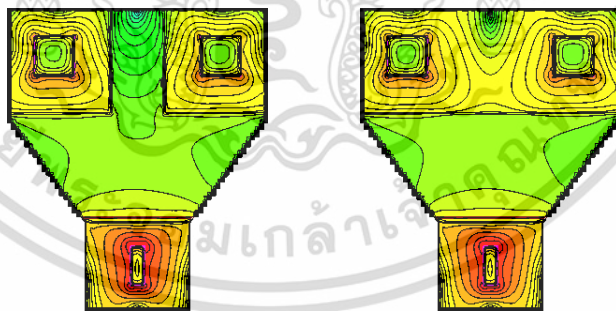
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$



รูปที่ 4.40 การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่แบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส

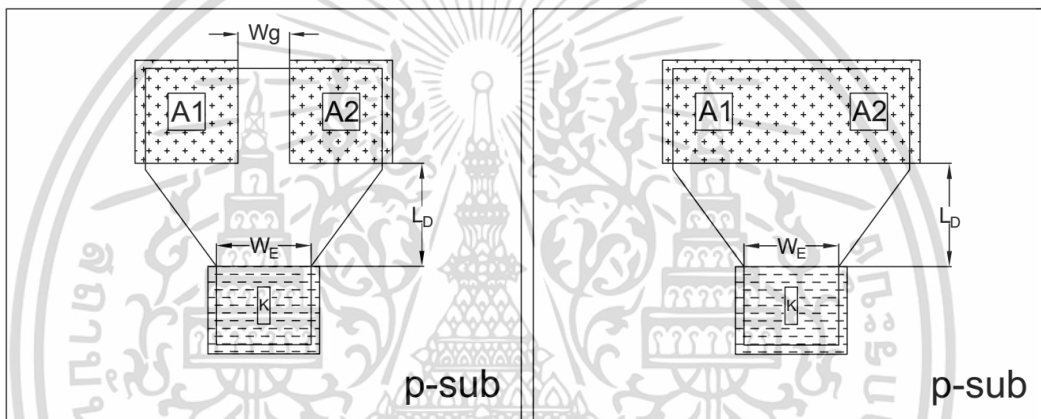
การเบี่ยงเบนกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่จากรูปที่ 4.37 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 2 มิติ รูปที่ 4.38 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 3 มิติที่ระยะ $W_g = 5 \text{ um}$ เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก แนวกระแสที่เคลื่อนที่มีการเบี่ยงเบนไม่สมมาตรมีการวิ่งเป็นแนวโค้ง โดยไหลออกจากขั้วแอโนด (A) ผ่านพื้นที่เบี่ยงเบนแล้วออกกันไปออกที่ขั้วแคโทด (K) กระแสจะไหลผ่านพื้นผิวและมีบางส่วนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.39 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 2 มิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรูปที่ 4.40 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 3 มิติที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$ จะสังเกตเห็นว่าบริเวณใกล้ขั้วแคโทดทั้งสองจะมีพาหะไปออกันมากกว่าแบบที่มีระยะ $W_g = 5 \text{ um}$ เพื่อให้สังเกตได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากรูปที่ 4.41 เปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่แบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสปริมาณกระแสจะออกไปที่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสรูปที่ 4.41(ข) มากกว่าแบบที่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสรูปที่ 4.41 (ก) เพราะแบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะสูญเสียพื้นที่รับกระแสจากช่องว่าง (W_g) แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะเพิ่มพื้นที่รับกระแสได้มากขึ้นจึงทำให้มีความไวการตอบสนองมากกว่านั่นเอง

4.5.2 การจำลองแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่

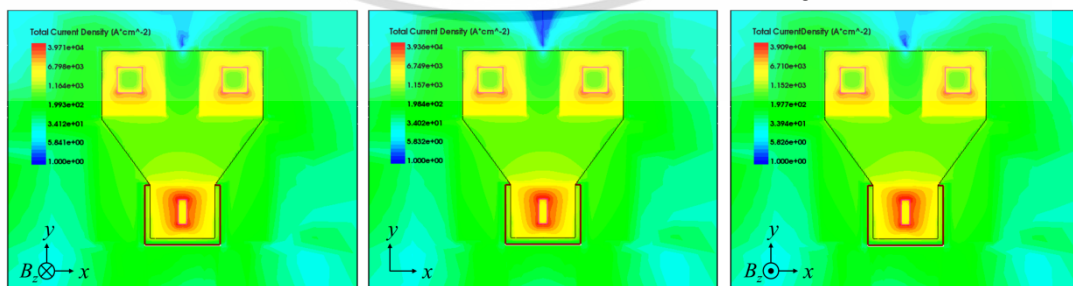
4.5.2.1 โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่



รูปที่ 4.42 โครงสร้างแบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่

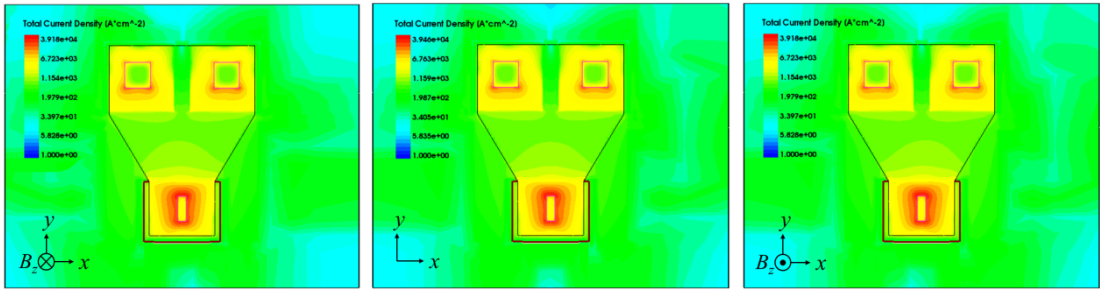
การทดลองนี้ใช้ฐานรองสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} แพร์อะตอมสารเจือผู้ให้ (donor atom) สร้างขั้วแคโทด (K) n+ ด้วยความเข้มข้น $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ บนฐานรองทำการสร้างบริเวณรับกระแสเป็นรอยต่อโอห์มมิคใช้เป็นขั้วตรวจจับกระแสแอโนด (A) p+ ไว้จำนวนสองขั้วดังรูปที่ 4.42

4.5.2.2 ความหนาแน่นกระแสชนิดแอโนดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 5 \text{ um}$

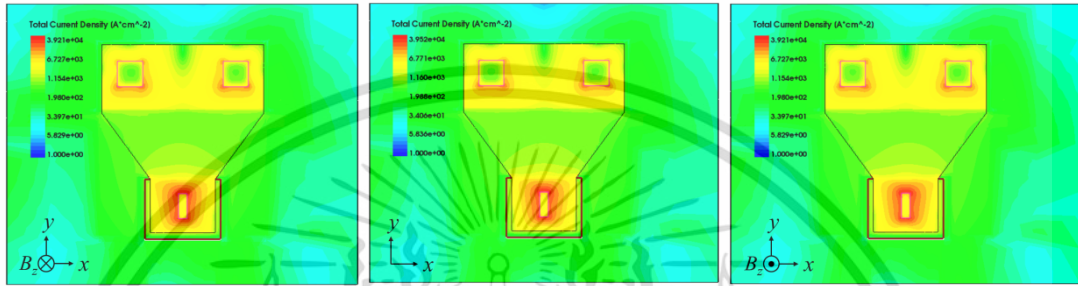


รูปที่ 4.43 ความหนาแน่นกระแสชนิดแอโนดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 5 \text{ um}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



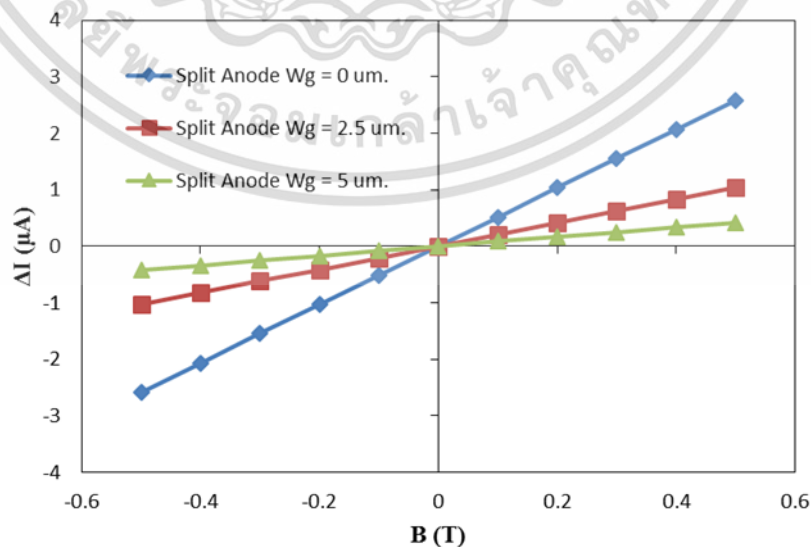
รูปที่ 4.44 ความหนาแน่นกระแสชนิดแอนโดคู่แบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 2.5 \text{ um}$



รูปที่ 4.45 ความหนาแน่นกระแสชนิดแอนโดคู่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส $W_g = 0 \text{ um}$

การปรับระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแส (W_g) จากรูปที่ 4.43 ใช้ระยะห่าง $W_g = 5 \text{ um}$ แล้วทำการลดระยะห่างระหว่างขั้วลงมาเป็น $W_g = 2.5 \text{ um}$ ดังรูปที่ 4.44 จากนั้นจะลดระยะให้ชิดติดกันหรือเนื้อสารกึ่งตัวนำขึ้นเดียวกัน $W_g = 0 \text{ um}$ ดังรูปที่ 4.45 การใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ทำให้ปริมาณพาหะไหลเข้าและออกเท่ากัน จากการสังเกตแนวโน้มการเบี่ยงเบนของพาหะ เมื่อลดระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแสลงมาจาก $W_g = 5 \text{ um}$ พาหะจะไปออกกันที่บริเวณรับกระแสน้อยกว่าระยะ $W_g = 2.5 \text{ um}$ และพาหะจะไปออกกันที่บริเวณรับกระแสดีที่สุดคือ $W_g = 0 \text{ um}$

4.5.2.3 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่



รูปที่ 4.46 ความไวการตอบสนองแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน

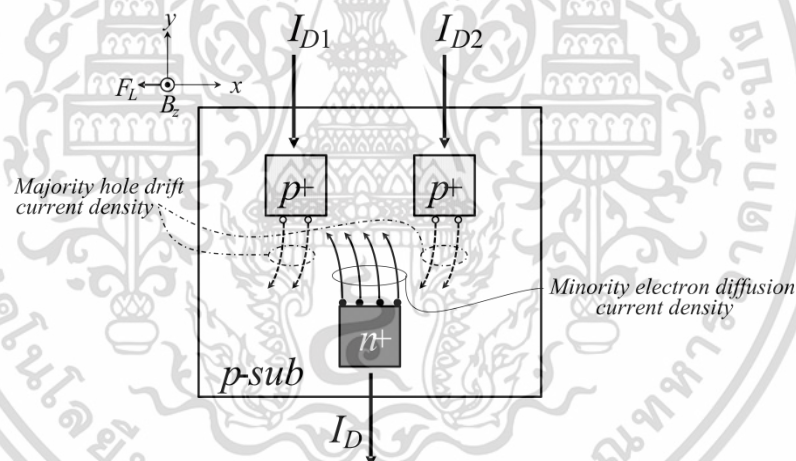
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ความไวการตอบสนองแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ที่ระยะห่างบริเวณรับกระแสต่างกัน

ระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแส (W_g) (μm)	5	2.5	0
ความไวการตอบสนอง (S_R) (T^{-1})	0.00084	0.0020	0.0051

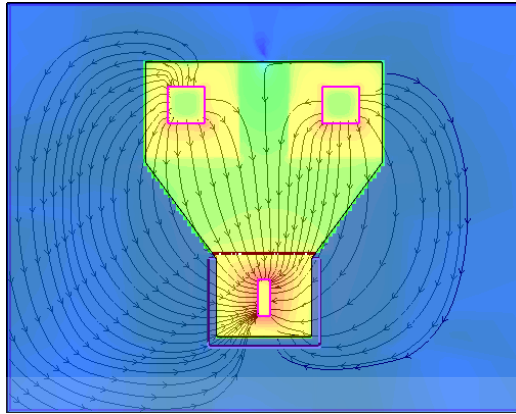
การตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่จากรูปที่ 4.46 และตารางที่ 4.7 ที่ $W_g = 5 \mu\text{m}$ ความชันของกราฟจะต่ำสุด อยู่ในระดับปานกลางคือ $W_g = 2.5 \mu\text{m}$ และที่ $W_g = 0 \mu\text{m}$ ความชันจะสูงสุดหรือการตอบสนองจะดีที่สุด เมื่อนำมาหาความไวการตอบสนองสัมพัทธ์ที่กระแสไบอัส 1 mA ได้ความไวการตอบสนอง 5, 2.5, 0 μm ได้ 0.00084, 0.0020 และ 0.0051 T^{-1} ตามลำดับซึ่งแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะได้ความไวการตอบสนองดีที่สุด

4.5.2.4 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่

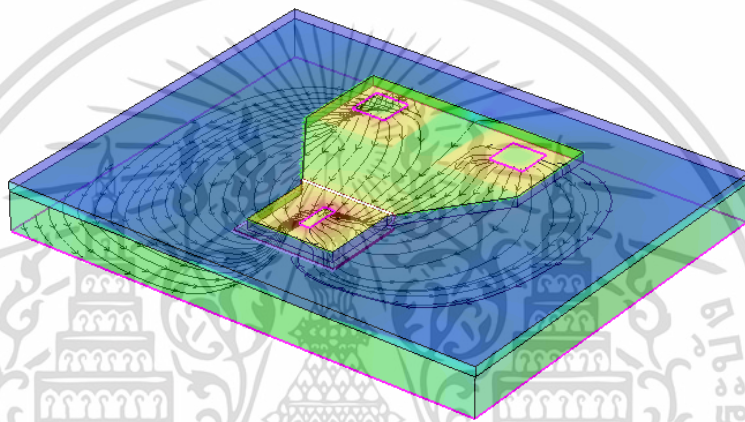


รูปที่ 4.47 การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่

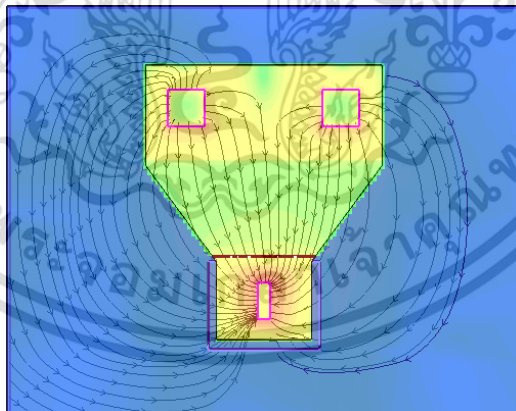
การเบี่ยงเบนพาหะแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโดคู่ จากรูปที่ 4.47 ในการไบอัสจ่ายกระแส I_D จากขั้วแคโทด (K) $n+$ ตามทิศทางกระแสสมมุติ กระแสแพร์อิเล็กตรอนพาหะส่วนน้อย (Minority electron diffusion current) จะแพร์ไปยังทางขั้วแอนโนด (A) โดยเบี่ยงไปทางซ้าย ที่ขั้วแอนโนด (A) $p+$ กระแสดริฟท์โฮลพาหะส่วนใหญ่ (Majority hole drift current) จะเคลื่อนที่ไปทางขั้วแคโทด (K) โดยเบี่ยงไปทางซ้ายตามทิศทางของแรงลอเรนซ์



รูปที่ 4.48 การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโตนคู้ที่ระยะ $Wg = 5 \text{ um}$

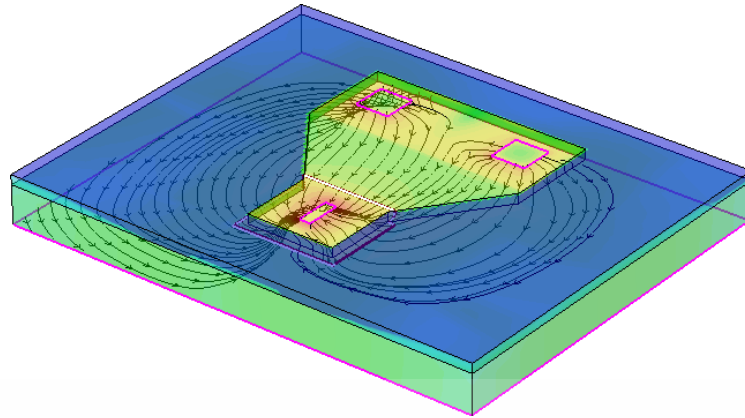


รูปที่ 4.49 การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโตนคู้ที่ระยะ $Wg = 5 \text{ um}$

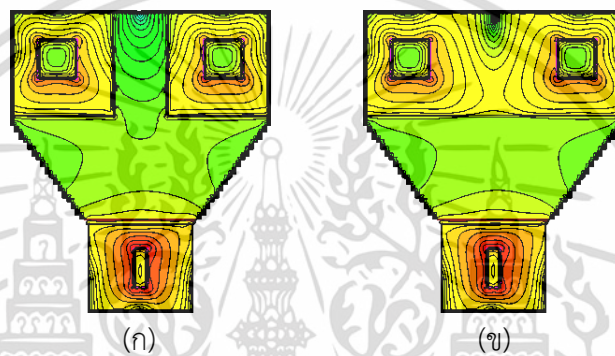


รูปที่ 4.50 การเบี่ยงเบนกระแส 2 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโตนคู้ที่ระยะ $Wg = 0 \text{ um}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 การเบี่ยงเบนกระแส 3 มิติแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโอดคู่ที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$



รูปที่ 4.52 การเปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโอดคู่แบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส

การเบี่ยงเบนกระแสแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโอดคู่จากรูปที่ 4.48 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 2 มิติ รูปที่ 4.49 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 3 มิติที่ระยะ $W_g = 5 \text{ um}$ เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กแนวกระแสที่เคลื่อนที่มีการเบี่ยงเบนไม่สมมาตรมีการวิ่งเป็นแนวโค้ง โดยไหลออกจากขั้วแคโทด (K) ผ่านพื้นที่เบี่ยงเบนแล้วออกันไปออกที่ขั้วแอโนด (A) กระแสจะไหลผ่านพื้นผิวและมีบางส่วนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.50 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 2 มิติ และรูปที่ 4.51 แสดงการเบี่ยงเบนพาหะแบบ 3 มิติที่ระยะ $W_g = 0 \text{ um}$ จะสังเกตเห็นว่าบริเวณใกล้ขั้วแอโนดทั้งสองจะมีพาหะไปออกันมากกว่าแบบที่มีระยะ $W_g = 5 \text{ um}$ เพื่อให้สังเกตได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจากรูปที่ 4.52 เปรียบเทียบแมกนีโตไดโอดชนิดแอนโอดคู่แบบมีกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแส ปริมาณกระแสจะออกไปที่แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสรูปที่ 4.52 (ข) มากกว่าแบบที่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสรูปที่ 4.52 (ก) เพราะแบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะสูญเสียพื้นที่รับกระแสจากช่องว่าง (W_g) แบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะเพิ่มพื้นที่รับกระแสได้มากขึ้นจึงทำให้มีความไวการตอบสนองมากกว่านั่นเอง

4.6 การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตไดโอดแบบคู่

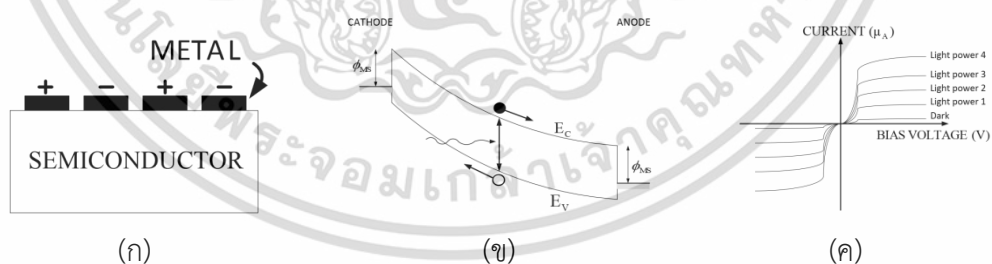
แมกนีโตไดโอดแบบคู่เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความเรียบง่ายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายแบบ ในที่นี้จะยกตัวอย่างการนำมาทำเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะและนำมาทำมัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงโดยใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดตัวเดียวกันแต่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงได้ทั้งสองอย่าง

4.6.1 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานทั้งการตรวจจับแม่เหล็กและการตรวจจับแสงพิสูจน์หลักการการทำงานด้วยการจำลองแบบ แล้วอธิบายการทำงานด้วยแบบจำลองอย่างง่ายและหาความไวการตอบสนอง [79]

4.6.1.1 การจำลองแบบโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะและคุณสมบัติ

ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) ประกอบด้วยรอยต่อชอตต์กี (Schottky) สองรอยต่อหันหลังชนกันหรือมีโครงสร้างเป็นโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โครงสร้างนี้เรียบง่ายราคาถูก มีค่าคาปาซิแตนซ์ที่ต่ำมาก โดยปกติโครงสร้างนี้จะออกแบบในโครงสร้างแบบฟันหวี (interdigitated) เพื่อให้มีความไวสูง ไม่นิยมสร้างเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ ในการจะนำไปใช้วัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสง กระแสแสงจะไดมาจากบริเวณรอยต่อได้โลหะและช่องว่างระหว่างโลหะการจัดไฟไบอัสระหว่างโลหะทั้งสองและรอยต่อหนึ่งรอยต่อ โดยจะเป็นไบอัสตรงหนึ่งขั้วและอีกขั้วจะเป็นไบอัสกลับ ในรูปที่ 4.53 (ก) โครงสร้างแบบฟันหวีหรืออินเตอร์ดิจิตเอด (interdigitated) (ข) แถบพลังงาน (ค) กราฟกระแสแสง

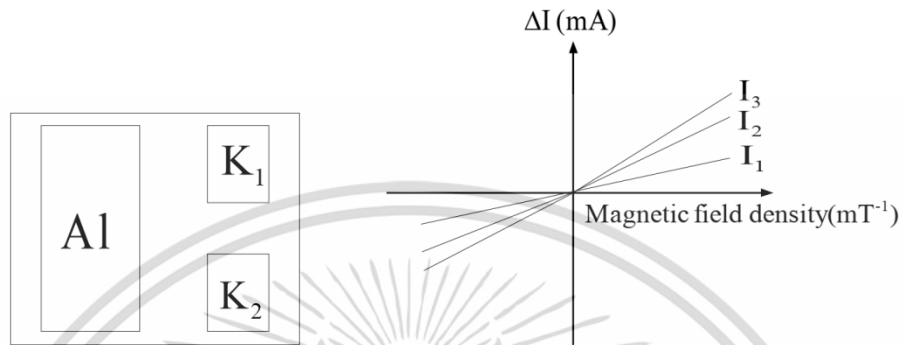


รูปที่ 4.53 ตัวตรวจจับแสงMSM (ก) โครงสร้างแบบฟันหวี (ข) แถบพลังงาน (ค) กราฟกระแสแสง

แมกนีโตไดโอดแบบคู่เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับแม่เหล็ก โครงสร้างประกอบด้วยไดโอดสองตัวที่รวมเอาขั้วแอโนดเข้าด้วยกันและแยกขั้วแคโทดเป็นสองขั้ว มีการออกแบบความยาวการเบี่ยงเบนพาหะในระยาะที่เหมาะสม เมื่อมีสนามแม่เหล็กเข้ามาแรงเหนี่ยวนำจากเวกเตอร์สนามแม่เหล็กจะกระทำกับพาหะที่วิ่งจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดให้เบี่ยงเบนไป ดังนั้นกระแสของสองแคโทดจึงแตกต่างกัน ΔI ความแตกต่างของกระแสขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและค่า ΔI จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

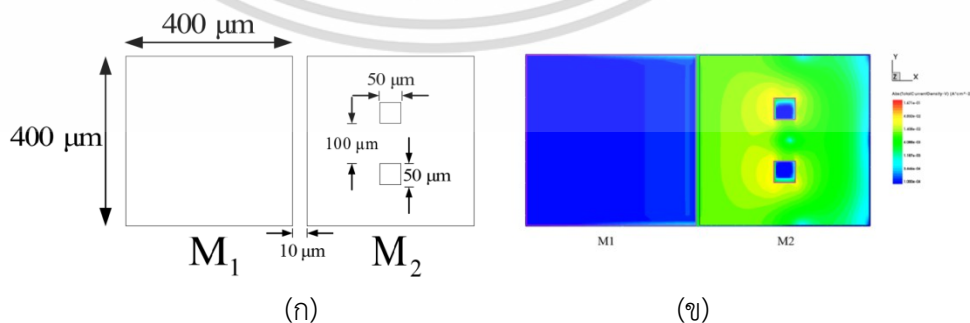
เป็นค่าตรงกันข้ามเมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศทางตรงข้ามกัน ไดโอดสามารถสร้างเป็นรอยต่อชนิดพีเอ็น (pn) และรอยต่อช็อตกี (Schottky) อุปกรณ์นี้สามารถจะทำงานได้ทั้งแบบไบอัสตรงและไบอัสกลับ ทำให้ใช้งานได้ทั้งกระแสไหลและกระแสอิเล็กทรอนิกส์ รูปที่ 4.54 แสดงโครงสร้างของแมกนีไทด์ไดโอดและกราฟคุณสมบัติของแมกนีไทด์ไดโอด



(ก) โครงสร้างแมกนีไทด์ไดโอด (ข) กราฟคุณสมบัติของแมกนีไทด์ไดโอด

รูปที่ 4.54 แมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่

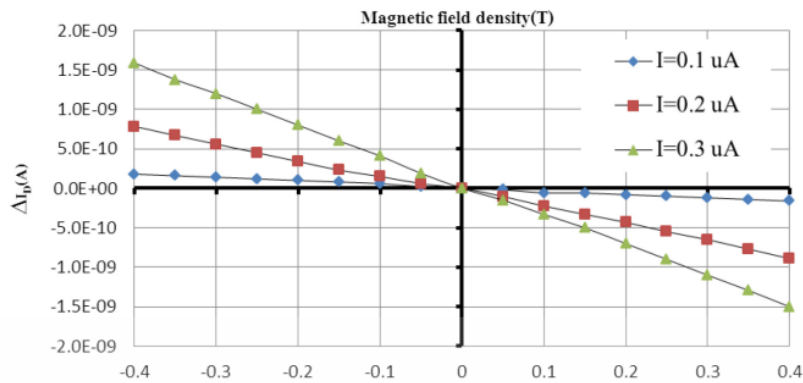
ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ สามารถออกแบบให้ใช้ร่วมกันเป็นแมกนีไทด์ไดโอดแบบคู่สำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและเป็นตัวตรวจจับแสงได้ในเวลาเดียวกัน โครงสร้างหลักที่ใช้คือรอยต่อช็อตกีโดยมีพื้นที่โลหะเพื่อใช้สำหรับการดูดซับแสงและพื้นที่ให้ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงออกแบบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม พื้นที่ว่างระหว่างขั้วโลหะถูกกำหนดให้เป็นความยาวของระยะการเบี่ยงเบน ดังนั้นความยาววิกฤตจึงถูกกำหนดโดยความยาวการเบี่ยงเบนของพาหะ ความแตกต่างของกระแสจะเกิดขึ้นบริเวณ W_1 และ W_2 โครงสร้างนี้แสดงในรูปที่ 4.55 (ก) ขนาดแบบจำลอง 2 มิติในการจำลองแบบ (ข) การจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม TCAD โดยมีพื้นที่โลหะขนาด $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ มีช่องหน้าสัมผัส W_1 และ W_2 ขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ และช่องว่างระหว่างขั้วโลหะและหน้าสัมผัสคือ $100 \mu\text{m}$ และ $10 \mu\text{m}$ ตามลำดับ



รูปที่ 4.55 ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ

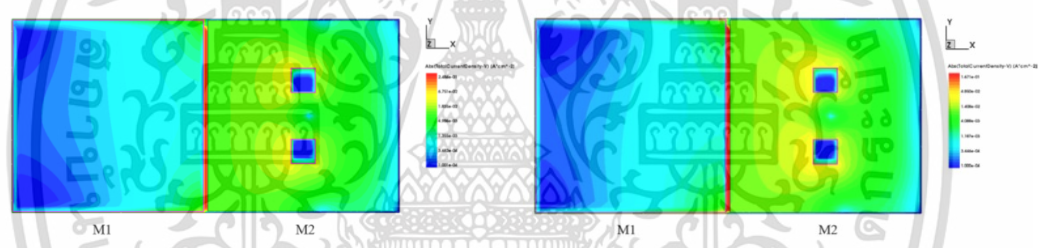
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.56 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของเซนเซอร์โลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ

จากรูปที่ 4.56 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากความต่างของกระแส $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ โดยมีกระแสที่ใช้ทดสอบ 3 ค่า คือ 0.1, 0.2, 0.3 μA เมื่อป้อนสนามแม่เหล็กเข้ามาในทิศทาง $-z$ ทำการหาความชันของกราฟออกมาได้เป็นค่าการไวการตอบสนองสัมพัทธ์เป็น 7.9, 11.93, 13.74 mT^{-1} และในทิศทาง $+z$ ทำการหาความชันของกราฟออกมาได้เป็นค่าการไวการตอบสนองสัมพัทธ์เป็น 8.2, 11.62, 14.19 mT^{-1} ตามลำดับ

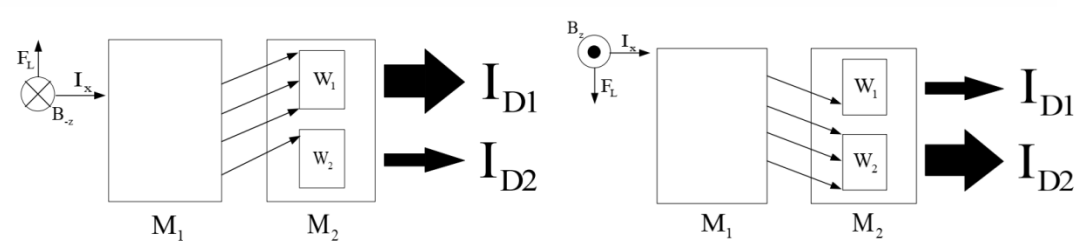


(ก) ทิศทางสนามแม่เหล็ก $-Z$ (ข) ทิศทางสนามแม่เหล็ก $+Z$

รูปที่ 4.57 ความหนาแน่นกระแสของเซนเซอร์โลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ

จากการจำลองแบบจะได้เป็นความหนาแน่นกระแสที่จะสังเกตเห็นลักษณะการเบี่ยงเบนพาหะจากสีที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากันสีฟ้าจะต่ำสุดสูงสุดคือสีแดงดังรูปที่ 4.57 สัมพันธ์กับทิศทางของแม่เหล็กที่เข้ามากระทำ เมื่อนำมาเขียนเป็นแผนภาพอย่างง่ายจะได้ดังรูปที่ 4.58 โดยขนาดของกระแสที่ออกมา I_{D1} และ I_{D2} จะสัมพันธ์กับขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เข้ามา

4.6.1.3 แบบจำลองการเบี่ยงเบนพาหะโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ



(ก) ทิศทางสนามแม่เหล็ก $-Z$ (ข) ทิศทางสนามแม่เหล็ก $+Z$

รูปที่ 4.58 กลไกการทำงานของเซนเซอร์โลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของโครงสร้างและปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสเข้ามาสร้างเป็นสมการเพื่อไปสู่การหาความไวการตอบสนองต่อไป

$$\Delta I_D = J_x \cdot d \cdot \Delta y \quad (4.39)$$

ในที่นี้ J_x คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในทิศทางตามแนวแกน x , d คือความลึกของกระแส, Δy คือระยะการเบี่ยงเบนของกระแสในแนวแกน y อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก และสามารถหาความไวการตอบสนองสัมพัทธ์ S_R ได้จากสมการ

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D \cdot \Delta B_z} \quad (4.40)$$

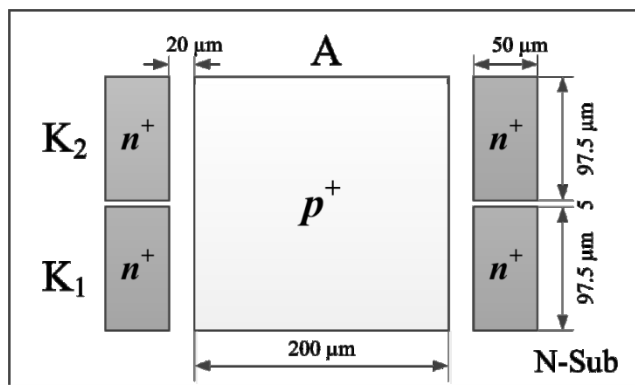
จากโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ (MSM) สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือตรวจจับแสงได้ในโครงสร้างเดียวกันโดยจะมีโลหะสี่เหลี่ยมสองอันและออกแบบให้มีขั้วโลหะสองขั้วเพื่อเป็นบริเวณรับกระแสที่จะให้เกิดเป็นความแตกต่างของกระแสสำหรับตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งจะใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

4.6.2 มัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสง

มัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงเกิดมาจากการทดลองสร้างอุปกรณ์ตรวจจับที่สามารถตรวจจับแหล่งพลังงานได้มากกว่าหนึ่งชนิดในอุปกรณ์เดียวกัน โดยอาศัยหลักการของฮอลล์นำมาสร้างเป็นแมกนีโตไดโอดแบบคู่และรวมโครงสร้างการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดไว้บนโครงสร้างเดียวกัน [80]

4.6.2.1 โครงสร้างมัลติเซนเซอร์ไดโอด

โครงสร้างมัลติเซนเซอร์ไดโอดแสดงดังรูปที่ 4.59 ประกอบด้วยขั้วแอโนด (A) p+ มีขนาด $200 \times 200 \text{ um}$ และขั้วแคโทด (K) สองขา K_1 และ K_2 มีขนาด $50 \times 97.5 \text{ um}$ ช่องว่างระหว่างแคโทด (K) 5 um ระยะห่างระหว่างแอโนด (A) กับแคโทด (K) 20 um การสร้างอาศัยขบวนการของการผลิต CMOS เริ่มจากฐานรองชนิด n ค่าความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} ขั้วแอโนด p+ สร้างโดยใช้การยิงฝังประจุด้วยโบรอนได้ค่าความเข้มข้น 10^{19} cm^{-3} เมื่อสร้างเสร็จแล้วจะได้ออกมาดังรูปที่ 4.60

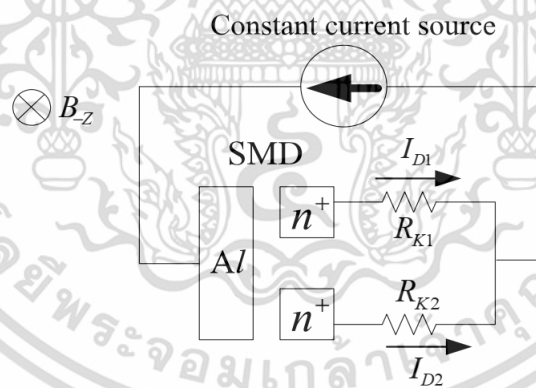


รูปที่ 4.59 มิติโครงสร้างมัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสง



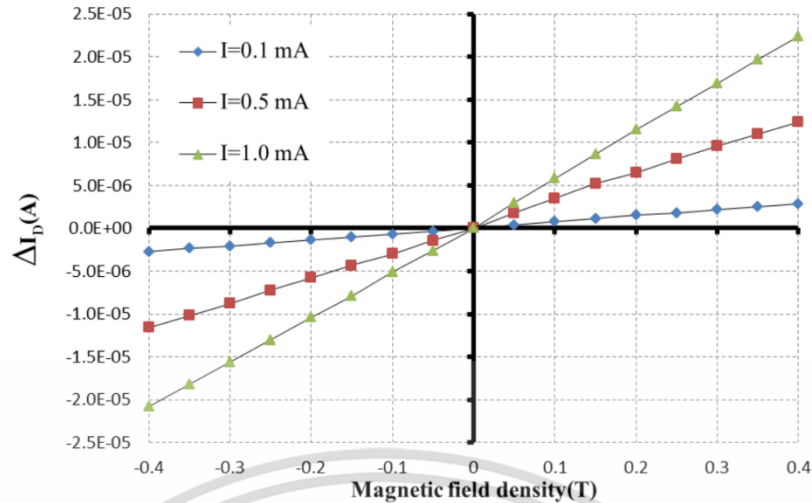
รูปที่ 4.60 มัลติเซนเซอร์ไดโอดสำหรับตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงที่ได้ทำการสร้าง

4.6.2.2 การตอบสนองสนามแม่เหล็ก

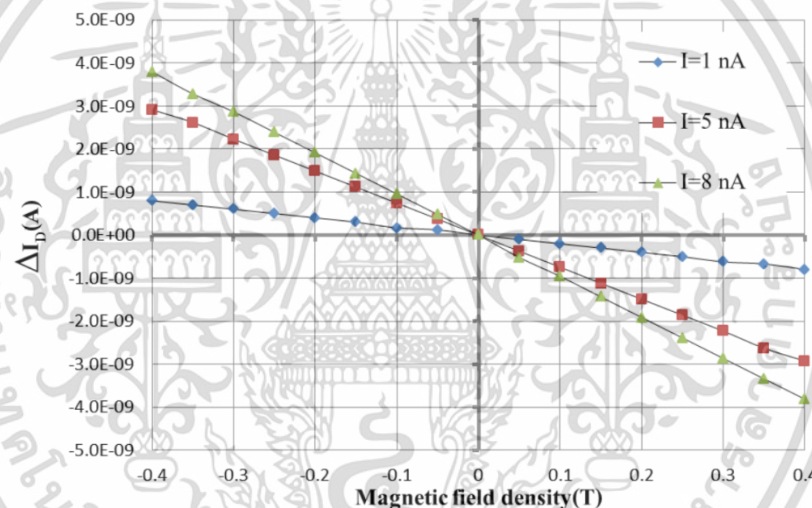


รูปที่ 4.61 วงจรวัดที่ใช้ทดสอบมัลติเซนเซอร์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



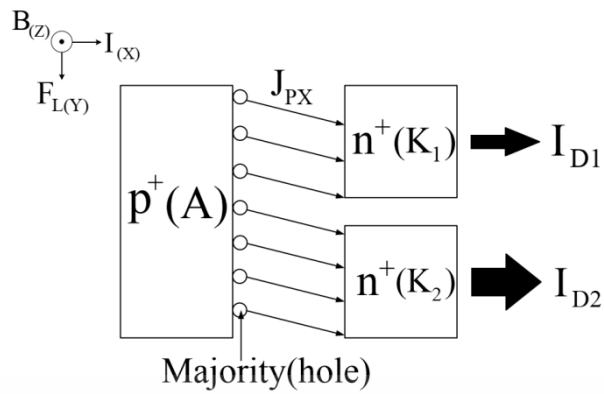
รูปที่ 4.62 การตอบสนองสนามแม่เหล็กในสภาวะไบอัสตรง



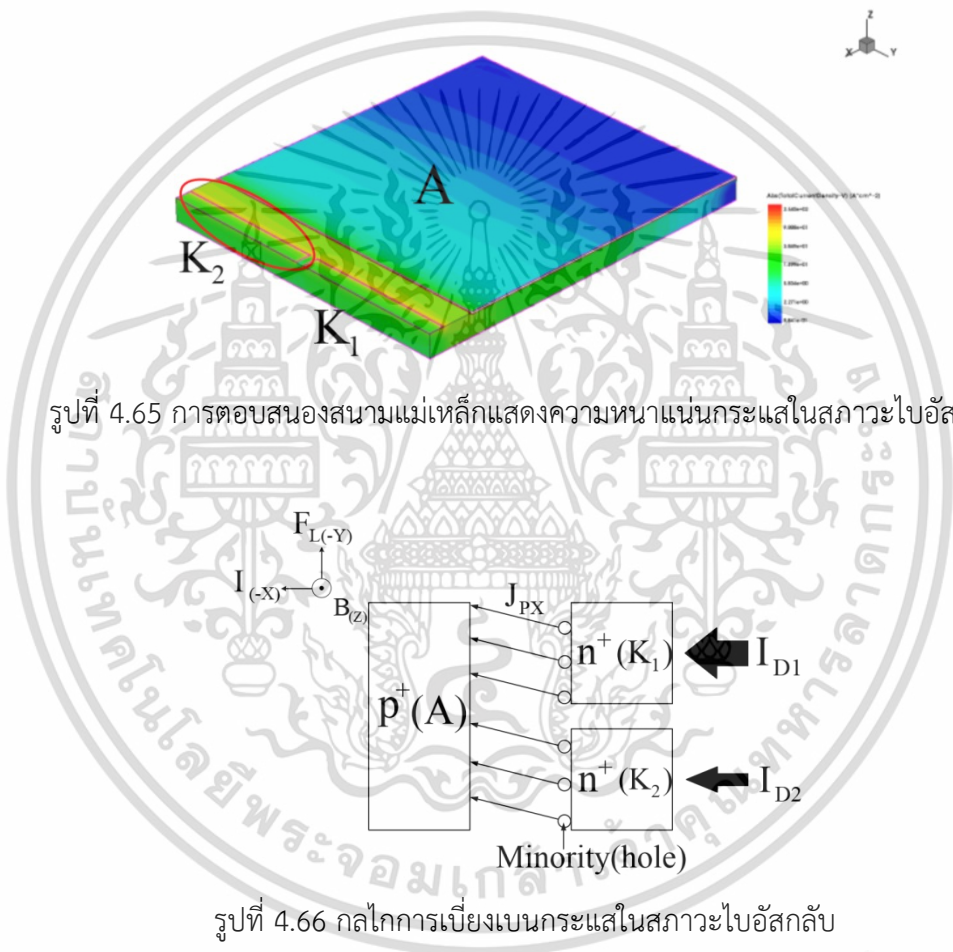
รูปที่ 4.63 การตอบสนองสนามแม่เหล็กในสภาวะไบอัสกลับ

กลไกการทำงานของ การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่ จากรูปที่ 4.61 เป็น วงจรวัดที่ใช้ทำการทดลองมีแหล่งจ่ายกระแสคงที่มีตัวต้านทาน R_{K1} และ R_{K2} ที่ใช้เป็นโหลดเพื่อวัด กระแส ผลวัดการตอบสนองสนามแม่เหล็กในสภาวะไบอัสตรงแสดงในรูปที่ 4.62 โดยใช้กระแสไบอัส ต่างกันสามค่าคือ 0.1, 0.5, 1.0 mA ตามลำดับ ใช้สนามแม่เหล็ก -0.4 ถึง 0.4 mT ได้ความชันหรือ ความไวการตอบสนองสัมพัทธ์ (S_R) 48, 52 และ 57 mT^{-1} ตามลำดับ ผลวัดการตอบสนอง สนามแม่เหล็กในสภาวะไบอัสกลับแสดงในรูปที่ 4.63 โดยใช้กระแสไบอัสต่างกันสามค่าคือ 1, 5, 8 nA ตามลำดับ ใช้สนามแม่เหล็ก -0.4 ถึง 0.4 mT ได้ความชันหรือความไวการตอบสนองสัมพัทธ์ (S_R) 97, 118 และ 128 mT^{-1} ตามลำดับ ซึ่งกราฟที่ได้เป็นเชิงเส้น

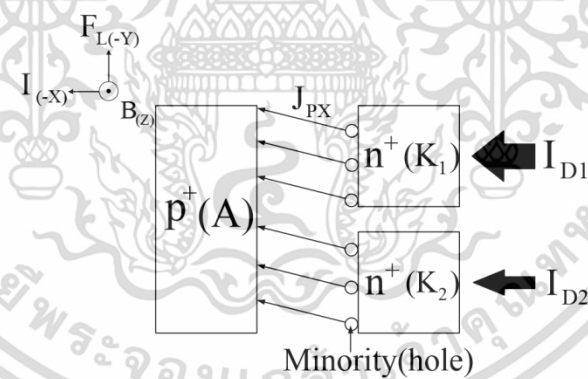
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



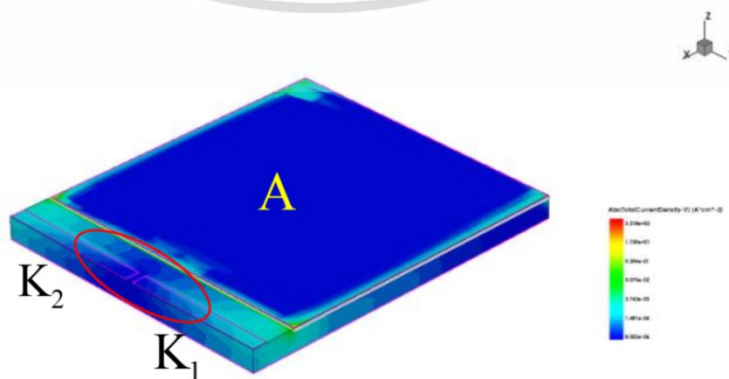
รูปที่ 4.64 กลไกการเบี่ยงเบนกระแสในสภาวะไบอัสตรง



รูปที่ 4.65 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแสในสภาวะไบอัสตรง



รูปที่ 4.66 กลไกการเบี่ยงเบนกระแสในสภาวะไบอัสกลับ



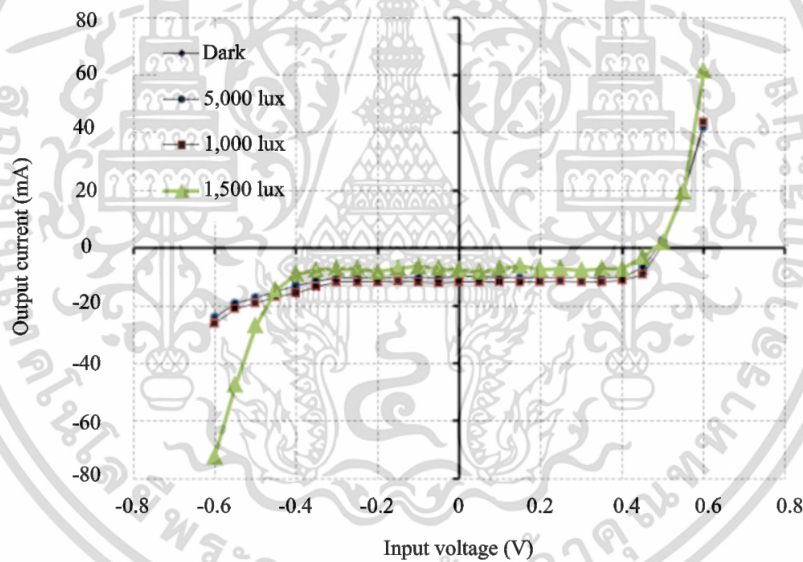
รูปที่ 4.67 การตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแสในสภาวะไบอัสกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

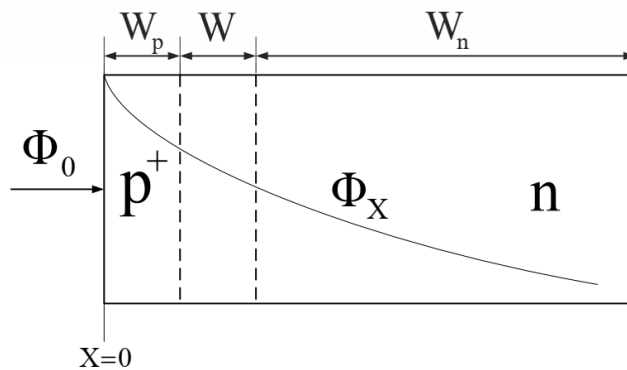
แบบจำลองอย่างง่ายของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ รูปที่ 4.64 แสดงกลไกการเบี่ยงเบนกระแสในสภาวะไบอัสตรงโดยมีโฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่โดยจะเบี่ยงเบนไปตามแรงลอเรนซ์ โดยเทียบกับแบบจำลองจากในรูปที่ 4.65 แบบจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแสในสภาวะไบอัสตรง ส่วนแบบจำลองอย่างง่ายของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ รูปที่ 4.66 แสดงกลไกการเบี่ยงเบนกระแสในสภาวะไบอัสกลับโดยมีโฮลเป็นพาหะส่วนน้อยโดยจะเบี่ยงเบนไปตามแรงลอเรนซ์ โดยเทียบกับแบบจำลองจากในรูปที่ 4.67 แบบจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กแสดงความหนาแน่นกระแสในสภาวะไบอัสกลับ

4.6.2.3 การตอบสนองต่อแสง

การตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสงจากรูปที่ 4.68 แสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจจับ ใช้เงื่อนไขทำการทดสอบแสงมาตรฐาน (25°C, AM 1.5, 100 W/m²) ที่ความเข้มแสง 5000, 10,000 และ 15,000 lux วัดกระแสมืด (dark current) ได้ 7.34×10^{-3} A วัดกระแสแสงจากมากไปน้อย 1.31×10^{-2} A, 1.19×10^{-2} A และ 1.01×10^{-2} A ตามลำดับ



รูปที่ 4.68 คุณสมบัติกระแสแรงดันที่การเปลี่ยนความเข้มแสงค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.69 การดูดกลืนโฟตอนไปตามระยะทางจากพื้นผิวของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสแสงเกิดจากการดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำที่เป็นโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นภายใต้ไบอัสกลับดังรูปที่ 4.69 โดยการดูดกลืนโฟตอนเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ (non-uniform) ตามระยะทางของอุปกรณ์ที่ $x = 0$ คือพื้นผิวของอุปกรณ์ W_p คือระยะความกว้างของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p+) W_n คือระยะความกว้างบริเวณปลอดพาหะ และ W_n คือระยะความกว้างของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(n) Φ_0 คือโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p+) บริเวณขั้วแอโนด (A) ความสัมพันธ์โฟตอนพลิกซ์ที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง

โพลีไดโอดสามารถทำงานได้ด้วยการไม่ต้องป้อนไฟไบอัสหรือป้อนไบอัสย้อนกลับ แมกนีโตไดโอดสามารถทำงานได้ทั้งไบอัสตรงและไบอัสกลับซึ่งในโหมดของการทำงานแบบไบอัสกลับจะให้ความไวการตอบสนองและประสิทธิภาพที่ดีกว่า พื้นที่ที่ใหญ่ของแอโนดสำหรับการดูดกลืนแสงจะเพิ่มกระแสอิ่มตัวให้กับรอยต่อพีเอ็นสำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กในโหมดย้อนกลับและกระแสมืดสำหรับการตรวจจับแสง

มัลติเซนเซอร์สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็กและแสงที่นำเสนอมานี้มีโครงสร้างเป็นแมกนีโตไดโอดแบบคู่ซึ่งมีขั้วแอโนดหนึ่งขั้วและมีขั้วแคโทดสองขั้ว การตรวจจับอาศัยความแตกต่างของกระแสแคโทดทั้งสองขั้วการเบี่ยงเบนพาหะอาศัยแรงลอเรนซ์การวัดสนามแม่เหล็กวัดได้ทั้งหมดไบอัสตรงและไบอัสกลับโดยไบอัสกลับจะให้ผลที่ดีกว่าการศึกษานี้จะทำการจำลองแบบเป็นตัวศึกษาการทำงานและหาประสิทธิภาพ การตอบสนองต่อแสงในการดูดกลืนโฟตอนจะใช้โหมดไบอัสกลับหรือไม่ต้องให้ไบอัสก็สามารถทำงานได้ การออกแบบจะอาศัยพื้นที่แอโนดขนาดใหญ่ในการดูดกลืนแสงกระแสมืดขึ้นอยู่กับกระบวนการในการสร้าง อุปกรณ์สามารถทำงานตรวจจับพลังงานได้ทั้งสองชนิดทั้งสนามแม่เหล็กและแสงในตัวเดียวกัน แต่ในการใช้งานจริงอาจจะมีข้อจำกัดในการใช้งานโดยควรจะทำารวัดสนามแม่เหล็กหรือวัดแสงอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวเพราะจะมีการรบกวนกันในการวัดเนื่องจากสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะจากแรงลอเรนซ์ และแสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะทำมีการเพิ่มหรือลดลงของพาหะทำให้การตรวจวัดมีความผิดพลาดได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

บทนี้กล่าวสรุปงานวิจัยอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่มีกลไกการทำงานแบบเบี่ยงเบนกระแส ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดแคโทดคู่กับแอโนดคู่ เจาะลึกถึงโครงสร้างหลักการทำงานและกลไกกระแสความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ผลการเพิ่มขึ้นของระยะเบี่ยงเบนพาหะกระแสไอออนของแมกนีโตไดโอดแบบคู่และระยะห่างระหว่างบริเวณรับกระแส ที่มีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่

แมกนีโตไดโอดแบบคู่มีโครงสร้างพื้นฐานคล้ายไดโอดสองตัวนำมาต่อรวมขั้วด้านหนึ่งเข้าด้วยกัน ในกรณีมีขั้วแอโนดร่วมกัน (A) จะเป็นชนิดแคโทดคู่ (K_1, K_2) และในกรณีมีขั้วแคโทดร่วมกัน (K) จะเป็นชนิดแอโนดคู่ (A_1, A_2) การใช้งานจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ด้วยการไบอัสตรงเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานอยู่ในโหมดกระแส

หลักการทำงานแมกนีโตไดโอดแบบคู่

จากโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นไดโอดแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่มีพาหะที่ทำงานส่วนใหญ่เป็นโฮล ส่วนชนิดแอโนดคู่มีพาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน การตรวจจับสนามแม่เหล็กอาศัยกระแสที่ฉีดพาหะข้ามรอยต่อจากขั้วร่วมไปยังฐานรองบริเวณพื้นที่เบี่ยงเบนพาหะซึ่งพาหะจะเบี่ยงเบนไปตามกฎมือขวาในทิศทางของแรงลอเรนซ์ กลไกการเบี่ยงเบนและการรวมตัวใหม่ของพาหะ ทำให้เกิดความแตกต่างของกระแส (ΔI_D) ที่ขั้วขาออกทั้งสอง

ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบคู่

ปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงลอเรนซ์ (F) มีแรงกระทำต่อพาหะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นดังสมการ

$$F = eE + e[v \times B]$$

สนามแม่เหล็ก (B) ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มุมการเคลื่อนที่ของพาหะ (θ_H) เบี่ยงเบนกว้างขึ้นดังสมการแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z$$

แมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่

$$\tan \theta_H = \mu_n \cdot B_z$$

การเพิ่มขึ้นของกระแสไบอัสเป็นการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของพาหะ (J_{px} , J_{pn}) ทำให้การเบี่ยงเบนพาหะมีค่ามากขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างของกระแสเอาต์พุต (ΔI_D) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นและส่งผลกระทบต่อเนื้องให้ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยดังสมการแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดคู่

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \cdot B_z$$

แมกนีโตไดโอดชนิดแอโนดคู่

$$\Delta I_D = J_{nx} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_n \cdot B_z$$

การจำลองแบบมีช่องว่างกับไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสในแมกนีโตไดโอดแบบคู่

พบว่าแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะให้ค่าความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสูงกว่าแบบมีช่องว่างบริเวณรับกระแส เนื่องจากแบบไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสจะรับกระแสได้มากกว่าไม่เสียพื้นที่รับกระแสช่องว่างระหว่างบริเวณรับกระแส

การประยุกต์ใช้งานแมกนีโตไดโอดแบบคู่

จากหลักการของแมกนีโตไดโอดแบบคู่นำมาทดลองสร้างเป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการไม่มีช่องว่างบริเวณรับกระแสนำมาใช้กับโครงสร้างโลหะสารกึ่งตัวนำโลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) ซึ่งจะประกอบด้วยรอยต่อชอตกี (Schottky) สองรอยต่อหันหลังชนกันเพื่อศึกษาหลักการพื้นฐานการตรวจจับสนามแม่เหล็ก และยังนำโครงสร้างที่ง่ายของแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นมาใช้เป็นมัลติเซนเซอร์ไดโอดโดยใช้วัสดุสนามแม่เหล็กและแสงได้ในตัวเดียวกัน

จากการทำความเข้าใจหลักการพื้นฐานในโครงสร้างมิติของอุปกรณ์ และกลไกการทำงานจนนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถพัฒนาเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เดี่ยวหรือใช้ในวงจรรวมได้ ตัวอุปกรณ์มีเสถียรภาพมีความทนทานเพราะมีโครงสร้างที่เรียบง่ายเช่นเดียวกับไดโอด จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความน่าสนใจเหมาะที่จะนำไปพัฒนาต่อในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future generation computer systems*, vol. 29, pp. 1645-1660, 2013.
- [2] X. Liu, K. Lam, K. Zhu, C. Zheng, X. Li, Y. Du, *et al.*, "Overview of spintronic sensors with internet of things for smart living," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, pp. 1-22, 2019.
- [3] J. Manyika, M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, R. Dobbs, J. Bughin, *et al.*, "The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype," 2015.
- [4] O. Vermesan and J. Bacquet, "Next generation Internet of Things: Distributed intelligence at the edge and human machine-to-machine cooperation," ed: River Publishers, 2019.
- [5] S. Shenghe, "Development trend of modern sensor [J]," *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, vol. 1, pp. 1-10, 2009.
- [6] O. Kanoun and H. Trankler, "Sensor technology advances and future trends," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, pp. 1497-1501, 2004.
- [7] J. E. Lenz, "A review of magnetic sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, pp. 973-989, 1990.
- [8] J. Clarke and R. H. Koch, "The impact of high-temperature superconductivity on SQUID magnetometers," *Science*, vol. 242, pp. 217-223, 1988.
- [9] J. E. Lenz, G. L. Mitchell, and C. D. Anderson, "Fiber Optic Magnetometer Design," in *Fiber Optic and Laser Sensors II*, 1984, pp. 86-90.
- [10] F. Bucholtz, K. Koo, A. Kersey, and A. Dandridge, "Fiber optic magnetic sensor development," in *Fiber Optic and Laser Sensors IV*, 1987, pp. 56-65.
- [11] F. Colegrove, L. Schearer, and G. Walters, "Polarization of He 3 gas by optical pumping," *Physical Review*, vol. 132, p. 2561, 1963.
- [12] J. H. W. Göpel, JN Zemel, "Sensors, Magnetic Sensors," ed: VCH, Weinheim, 1989.
- [13] T. McGuire and R. Potter, "Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 11, pp. 1018-1038, 1975.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] R. Hebbert and L. Schwee, "Thin film magnetoresistance magnetometer," *Review of Scientific Instruments*, vol. 37, pp. 1321-1323, 1966.
- [15] K. Kuijk, W. Van Gestel, and F. Gorter, "The barber pole, a linear magnetoresistive head," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 11, pp. 1215-1217, 1975.
- [16] U. Dibbern, "Sensors based on the magnetoresistive effect," *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 221-227, 1983.
- [17] U. Dibbern, "Magnetic field sensors using the magnetoresistive effect," *Sensors and Actuators*, vol. 10, pp. 127-140, 1986.
- [18] H. Wen-hui, Y. Guo-zheng, and G. Xu-dong, "The Application of Magnetoresistive Sensor in Detecting the Capsule's Localization in GI," in *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2006, pp. 2762-2765.
- [19] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 33, pp. 129-141, 1992.
- [20] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 12, p. 241, 1979.
- [21] T. Seitz, "Fluxgate sensor in planar microtechnology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 22, pp. 799-802, 1990.
- [22] S. Kawahito, Y. Sasaki, H. Sato, T. Nakamura, and Y. Tadokoro, "A fluxgate magnetic sensor with micro-solenoids and electroplated permalloy cores," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 43, pp. 128-134, 1994.
- [23] M. Schneider, S. Kawahito, Y. Tadokoro, and H. Baltes, "High sensitivity CMOS microfluxgate sensor," in *International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest*, 1997, pp. 907-910.
- [24] P. Ripka, "Magnetic sensors for industrial and field applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 42, pp. 394-397, 1994.
- [25] R. Steiner Vanha and H. Baltes, "Rotary switch and current monitor by Hall-based microsystems," ETH Zurich, 1999.
- [26] C. Chien, "The Hall effect and its applications," ed: Springer Science & Business Media, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] L. Ristic, H. Baltes, T. Smy, and I. Filanovsky, "**Suppressed sidewall injection magnetotransistor with focused emitter injection and carrier double deflection,**" *IEEE electron device letters*, vol. 8, pp. 395-397, 1987.
- [28] L. Ristic, T. Smy, and H. Baltes, "**A lateral magnetotransistor structure with a linear response to the magnetic field,**" *IEEE transactions on electron devices*, vol. 36, pp. 1076-1086, 1989.
- [29] M. Metz, M. Schneider, A. Haberli, and H. Baltes, "**Analysis and reduction of CMOS magnetotransistor offset,**" in *28th European Solid-State Device Research Conference*, 1998, pp. 184-187.
- [30] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, *et al.*, "**A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection effect,**" *Microelectronics Journal*, vol. 45, pp. 565-573, 2014.
- [31] M. Metz, M. Schneider, A. Haberli, and H. Baltes, "**Offset reduction in multicollector magnetotransistors,**" in *International Electron Devices Meeting. Technical Digest*, 1996, pp. 537-540.
- [32] V. Stafeev, "**Modulation of diffusion length as a new principle of operation of semiconductor devices,**" *Soviet Physics-Solid State*, vol. 1, pp. 763-768, 1959.
- [33] E. S. Karakushan, VI, "**Magnetodiodes,**" *Soviet Physics-Solid State*, vol. 3, pp. 493-498, 1961.
- [34] R. 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.
- [35] G. W. Day and A. H. Rose, "**Faraday effect sensors: the state of the art,**" in *Fiber Optic and Laser Sensors VI*, 1989, pp. 138-150.
- [36] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, *et al.*, "**Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices,**" *Physical review letters*, vol. 61, p. 2472, 1988.
- [37] C. H. Smith and R. W. Schneider, "**Expanding the horizons of magnetic sensing: GMR,**" *Proceedings Sensors Expo Boston*, pp. 139-144, 1997.

- [38] R. Popović, "Hall-effect devices," *Sensors and Actuators*, vol. 17, pp. 39-53, 1989.
- [39] R. Nakachai, T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai, "Simulation of MOSFET as horizontal magnetic mosfet (MAGFET)," in *2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST)*, 2017, pp. 19-23.
- [40] R. Nakachai, S. Poonsawat, C. Sutthinet, A. Ruangphanit, A. Poyai, and T. Phetchakul, "Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure," in *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2018, pp. 1-4.
- [41] R. Nakachai, A. Poyai, and T. Phetchakul, "Non-Split Drain MAGFET," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019, pp. 1-4.
- [42] N. Rezaei, R. Dehghani, A. Jalili, and A. Mosahebfard, "CMOS magnetic sensor with MAGFET," in *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2013, pp. 1-5.
- [43] C. Pamonchom, R. Nakachai, C. Sutthinet, A. Poyai, and T. Phetchakul, "Magnetic FinFET (MAGFinFET)," in *2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2019, pp. 230-233.
- [44] R. S. Popovic, "Hall effect devices," ed: CRC Press, 2003.
- [45] E. H. Hall, "On a new action of the magnet on electric currents," *American Journal of Mathematics*, vol. 2, pp. 287-292, 1879.
- [46] M. Crescentini, M. Biondi, A. Romani, M. Tartagni, and E. Sangiorgi, "Optimum design rules for CMOS hall sensors," *Sensors*, vol. 17, p. 765, 2017.
- [47] E. Ramsden, "Hall-effect sensors: theory and application," ed: Elsevier, 2011.
- [48] O. Corbino, "Elektromagnetische Effekte, die von der Verzerrung herrühren, welche ein Feld an der Bahn der Ionen in Metallen hervorbringt," *Phys. Z.*, vol. 12, p. 561, 1911.
- [49] D. J. W. C, "Hall Effect Device," *U.S. patent no. US2725504A*, 29 November 1955.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] M. J. Ross, "**Hall Effect Device**," *U.S. patent no. US2980860A*, 18 April 1961.
- [51] M.-A. Paun, J.-M. Sallese, and M. Kayal, "**Comparative study on the performance of five different Hall effect devices**," *Sensors*, vol. 13, pp. 2093-2112, 2013.
- [52] H.-J. Lippmann and F. Kuhrt, "**Der Geometrieinfluss auf den Hall-effekt bei rechteckigen Halbleiterplatten**," *Zeitschrift für Naturforschung A*, vol. 13, pp. 474-483, 1958.
- [53] J. Haeusler, "**Die Geometriefunktion vierelektrodiger Hallgeneratoren**," *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 52, pp. 11-19, 1968.
- [54] I. Kirnas, P. Kurilo, P. Litovchenko, V. Lutsyak, and V. Nitsovich, "**Concentration dependence of the hall factor in n-type silicon**," *physica status solidi (a)*, vol. 23, pp. K123-K127, 1974.
- [55] T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai, "**The effect of deviation current to 5-contacts vertical Hall device**," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-4.
- [56] S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai, "**Effect of substrate depth to 5-contact vertical hall**," in *2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2017, pp. 620-623.
- [57] R. Popovic, "**The vertical Hall-effect device**," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 5, pp. 357-358, 1984.
- [58] J. W. Gardner, "**Microsensors: principles and applications**," 1994.
- [59] Y.-C. Wu, Jhan, Yi-Ruei, "**3D TCAD Simulation for CMOS Nanoelectronic Devices**," ed: Springer Nature, 2018.
- [60] S. Li and S. Li, "**3D TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics**," ed: Springer Science & Business Media, 2011.
- [61] C. Sutthinet, A. Poyai, and T. Phetchakul, "**A Novel Dual Magnetodiode for Wireless Sensor Networks**," *Journal of Mobile Multimedia*, pp. 23-44-23-44, 2020.

- [62] J. Slotboom and H. De Graaff, "Bandgap narrowing in silicon bipolar transistors," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 24, pp. 1123-1125, 1977.
- [63] D. Klaassen, J. Slotboom, and H. De Graaff, "Unified apparent bandgap narrowing in n-and p-type silicon," *Solid-State Electronics*, vol. 35, pp. 125-129, 1992.
- [64] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi, "Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 30, pp. 764-769, 1983.
- [65] C. Canali, G. Majni, R. Minder, and G. Ottaviani, "Electron and hole drift velocity measurements in silicon and their empirical relation to electric field and temperature," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 22, pp. 1045-1047, 1975.
- [66] D. M. Caughey and R. Thomas, "Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [67] H. Goebel and K. Hoffmann, "Full dynamic power diode model including temperature behavior for use in circuit simulators," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*, 1992, pp. 130-135.
- [68] A. Schenk, "A model for the field and temperature dependence of Shockley-Read-Hall lifetimes in silicon," *Solid-State Electronics*, vol. 35, pp. 1585-1596, 1992.
- [69] A. Schenk and U. Krumbein, "Coupled defect-level recombination: Theory and application to anomalous diode characteristics," *Journal of applied physics*, vol. 78, pp. 3185-3192, 1995.
- [70] G. Hurkx, D. Klaassen, M. Knuvers, and F. O'hara, "A new recombination model describing heavy-doping effects and low-temperature behaviour," in *International Technical Digest on Electron Devices Meeting*, 1989, pp. 307-310.
- [71] R. Häcker and A. Hangleiter, "Intrinsic upper limits of the carrier lifetime in silicon," *Journal of Applied Physics*, vol. 75, pp. 7570-7572, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [72] W. Lochmann and A. Haug, "Phonon-assisted Auger recombination in Si with direct calculation of the overlap integrals," *Solid State Communications*, vol. 35, pp. 553-556, 1980.
- [73] L. Huldt, N. Nilsson, and K. Svantesson, "The temperature dependence of band-to-band Auger recombination in silicon," *Applied Physics Letters*, vol. 35, pp. 776-777, 1979.
- [74] A. Cuevas, P. Basore, G. Giroult-Matlakowski, and C. Dubois, "Surface recombination velocity and energy bandgap narrowing of highly doped n-type silicon," *Proc. of the 13th EU PVSEC*, pp. 337-342, 1995.
- [75] W. Allegretto, A. Nathan, and H. Baltes, "Numerical analysis of magnetic-field-sensitive bipolar devices," *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, vol. 10, pp. 501-511, 1991.
- [76] C. Riccobene, K. Gärtner, G. Wachutka, H. Baltes, and W. Fichtner, "Full three-dimensional numerical analysis of multi-collector magnetotransistors with directional sensitivity," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 46, pp. 289-293, 1995.
- [77] C. Riccobene, G. Wachutka, J. Burgler, and H. Baltes, "Operating principle of dual collector magnetotransistors studied by two-dimensional simulation," *IEEE transactions on electron devices*, vol. 41, pp. 32-43, 1994.
- [78] C. Sutthinet, S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai, "The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, p. 012013.
- [79] C. Sutthinet, T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, and A. Poyai, "The Design of Metal-Semiconductor-Metal Structure Magnetic Sensor," *Procedia Computer Science*, vol. 86, pp. 148-151, 2016.
- [80] C. Sutthinet, T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, and A. Poyai, "Multi-sensor diode for magnetic field and photo detection," in *10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2015, pp. 179-182.

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

Crystal properties	Value	Units
Structure	Cubic	
Space Group	Fd3m	
Atomic weight	28.0855	
Lattice spacing (a_0) at 300K	0.54311	nm
Density at 300K	2.3290	g/cm^3
Nearest Neighbor Distance at 300K	0.235	nm
Number of atoms in 1 cm^3	$4.995 \cdot 10^{22}$	
Isotopes	28 (92.23%) 29 (4.67%) 30 (3.10%)	
Electron Shells	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	
Common Ions	$\text{Si}^{4+}, \text{Si}^{4-}$	
Critical Pressure	1450	atm
Critical Temperature	4920	$^{\circ}\text{C}$
Band structure properties	Value	Units
Dielectric Constant at 300 K	11.9	
Effective density of states (conduction, N_c T=300 K)	2.8×10^{19}	cm^{-3}
Effective density of states (valence, N_v T=300 K)	1.04×10^{19}	cm^{-3}
Electron affinity	133.6	kJ/mol
Energy Gap E_g at 300 K (Minimum Indirect Energy Gap at 300 K)	1.12	eV
Band structure properties	Value	Units

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

Electrical properties	Value	Units
Breakdown field	$\approx 3 \cdot 10^5$	V/cm
Index of refraction	3.42	
Mobility electrons	≈ 1400	$\text{cm}^2 / (\text{V} \times \text{s})$
Mobility holes	≈ 450	$\text{cm}^2 / (\text{V} \times \text{s})$
Diffusion coefficient electrons	≈ 36	cm^2 / s
Diffusion coefficient holes	≈ 12	cm^2 / s
Electron thermal velocity	$2.3 \cdot 10^5$	m/s
Electronegativity	1.8	Pauling's

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทางโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hole thermal velocity		$1.65 \cdot 10^5$	m/s
Optical phonon energy		0.063	eV
Density of surface atoms	(100)	6.78	$10^{14}/\text{cm}^2$
	(110)	9.59	$10^{14}/\text{cm}^2$
	(111)	7.83	$10^{14}/\text{cm}^2$
Work function (intrinsic)		4.15	eV
Ionization Energies for Various Dopants	<i>Donors</i>		
	Sb	0.039	eV
	P	0.045	eV
	As	0.054	eV
	<i>Acceptors</i>		
	B	0.045	eV
	Al	0.067	eV
	Ga	0.072	eV
	In	0.16	eV
Mechanical properties		Value	Units
Bulk modulus of elasticity		$9.8 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
Density		2.329	g/cm^3
Hardness		7	Mohs scale
Surface microhardness (using Knoop's pyramid test)		1150	kg/mm^2
Elastic constants		$C_{11} = 16.60 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
		$C_{12} = 6.40 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
		$C_{44} = 7.96 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
Bulk modulus of elasticity		$9.8 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
Young's Modulus (E)	[100]	129.5	GPa
	[110]	168.0	GPa
	[111]	186.5	GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คำสั่งในการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD

ในการจำลองแบบโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบคู่จะใช้คำสั่งที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง 2. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนด mesh และขั้วไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง และ 3. คำสั่งจำลองการทำงานและกำหนดพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ โดยคำสั่งที่ใช้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง (Process simulation)

```

;-----
;----- Title: Magnetodiode Split Cathode -----
;-----
(define ROUNDING #f)
(sdepe:substrate "Silicon" (list "PhosphorusActiveConcentration" 1e15) 200.0 (list 0.0 0.0 50.0 40.0))
(sdepe:comment "Added process flow header")
(define IsPType (lambda (Doping) (< Doping 0)))
(define IsNType (lambda (Doping) (not (IsPType Doping))))
(define ChooseDopant
  (lambda (Doping DopantList) ; DopantList: (Donor Acceptor)
    (if (IsNType Doping)
        (list-ref DopantList 0)
        (list-ref DopantList 1))
    )
  )
(define ActiveConcentration (lambda (Dopant) (string-append Dopant "ActiveConcentration"
)))
(define DopantList (list "Phosphorus" "Boron" ))

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

(define NDopant (ChooseDopant NDope DopantList))
(define PDopant (ChooseDopant PDope DopantList))
(sdedr:define-gaussian-profile
  "DP.IMP2" (ActiveConcentration NDopant)
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" (abs NDope)
  "ValueAtDepth" 2e15
  "Depth" Xj
  "Erf" "Factor" 0.8)

(sdedr:define-gaussian-profile
  "DP.IMP1" (ActiveConcentration PDopant)
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" (abs PDope)
  "ValueAtDepth" 2e15

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

"Depth" Xj
"Erf" "Factor" 0.8)
(sdepe:pmask "mask0" "Resist" 2.0 "dark" (list (list 30.4 15.0 19.6 15.0 19.6 6.5 30.4 6.5))
ROUNDING "top")
(sdepe:implant "DP.IMP1" )
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask1" "Resist" 2.0 "dark" (list (list 12.5 25.0 22.5 25.0 22.5 35.0 12.5
35.0)(list 27.5 25.0 37.5 25.0 37.5 35.0 27.5 35.0)) ROUNDING "top")
(sdepe:implant "DP.IMP2" )
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask2" "Resist" 2.0 "light" (list (list 36.5 34.2 13.5 34.2 13.5 24.4 20.4 15.0
20.4 7.4 29.6 7.4 29.6 15.0 36.5 24.4)) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Silicon" 1.0 "anisotropic" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:deposit "SiO2" 1.0 (list ) "anisotropic" ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask3" "Resist" 2.0 "dark" (list (list 36.5 34.2 13.5 34.2 13.5 24.4 20.4 15.0
20.4 7.4 29.6 7.4 29.6 15.0 36.5 24.4)) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "SiO2" 1.0 "anisotropic" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:deposit "Aluminum" 1.0 (list ) "isotropic" ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask4" "Resist" 2.0 "light" (list (list 15.68 28.213 19.28 28.213 19.28 31.813
15.68 31.813)(list 24.4 9.4 25.6 9.4 25.6 13.0 24.4 13.0)(list 30.696 28.211 34.296 28.211
34.296 31.811 30.696 31.811)) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Aluminum" 1.0 "anisotropic" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:save "n2_msh" "" "DFISEBND")

;-----
;----- Title: Magnetodiode Split Anode -----
;-----
(define ROUNDING #f)
(sdepe:substrate "Silicon" (list "BoronActiveConcentration" 1e15) 200.0 (list 0.0 0.0 50.0
40.0))
(sdepe:comment "Added process flow header")
(define IsPType (lambda (Doping) (< Doping 0)))
(define IsNType (lambda (Doping) (not (IsPType Doping))))
(define ChooseDopant
  (lambda (Doping DopantList) ; DopantList: (Donor Acceptor)
    (if (IsNType Doping)
        (list-ref DopantList 0)
        (list-ref DopantList 1)
    )
  )
)
)
)
)
(define ActiveConcentration (lambda (Dopant) (string-append Dopant "ActiveConcentration"
)))

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

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

(define NDopant (ChooseDopant NDope DopantList))
(define PDopant (ChooseDopant PDope DopantList))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(sdedr:define-gaussian-profile
  "DP.IMP2" (ActiveConcentration NDopant)
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" (abs NDope)
  "ValueAtDepth" 2e15
  "Depth" Xj
  "Erf" "Factor" 0.8)

(sdedr:define-gaussian-profile
  "DP.IMP1" (ActiveConcentration PDopant)
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" (abs PDope)
  "ValueAtDepth" 2e15
  "Depth" Xj
  "Erf" "Factor" 0.8)
(sdepe:pmask "mask0" "Resist" 2.0 "dark" (list (list 12.5 25.0 22.5 25.0 22.5 35.0 12.5
35.0)(list 27.5 25.0 37.5 25.0 37.5 35.0 27.5 35.0)) ROUNDING "top")
(sdepe:implant "DP.IMP1" )
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask1" "Resist" 2.0 "dark" (list (list 30.4 15.0 19.6 15.0 19.6 6.5 30.4 6.5))
ROUNDING "top")
(sdepe:implant "DP.IMP2" )
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask2" "Resist" 2.0 "light" (list (list 36.5 34.2 13.5 34.2 13.5 24.4 20.4 15.0
20.4 7.4 29.6 7.4 29.6 15.0 36.5 24.4)) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Silicon" 1.0 "anisotropic" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:deposit "SiO2" 1.0 (list ) "anisotropic" ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask3" "Resist" 2.0 "dark" (list (list 36.5 34.2 13.5 34.2 13.5 24.4 20.4 15.0
20.4 7.4 29.6 7.4 29.6 15.0 36.5 24.4)) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "SiO2" 1.0 "anisotropic" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:deposit "Aluminum" 1.0 (list ) "isotropic" ROUNDING "top")
(sdepe:pmask "mask4" "Resist" 2.0 "light" (list (list 15.68 28.213 19.28 28.213 19.28 31.813
15.68 31.813)(list 24.4 9.4 25.6 9.4 25.6 13.0 24.4 13.0)(list 30.696 28.211 34.296 28.211
34.296 31.811 30.696 31.811)) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Aluminum" 1.0 "anisotropic" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:multi-etch "Resist" 10.0 "strip" 0 0 (gvector 0 0 -1) ROUNDING "top")
(sdepe:save "n2_msh" "" "DFISEBND")
;
-----

```

2. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดค่า mesh และขั้วไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง

```

;
-----
;----- Title: Magnetodiode Split Cathode -----
;
-----
(define MeshFactor 1.0)
;===== Utilities functions =====
(define wy-refine-profile-in-material (lambda (mat dx dy dz) (begin
  (sdedr:define-refinement-size
    (string-append "RSize.Profile." mat)
    1000 1000 1000
    dx dy dz)
  (sdedr:define-refinement-material
    (string-append "RP.Profile." mat)
    (string-append "RSize.Profile." mat)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mat)
(sdedr:define-refinement-function
  (string-append "RSize.Profile." mat)
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
)))

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

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

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

(sdedr:define-refinement-window "RW.Cathode1"
  "Cuboid" (position 12.5 25 198.5) (position 22.5 35 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Cathode1"
  0.5 0.5 0.5
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Cathode1"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Cathode1" "RS.Cathode1" "RW.Cathode1" )

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.Cathode2"
  "Cuboid" (position 27.5 25 198.5) (position 37.5 35 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Cathode2"
  0.5 0.5 0.5
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Cathode2"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Cathode2" "RS.Cathode2" "RW.Cathode2" )

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.Anode"
  "Cuboid" (position 19.6 6.5 198.5) (position 30.4 15 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Anode"
  0.5 0.5 0.5
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Anode"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Anode" "RS.Anode" "RW.Anode" )

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.Etch"
  "Cuboid" (position 13.5 7.4 199) (position 36.5 34.2 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Etch"

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

0.5 0.5 0.5
0.01 0.01 0.01 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Etch"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Etch" "RS.Etch" "RW.Etch" )

;-----

; ===== Contacts =====
;-- Cathode1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Cathode1" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Cathode1")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 17.5 30 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 17.5 30 200.5)))

;-- Cathode2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Cathode2" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Cathode2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 32.5 30 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 32.5 30 200.5)))

;-- Anode contact:
(sdegeo:define-contact-set "Anode" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "##" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Anode")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 25 11.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 25 11.5 200.5)))

;-- substrate contact:
(define dfbool (sdegeo:get-default-boolean))
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
(sdegeo:create-cuboid (position -50 -40 -200.0)
  (position 50 40 199.9) "Metal" "SubstrateCut")

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

;----- Save structure -----
; Save BND file
(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "n4_bnd.tdr")

; Save CMD file
(sdedr:write-cmd-file "n4_msh.cmd")

; Build Mesh
(system:command "snmesh n4_msh")

;-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

-----
;----- Title: Magnetodiode Split Anode -----
;-----
(define MeshFactor 1.0)
===== Utilities functions =====
(define wy-refine-profile-in-material (lambda (mat dx dy dz) (begin
  (sdedr:define-refinement-size
    (string-append "RSize.Profile." mat)
    1000 1000 1000
    dx dy dz)
  (sdedr:define-refinement-material
    (string-append "RP.Profile." mat)
    (string-append "RSize.Profile." mat)
    mat)
  (sdedr:define-refinement-function
    (string-append "RSize.Profile." mat)
    "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
  )))

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

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

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

(sdedr:define-refinement-window "RW.Anode1"
  "Cuboid" (position 12.5 25 198.5) (position 22.5 35 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Anode1"
  0.5 0.5 0.5
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Anode1"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Anode1" "RS.Anode1" "RW.Anode1" )

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.Anode2"
  "Cuboid" (position 27.5 25 198.5) (position 37.5 35 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Anode2"
  0.5 0.5 0.5
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Anode2"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Anode2" "RS.Anode2" "RW.Anode2" )

;-----

```

เอกสารนี้ (sdedr:define-refinement-window "RW.Cathode" เท่านั้น) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
"Cuboid" (position 19.6 6.5 198.5) (position 30.4 15 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Cathode"
  0.5 0.5 0.5
  0.1 0.1 0.1 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Cathode"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Cathode" "RS.Cathode" "RW.Cathode" )
```

```
-----
```

```
(sdedr:define-refinement-window "RW.Etch"
  "Cuboid" (position 13.5 7.4 199) (position 36.5 34.2 200) )
(sdedr:define-refinement-size "RS.Etch"
  0.5 0.5 0.5
  0.01 0.01 0.01 )
(sdedr:define-refinement-function "RS.Etch"
  "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1)
(sdedr:define-refinement-placement "RP.Etch" "RS.Etch" "RW.Etch" )
```

```
-----
```

```
===== Contacts =====
;-- Anode1 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Anode1" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "###" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Anode1")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 17.5 30 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 17.5 30 200.5)))

;-- Anode2 contact:
(sdegeo:define-contact-set "Anode2" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "###" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Anode2")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 32.5 30 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 32.5 30 200.5)))

;-- Cathode contact:
(sdegeo:define-contact-set "Cathode" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "###" )
(sdegeo:set-current-contact-set "Cathode")
(sdegeo:set-contact-boundary-faces (find-body-id (position 25 11.5 200.5)))
(sdegeo:delete-region (find-body-id (position 25 11.5 200.5)))

;-- substrate contact:
(define dfbool (sdegeo:get-default-boolean))
(sdegeo:set-default-boolean "ABA")
(sdegeo:create-cuboid (position -50 -40 -200.0)
  (position 50 40 199.9) "Metal" "SubstrateCut")

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

```
===== Save structure =====
```

```
; Save BND file
```

```
(sdeio:save-tdr-bnd (get-body-list) "n4_bnd.tdr")
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; Save CMD file
(sdedr:write-cmd-file "n4_msh.cmd")
```

```
; Build Mesh
(system:command "snmesh n4_msh")
```

```
;
```

3. คำสั่งจำลองการทำงานและกำหนดพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์

```
;
```

```
----- Title: Magnetodiode Split Cathode -----
```

```
;
```

```
Electrode {
  { Name="Anode" Voltage=@Va@ }
  { Name="Cathode1" Voltage=0.0 }
  { Name="Cathode2" Voltage=0.0 }
}
```

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

```
Physics {
  EffectiveIntrinsicDensity( Slotboom )
  Mobility (
    DopingDep(Masetti)
    CarrierCarrierScattering(ConwellWeisskopf)
    HighFieldSaturation
  )
  Recombination (
    TrapAssistedAuger
    SRH(DopingDep)
    surfaceSRH
  )
  MagneticField = ( 0.0, 0.0, @BField@ )
}
```

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

```
Plot {
  eDensity hDensity
  eCurrent/Vector hCurrent/Vector
  Current/Vector
  ElectricField/Vector Potential SpaceCharge
  # eQuasiFermi hQuasiFermi
  # egradQuasiFermi hgradQuasiFermi
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

# Potential Doping SpaceCharge
# SRH Auger
# eMobility hMobility
# DonorConcentration AcceptorConcentration
# Doping
# eVelocity hVelocity
# ConductionBandEnergy ValanceBandEnergy BandGap
# eQuasiFermi hQuasiFermi
# SurfaceRecombination
# Polarization/Vector
}

Math {
  Iterations = 25
  Notdamped = 100
  RelErrControl
  ErRef(Electron)=1.e10
  ErRef(Hole)=1.e10
}

Solve {
  # Coupled (LineSearchDamping=0.01) { Poisson }
  Coupled ( Iterations=25 ) { Poisson }
  Coupled { Poisson Electron Hole }

  Set ( "Anode" mode Current )

  NewCurrentFile= "MagDiode_"
  Quasistationary (
  InitialStep=1e-6 Increment=1.5
  Minstep=1e-8 MaxStep=0.3
  Goal { Name = "Anode" Current = @Ia@ }
  ){ Coupled {Poisson Electron Hole}
  CurrentPlot ( Time = (Range = (0.0 0.2) Intervals=10;
                    Range = (0.2 1.0) Intervals=20))
}
}
;-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

-----
----- Title: Magnetodiode Split Anode -----
-----
Electrode {
  { Name="Anode1" Voltage=@Va@ }
  { Name="Anode2" Voltage=@Va@ }
  { Name="Cathode" Voltage=0.0 }
}

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

Physics {
  EffectiveIntrinsicDensity( Slotboom )
  Mobility (
    DopingDep(Masetti)
    CarrierCarrierScattering(ConwellWeisskopf)
    HighFieldSaturation
  )
  Recombination (
    TrapAssistedAuger
    SRH(DopingDep)
    Avalanche(vanOverstraeten)
    surfaceSRH
  )
  MagneticField = ( 0.0, 0.0, @BField@ )
}

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

Plot {
  eDensity hDensity
  eCurrent/Vector hCurrent/Vector
  Current/Vector
  ElectricField/Vector Potential SpaceCharge
  # eQuasiFermi hQuasiFermi
  # egradQuasiFermi hgradQuasiFermi
  # Potential Doping SpaceCharge
  # SRH Auger
  # eMobility hMobility
  # DonorConcentration AcceptorConcentration
  # Doping
  # eVelocity hVelocity
  # ConductionBandEnergy ValanceBandEnergy BandGap
  # eQuasiFermi hQuasiFermi
  # SurfaceRecombination
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

# Polarization/Vector
}

Math {
  Iterations = 25
  Notdamped = 100
  RelErrControl
  ErRef(Electron)=1.e10
  ErRef(Hole)=1.e10
}

Solve {
  # Coupled (LineSearchDamping=0.01) { Poisson }
  Coupled ( Iterations=25 ) { Poisson }
  Coupled { Poisson Electron Hole }

  Set ( "Cathode" mode Current )

  NewCurrentFile= "MagDiode_"
  Quasistationary (
  InitialStep=1e-6 Increment=1.5
  Minstep=1e-8 MaxStep=0.3
  Goal { Name = "Cathode" Current = -@Ic@ }
  ){ Coupled {Poisson Electron Hole}
  CurrentPlot ( Time = (Range = (0.0 0.2) Intervals=10;
  Range = (0.2 1.0) Intervals=20))
  }
};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Chalin Sutthinet, Toempong Phetchakul, Wittaya Luanatikomkul, and Amporn Poyai, "Multi-sensor diode for magnetic field and photo detection", in 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS), 2015, pp. 179-182.
2. Chalin Sutthinet, Toempong Phetchakul, Wittaya Luanatikomkul, and Amporn Poyai, "The Design of Metal-Semiconductor-Metal Structure Magnetic Sensor", 2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand, Procedia Computer Science, Volume 86, 2016, pp. 148-151.
3. Chalin Sutthinet, Sawatdipong Poonsawat, Toempong Phetchakul, and Amporn Poyai, "The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode", in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 517, 2019, p. 012013.
4. Chalin Sutthinet, Amporn Poyai, and Toempong Phetchakul, "A Novel Dual Magnetodiode for Wireless Sensor Networks", Journal of Mobile Multimedia, Volume 16 Issue 1-2, 2020, pp. 23-44.



IEEE-NEMS 2015

10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems

Xi'an, China
April 2015

Important Deadlines:


- September 15, 2014 : Abstract/Full Paper submission1 (2-6 pages)
- October 31, 2013 : Notification of acceptance
- December 31, 2013 : Final Full Paper submission
(for authors who wish to publish their work in IEEE Xplore)

Best Paper Awards:

- Best Student Paper Award
- Best Conference Paper Award
- CM Ho Best Paper Award in Micro/Nano Fluidics
- Best Conference Poster Paper Award

(To compete for these awards, authors must submit a Full Paper (4 to 6 pages) by September 15, 2014)

General Chair : Ning XI, Michigan State University, USA
Program Chair : Guangyong LI, University of Pittsburgh, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Multi-sensor Diode for Magnetic Field and Photo Detection

Chalin Sutthinet¹, Toempong Phetchakul¹, Wittaya Luanatikomkul¹, Amporn Poyai²

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

²Thai Microelectronic Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand
kptoempo@kmitl.ac.th

Abstract-This research presents the multi-sensor that can detect both magnetic field and photo in the one device. The structure is based on p-n junction diode that is the fundamental of light detecting. The idea is how to design p-n junction for magnetic field. The dual magneto diode structure is a solution. It is designed to be suitable for these purposes. The device is specially designed and simulation by Sentaurus TCAD. It is fabricated by standard CMOS process and measured the responses of magnetic field and light. It shows a good device that detects two types of energy equally well. The relative sensitivity of magnetic response is 57 mT^{-1} at forward bias 1 mA and 128 mT^{-1} at reverse 8 nA. The dark current of device is 7.34 nA at standard test condition (25°C, AM 1.5, 100 W/m²). It is current mode device generating photo current and cathode current difference that is linearly induced from magnetic field.

INTRODUCTION

There are many physical effects that relate to magnetic and electric [1, 2]. The Hall Effect is one of the phenomena that relates to current, magnetic field and induced force. It is applied for magnetic detector in several ways. The major modes of operation are in current and voltage [3]. The Hall plate is the popular one for voltage mode device. The current mode, for examples, is magneto resistor and magneto transistor. The early proposed magneto diode [1-3] is the device that uses surface recombination instead of Hall Effect. Dual magneto diode [4, 5] is the magnetic sensor that uses the Hall Effect current mode basically. The structure is the common anode of two diodes that separated two cathodes. The deflected current by Lorentz's force causes the current difference of the two cathodes and linearly dependent with the magnetic field density.

Many kinds of radiation sensor are used in present, for example, photo conductor, photo diode, photo transistor. Most of them mainly use the quantum principle that absorbs photon to change energy state of valence electrons to conduction electron in conduction band [6]. Photo diode is one of devices that detect light by quantum effect. The frequency range depends on material, structure and physical principle.

The multi-sensor is the device that can detect the form of energy more than one type in the same device. Some of them, not all, can be merged together depend on some factors. The important factors are material and structure. Because of the appearance of dual magneto diode, it is possible to merge them together. The multi-sensor used in

this work is silicon p-n junction dual diode that generates response in current mode as photo current I_p for light and cathode current difference ΔI_D magnetic field. The device can detect light and magnetic in the same time if the reverse bias is applied even though the magnetic field measurement can operated both in forward and reverse bias current.

DEVICE STRUCTURE AND FABRICATION

The device structure is shown in Fig. 1. It shows top view and the dimension that compose of a p⁺ anode (A) and dual symmetrical separated cathodes (K₁ and K₂). The device shown in Fig. 1 has two devices on the left and right side that use the same common anode. It was fabricated in standard CMOS process at Thai microelectronics center. It starts from n type substrate with the concentration 10^{15} cm^{-3} . The anode p⁺ is fabrication by boron ion implantation with the concentration 10^{19} cm^{-3} . Then the cathodes n⁺ are fabricated by phosphorus ion implantation with the concentration 10^{19} cm^{-3} . The large area of anode $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ is designed for

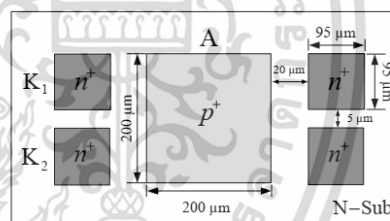


Fig. 1. Device structure.



Fig. 2. Fabricated devices.

light absorption area for photo current. The two cathodes are designed for magnetic field detection by current difference between cathodes from Lorentz's force. The aluminum is sputtered on anode and cathodes by photolithography for ohmic contact. Figure 2 shows the photograph of completed device after fabrication processing. It composes of two sensor devices on the left and right with the common anode.

RESULTS AND DISCUSSION

A. Magnetic Responses

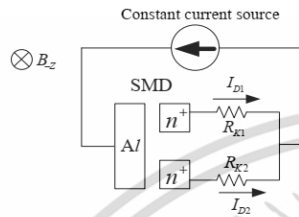


Fig. 3. Measurement circuit.

The circuit for measuring is shown in Fig. 3. The constant current is applied at anode for forward and reverse biasing. The resistors R_{K1} and R_{K2} are for balancing current adjustment $I_{D1}=I_{D2}$. The output responses is carried out in the form of current difference $\Delta I_D=I_{D2}-I_{D1}$. It is studied by simulation using Sentaurus TCAD program. Figure 4 and 5 are the responses of magnetic field at forward and reverse bias, respectively. Figure 4 shows responses at forward current 0.1, 0.5 and 1.0 mA and the magnetic field in Z and -Z direction. The magnetic field density range is (-0.4) – (0.4) mT. The responses show the outputs ΔI_D dependence linearly on magnetic field density. The relative sensitivities $S_R = \Delta I_D/I_D \cdot \Delta B_Z$ are 48, 52 and 57 mT^{-1} at forward bias, respectively. In reverse bias, the currents are 1, 5, 8 nA and the sensitivities are 97, 118, 128 mT^{-1} , respectively. The output also linearly depends on magnetic field density. The mechanism in forward bias is illustrated in Fig.6. In forward bias, when the magnetic field is applied in +Z direction, the hole from p+ anode is injected into n type substrate cathode. The induced force acts on hole in the Y direction so the current I_{D2} is greater than I_{D1} , $\Delta I_D \geq 0$. Figure 7 shows current density distribution from 3D simulation model. The current density at K_2 is greater than K_1 in this condition. In contrast, when the magnetic field is applied in -Z direction, the current density of I_{D1} is greater than I_{D2} and $\Delta I_D \leq 0$. Figure 8 shows the magnetic responses of device when reverse current is applied. The minority carrier hole from n substrate is injected across junction into anode. The induced force acts upon the carrier in -Y direction when magnetic field is applied in +Z direction. The current density I_{D1} is greater than I_{D2} , $\Delta I_D \leq 0$. Figure 9 shows the current density distribution of 3D model. In contrast, when the magnetic field is applied in -Z direction, the response shows ΔI_D positive value. This device can operate in forward and

reverse bias. The output response ΔI_D is defined as [5]

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot \Delta Y \quad (1)$$

where ΔY is the distance of deviation current in Y direction due to Lorentz's force and d is the depth of current in bulk. In reverse mode, J_{px} is represented by $-J_{px}$ which is the minority carrier hole in n-substrate injected from cathode to anode. The relative sensitivity is defined as

$$S_R = \Delta I_D/I_D \cdot \Delta B_Z \quad (2)$$

The relative sensitivity which is the output response per bias current is limited by the amount of minority carrier so the ratio of output response per input bias current is better than in the case of large current in forward mode. The loss current that need to study future should be depend on some design factors such as the emitter effective width, the gap between cathodes and deflection length of the device. The model of simulation does not include the generation current so the reverse saturation current here is less than the real device for several orders.

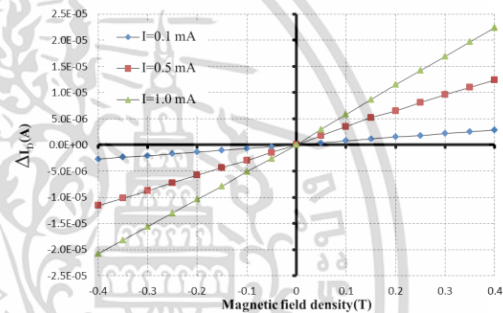


Fig. 4. Magnetic responses at varied forward bias current.

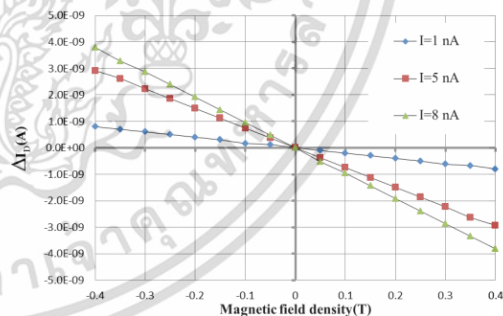


Fig. 5. Magnetic responses at varied reverse bias current.

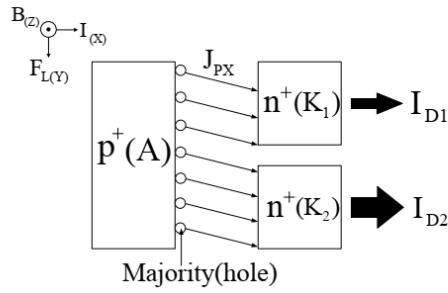


Fig. 6. Mechanism of current deflection of device in forward bias.

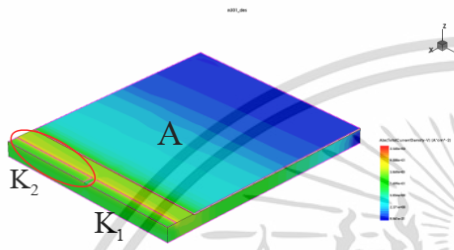


Fig. 7. 3D simulation of current density distribution of forward bias.

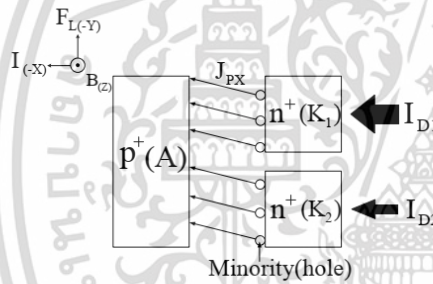


Fig. 8. Mechanism of current deflection of device in reverse bias.

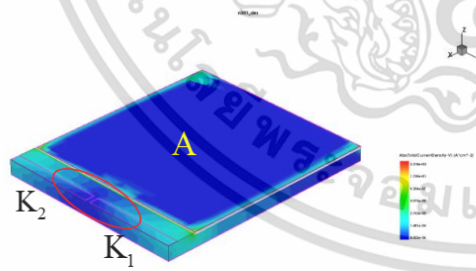


Fig. 9. 3D simulation of current density distribution of reverse bias.

B. Photo responses

The photo response of the device is studied by measuring of current-voltage characteristic of p-n junction. The solar simulator system that measures the p-n characteristic of solar cell is used for this study. Figure 5 shows the current-voltage characteristics device. The standard test condition (25°C, AM 1.5, 100 W/m²) is applied for the distance between light source and sample 5 centimeter long. The lower intensity is varied by varying the distance for 5, 10 and 15 cm. The result shows dark current at 7.34x10⁻³ A. The photo currents from high to low intensity are 1.31x10⁻² A, 1.19x10⁻² A and 1.01x10⁻² A, respectively. The photo current of device is the current generating from photon absorption in semiconductor material and p-n structure under reverse bias. The absorption is non-uniform along the vertical distance from the surface. The large area of anode is designed for large absorption area for photo current. Figure 11 shows the photon absorption

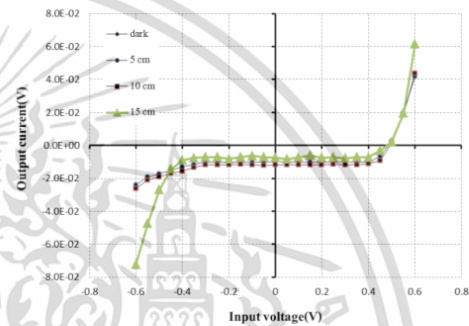


Fig. 10. Current-voltage characteristics of device at varied light intensities.

along the distance from surface at x=0. Φ_0 is incident on p+ anode region. The W_p , W and W_n are the width of p+, reverse space charge and n cathode region. The photon flux as a function of distance is

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x} \tag{3}$$

where α is the photon absorption coefficient. The photo current density J_L can be found as

$$J_L = e \int_0^{W_p+W+W_n} G_L dx = e \int_0^{W_p+W+W_n} \Phi_0 \alpha e^{-\alpha x} dx = e \Phi_0 (1 - e^{-\alpha(W_p+W+W_n)}) \tag{4}$$

where G_L is the generation rate of electron-hole pairs. The dark current density J_{DK} which is the p-n junction reverse saturation current density J_s is defined as

$$J_{DK} = \left(\frac{e D_p p n_0}{L_p} + \frac{e D_n n n_0}{W_p} \right) \tag{5}$$

where e is electron charge, D_p and D_n are minority diffusion

coefficient of hole and electron, L_{p0} and L_{n0} are diffusion length of minority hole and electron, p_{n0} and n_{p0} are minority hole and minority electron respectively.

The photo diode can operate with zero and reverse bias. The magneto diode can operate both in forward and reverse. The sensitivity and efficiency of reverse mode is better than forward mode. The large area of anode for photo absorption will increase the saturation current of p-n junction for magnetic detecting in reverse mode and dark current for photo detecting.

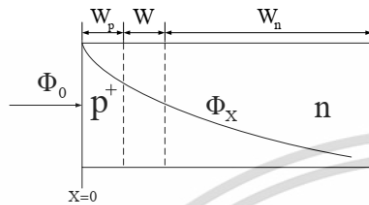


Fig. 11. Non uniform photon absorption along the device.

CONCLUSION

The multi-sensor for magnetic and light is proposed. The structure is dual diode that has structure of two diodes which is one common anode and two separated cathodes. The magnetic response is the current difference of two cathodes deflected by induced Lorentz' Force from the applied magnetic field. The mode of operation can use in forward and reverse bias. The relative sensitivity in reverse bias is better than forward bias. In this study by simulation, the generation current is not include but in the real device, the reverse saturation current is increased as large as the anode area and should be good for magnetic detecting in practical reverse mode application. The photo response is the photo current from photon absorption of p-n junction diode at zero and reverse bias. The design for merged detecting is enlarge

the anode area for photon absorption. The dark current depends on the quality of fabrication process. The device should operate in reverse mode for two types of energy in the same time even though the magnetic detecting can operate in forward mode. The way for future development can develop the efficiency in magnetic response as well as photo response. This research is the preliminary work for design multi-sensor for magnetic and photo device.

ACKNOWLEDGMENT

The authors appreciate the "Office of Higher Education Commission" of Thai government which supported finance all of this research. We would like to thank Dr. Jaran Sritharathikhun from Solar Energy Technology Laboratory (STL), National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA) for solar simulator system.

REFERENCES

- [1] J. Korvink, "MEMS: A practical guide to design, analysis and application," Springer, 2006.
- [2] S. Sze, "Semiconductor sensors," John Wiley & Sons, 1994.
- [3] E. Ramsden, "Hall-Effect sensors theory and application," Elsevier, 2006.
- [4] T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, C. Leepattarapongpan, E. Chaowicharat, P. pengpad and A. Poyai, "The study of p-n and schottky junction of magnetodiode," Adv. Mater. Res., vol. 378-379, pp. 663-667, October 2011.
- [5] T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai, "The mechanism of dual schottky magnetodiode" Proc. 9th ECTI-CON, 2012.
- [6] K. Brennan, "The physics of semiconductors with applications to optoelectronic devices," Cambridge university press, 1999.
- [7] TCAD Sentaurus manual, synopsis®, version D-2010.03.

iEECON2016

The 2016 International Electrical Engineering Congress
2 - 4 March 2016, Chiangmai, Thailand

Honorary Advisory Chair

Colonel Dr. Sethapong Malisuwan, Chair of Telecom, Commissioners.
(The National Broadcasting and Telecommunications Commission)

International Advisory Committees

Wanlop Surakamponorn (TAIST, Thailand)
Vichate Ungvichian (Florida Atlantic University, USA)
Sarah Thompson (University of York, UK)
Mark Re (Seagate Technology, USA)
Hiroshi Matsuno (University of Yamaguchi, Japan)
Tim Mews (University of Alabama, USA)
Athikom Roeksutr (Mahanakorn University, Thailand)

Technical Advisory Committees

Somchai Hirunvarodom (Rajamangala University of Tech. Thanyaburi)
Wekin Piyarat (Srinakharinwirote University)
Kosin Jannongthai (King Mongkut's University of Tech., Thonburi)
Prayoot Akkarackhain (King Mongkut's Uni. of Tech., North Bangkok)
Decha Wilairat (Mahidol University)
Boonchouy Supmonchai (Chulalongkorn University)
Pinit Tepsathorn (Srinakharinwirote University)
Nathaphop Nimpitawan (Bangkok University)
Suttichai Premrudeepreechacharn (Chiang Mai University)

General Chair

Apirat Siritratiwat (Khon Kaen University, Thailand)

General Co-Chairs

Pornchai Supnithi (King Mongkut's Institute of Tech. Ladkrabang)

Technical Program Chair

Anan Kruesubthaworn (Khon Kaen University, Nongkhai Campus)
Sommart Sang-ngoen (Mahanakorn University)

Technical Conference Committees

Jukkrit Tugapanij (Mahanakorn University)
Paul Nutter (University of Manchester)
Worawat Sa-ngiamwibool (Mahasarakham University)
Kittipong Tonmir (Khon Kaen University)
Krischome Bhumkittipich (Rajamangala Uni. of Tech. Thanyaburi)
Boonyong Plangklang (Rajamangala Uni. of Tech. Thanyaburi)
Arkorn Kaewraivang (Khon Kaen University)
Theerayuth Chatchanayeeuyong (Mahasarakham University)
Mustafa M. Aziz (University of Exeter)
Lin Min Min Mint (Shinawatra University)
Pichpong Soontompit (Mahidol University)
Kittipich Meesawas (Khon Kaen University)
Chanon Waisan (King Mongkut's Institute of Tech. Ladkrabang)
Wannaree Wongjaiat (Rajamangala Uni. of Tech. Isaan)
Surachai Ongkittikul (Mahanakorn University of Technology)
Pattarawit Polpinit (Khon Kaen University)

Publicity and Website Chair

Niwat Angkawatpan (Mahasarakham University)
Nattawoot Suwanphat (Mahasarakham University)
Noppamong Kaewhanam (Mahasarakham University)

Registration Chair

Cattareeya Suwanasi (King Mongkut's Uni. Of Tech. North Bangkok)

Financial Chair

Wanchai Chankapool (Sripatum University)

Local Arrangement Chair

Dhanavit Chulikavit (Chiangmai University)

General Secretariat

Chonlatee Photong (Mahasarakham University)
e-mail: chonlatee.p@msu.ac.th



The International Electrical Engineering Congress (iEECON) is a premier international academic conference organized by EEAAT, the Electrical Engineering Academic Association (Thailand). The iEECON2016 will provide a forum for researchers, engineers, and industry experts to discuss recent development, new ideas, and breakthroughs in Electrical Engineering technologies. Topics interests for the iEECON2016 are Communications, Electronics & Control, Digital Signal Processing, Power & Energy, Computer & IT, and Materials for Electrical Applications.

All accepted and presented papers will be published in the abstract book of iEECON2016 and/or will be published in a periodic journal that indexed by SCOPUS, after each paper is reviewed and (if any) satisfactorily modified according to the reviewer comments.

The iEECON2016 will be held in Chiangmai, Thailand's "Rose of the North" is a cultural and natural wonderland with ethnic diversity, a multitude of attractions and welcoming hospitality.

Conference Topics

COMMUNICATIONS

Communication Theory, Antennas and Propagation
Optical Communications, Microwaves, Wireless
Communications, Signal Processing for
Communication, Channel Coding, Multimedia
Communication, Remote Sensing and Applications,
Metamaterials, etc.

ELECTRONICS & CONTROL

Analog Circuits, Filters and Data Conversion,
Analog and Mixed Signal Processing, Embedded
Computer System, Robotics, VLSI Design,
Biomedical Electronics, Industrial Electronics and
automation, Adaptive Control, Electric Circuit
Technology, Fault Tolerance and Detection,
Semiconductor Materials, Magnetic Materials, etc.

DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Image and Video Processing, Audio and Speech
Processing, Pattern Recognition, Biomedical
Signal Processing, Computer Vision and Pattern
Recognition, Adaptive Signal Processing, Machine
Learning for Signal Processing, etc.

POWER & ENERGY

Smart Grid Technology, Planning, Management
Operation, and Control; Electric Power Systems;
Generation Transmission and Distribution,
Electrical Machines, Energy Conversions,
Renewable Energy Sources, Power Electronics,
Energy Systems, Power Quality, High Voltage
Engineering, Insulation and Materials, etc.

COMPUTER & IT

Computer Networks, Cloud Communication
and Networking, Data Mining, Artificial
Intelligence, Computational Theory, Information
System, High Performance Computing, Computer
Security, Software Engineering, Distributed and
Parallel Computing, Web Services and Internet
Computing, Multi-agent Systems, Human
Computer Interaction, etc.

IMPORTANT DATES

Paper submission deadline: October 13, 2015

Paper acceptance notification: November 22, 2015

Camera-ready submission deadline: December 22, 2015

Early-bird registration deadline: December 22, 2015

Conference dates: March 2 - 4, 2016



For more information, please refer to the conference website:

www.ieecon.org

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Computer Science 86 (2016) 148 – 151

Procedia

Computer Science

www.elsevier.com/locate/procedia

2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, 2-4 March 2016, Chiang Mai, Thailand

The Design of Metal-Semiconductor-Metal Structure

Magnetic sensor

Chalin Sutthinet^a, Toempong Phetchakul^{a,*}, Wittaya Luanatikomkul^a and
Amporn Poyai^b

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

^b Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chachoengsao, Thailand

Abstract

This paper presents the MSM structure magnetic detector device that normally detects the electromagnetic wave. The device is special design for magnetic field detector and still detects the electromagnetic wave as normal function. The schottky diode with the split contacts structure allows us to reach this target. The device operates with the saturation current and the magnetic response is the current difference between two contacts which is injected from one metal and deflected in semiconductor toward to another metal. From the simulation result by Sentaurus TCAD, the relative sensitivity is 14.19 mT^{-1} at the current $0.3 \mu\text{A}$. This device is the first MSM multi-sensor for magnetic and electromagnetic wave detector.

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of iEECON2016.

Keywords: MSM; Magnetic sensor; Electromagnetic sensor; Hall Effect; Sentaurus TCAD

1. Introduction and Structure

MSM is the structure of electromagnetic detector device that composes of two schottky junction connected back to back together as metal semiconductor metal [1]. This structure is simple and low cost but shows very low

* Corresponding author.

E-mail address: toempong.ph@kmitl.ac.th

capacitance. The structure is normally designed in interdigitated structure for high sensitivity rather than rectangular or square large area. The photo current generate from the junction area under the metal and the gap between metals [2]. The bias can applied between two metals that one junction is forward and another is reverse. The interdigitated structure, energy band diagram through the active layer and photo current characteristic are shown in Figure 1.

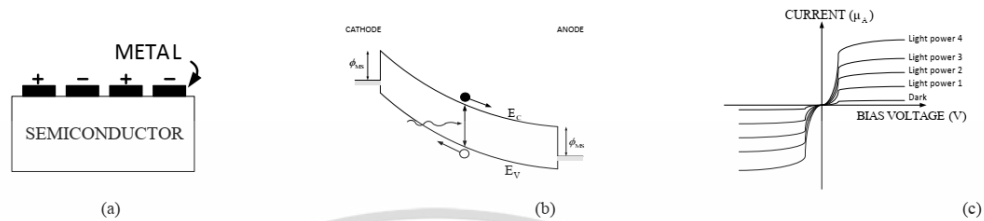


Figure 1. MSM photo detector (a) The interdigitated structure MSM (b) Energy Band diagram (c) Photo current characteristics.

The dual magnetodiode is the device for magnetic detection [3,4]. The structure composed of two diodes that designed the suitable deflection length of carrier between the injected junction to contact. The anodes are commoned and two cathodes are separated. When magnetic field is applied, the induced force from magnetic field vector cross the current vector act upon the injected carriers along the deflection length so the current of two cathodes are difference ΔI . The current difference depend linearly on the magnetic field density and the sign of ΔI is inversion when the direction of magnetic field is opposite. The diode can be fabricated as pn junction as well as schottky junction. The device can operate in forward and reverse bias and can be done both in hole and electron injected currents. Figure 2. shows the structure of dual magnetodiode and the characteristics.

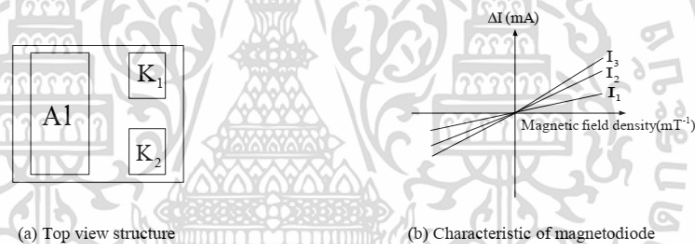


Figure 2. Dual magnetodiode.

The MSM multi-sensor structure can be designed to reach this purpose because of the dual magnetodiode structure. It is the merged structure between the MSM photo detector and magnetodiode. The core of the structure is the junction so the schottky junction between metal-semiconductor is selected here rather than pn junction of magnetodiode. The metal area must use for photo absorption and for magnetic response so the rectangular or square shape of metal is designed. The gap between metals is defined as deflection length in the same time so the critical length is determined by the length of carrier deflection. The current difference of magnetic response is carried out by fabricated the two contact windows W_1 and W_2 within the metal for connecting with the other metal contact layer for two separated current response. This structure is shown in Figure 3(a) and the 2-dimensions model for simulation by Sentaurus TCAD program is shown in Figure 3(b). The area of metals are $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ with the contact window $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ and the gap between metals and contacts are $100 \mu\text{m}$ and $10 \mu\text{m}$, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

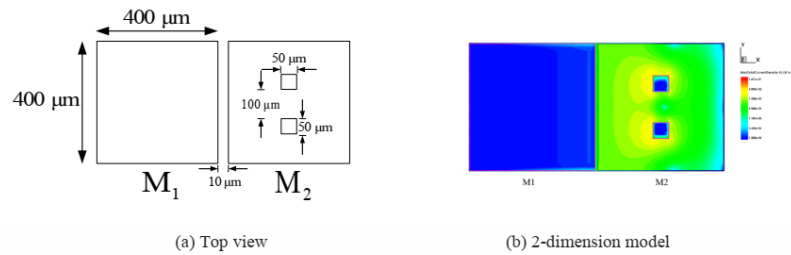


Figure 3. Merged structure of MSM Magnetic sensor.

2. Results and Discussion

Figure 4. is the magnetic response from the simulation at room temperature 300 K. The constant current is applied from one metal to the another metal that has 2 split contact windows. The output is the current difference between contact windows $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$. When magnetic field is applied in $-Z$ direction, the output responses are in positive with the relative sensitivities $7.9, 11.93$ and 13.74 mT^{-1} at current $0.1, 0.2$ and $0.3 \mu\text{A}$, respectively. In the opposite magnetic field direction, the relative sensitivities are $8.2, 11.62$ and 14.19 mT^{-1} at current $0.1, 0.2$ and $0.3 \mu\text{A}$, respectively. The current density distribution from the simulation is shown in Fig.5. While the magnetic field in $-Z$ is applied, the induced force in $-Y$ direction is induced and the current at the contact window 1 is greater than contact window 2, $\Delta I_D > 0$. In the opposite direction $+Z$, the induced force is in $+Y$ direction and the current at contact window 1 is less than contact window 2, $\Delta I_D < 0$. Figure 6 shows the mechanism of the device according to the discussion. Although the device has two split contact windows one metal instead of two metal contacts but the mechanism still the same. The current deflects in the metal by induced force to contact windows causes the current difference ΔI_D . The output response ΔI_D is still defined as

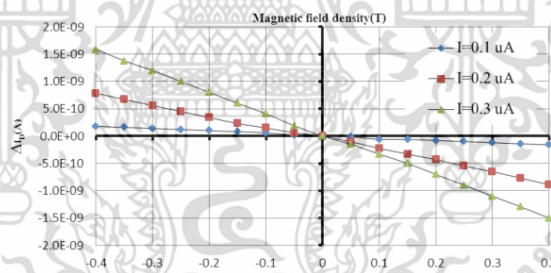


Figure 4. The magnetic field response of MSM magnetic sensor.



Figure 5. The current density distribution of MSM magnetic sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

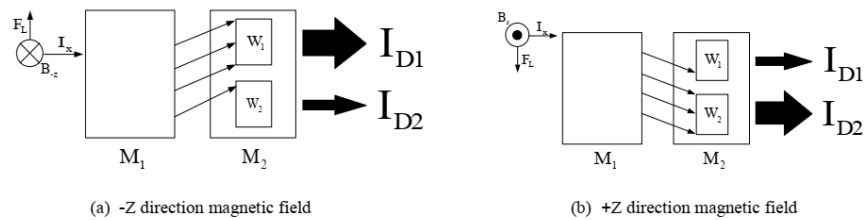


Figure 6. The mechanism of MSM magnetic sensor.

$$\Delta I_D = J_x \cdot d \cdot \Delta Y \quad (1)$$

where J_x is electron current density in X direction, ΔY is the distance of deviation current in Y direction due to Lorentz's force and d is the depth of current. The relative sensitivity S_R is defined as

$$S_R = \Delta I_D / I_D \cdot \Delta B_Z \quad (2)$$

3. Conclusion

The MSM magnetodiode is proposed here first time. The device detects magnetic field and electromagnetic wave in the same device. The structure is based on MSM structure for photo detection and dual magnetodiode for magnetic field detection. The merged structure has two square metals that one metal are designed for two contact windows within the metal for connecting with the other metal layer for separate current. The magnetic response is the difference of metal current from two separate contact windows that treats the principal of dual magnetodiode for detecting the magnetic field. It is a multi-sensor that uses the MSM structure for detecting electromagnetic wave and magnetic field.

Acknowledgement

The authors would like to thank Office of Higher Education Commission of Thai Government for financial support.

References

- [1] T. Sugeta, T. Urisu, S. Sakata and Y. Mizushima, Metal-semiconductor-metal photodetector for high-speed optoelectronic circuits, Japanese J.Appl.19-1(1980), 459.
- [2] J. B. D. Soole and H. Schumacher, InGaAs metal-semiconductor-metal photodetector for long wavelength optical communications, IEEE J.Quan. Elect., 27(1991), 737.
- [3] T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong and A. Poyai, The Study of Forward and Reverse Schottky Junction for Dual Magnetodiode, 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2012, Kyoto, Japan, 599-602.
- [4] T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong and A. Poyai, The Effect of Anode Width of Dual Schottky Magnetodiode to Sensitivity, Applied Mechanic And Material, 781(2015), 164-167.
- [5] TCAD Sentaurus Manual, synopsis®, version D-2013.03.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IEEE 2018 the 2nd International Conference on Robotics and Mechantronics
(ICRoM 2018)**

Ei Compendex and Scopus



From **Friday 9** November 2018 to **Sunday 11** November 2018 8:00 AM - 6:00 PM

Publication:

All submissions will be blind reviewed by the Program Committee on the basis of technical quality, relevance to **conference topics of interest**, originality, significance, and clarity. All accepted and presented papers will be published in IOP **Conference Series: Materials Science and Engineering** for **EI Compendex, Scopus**, et al.

Keynote & Plenary Speakers:

Prof Meng Joo Er, Nanyang Technological University, **Singapore**;

Prof. Christos Spitas, Delft University of Technology, Netherlands;

General Chair:

Prof. Meng Joo Er, Nanyang Technological University, Singapore;

Program Chair:

Prof. Christos Spitas, Delft University of Technology, Netherlands;

Venue: Nanyang Technological University, Singapore

Add: 50 Nanyang Avenue, Singapore 639798

Contacts: Ms. Penny Gan, Email: icromconf@zhconf.ac.cn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PAPER • OPEN ACCESS

The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode

To cite this article: Chalin Sutthinet *et al* 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **517** 012013

View the [article online](#) for updates and enhancements.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Gapless Design for High Sensitivity of Current Mode Dual Magnetodiode

Chalin Sutthinet¹, Sawatdipong Poonsawat¹, Toempong Phetchakul¹ and Amporn Poyai²

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

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

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.

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.



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

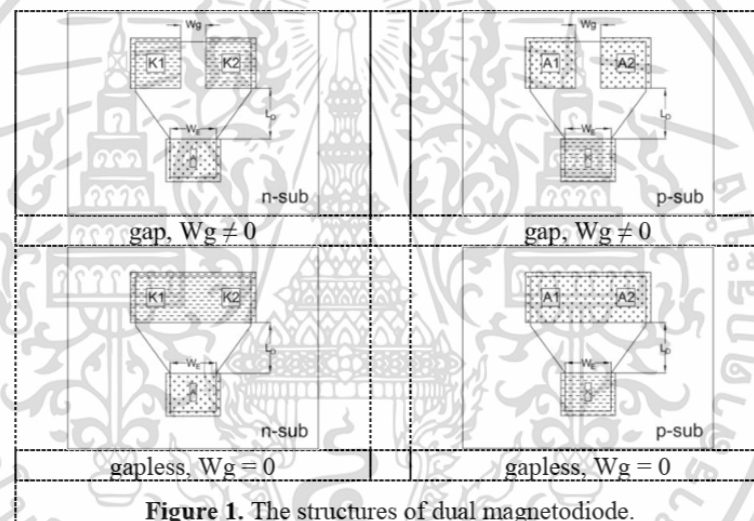
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2. 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).



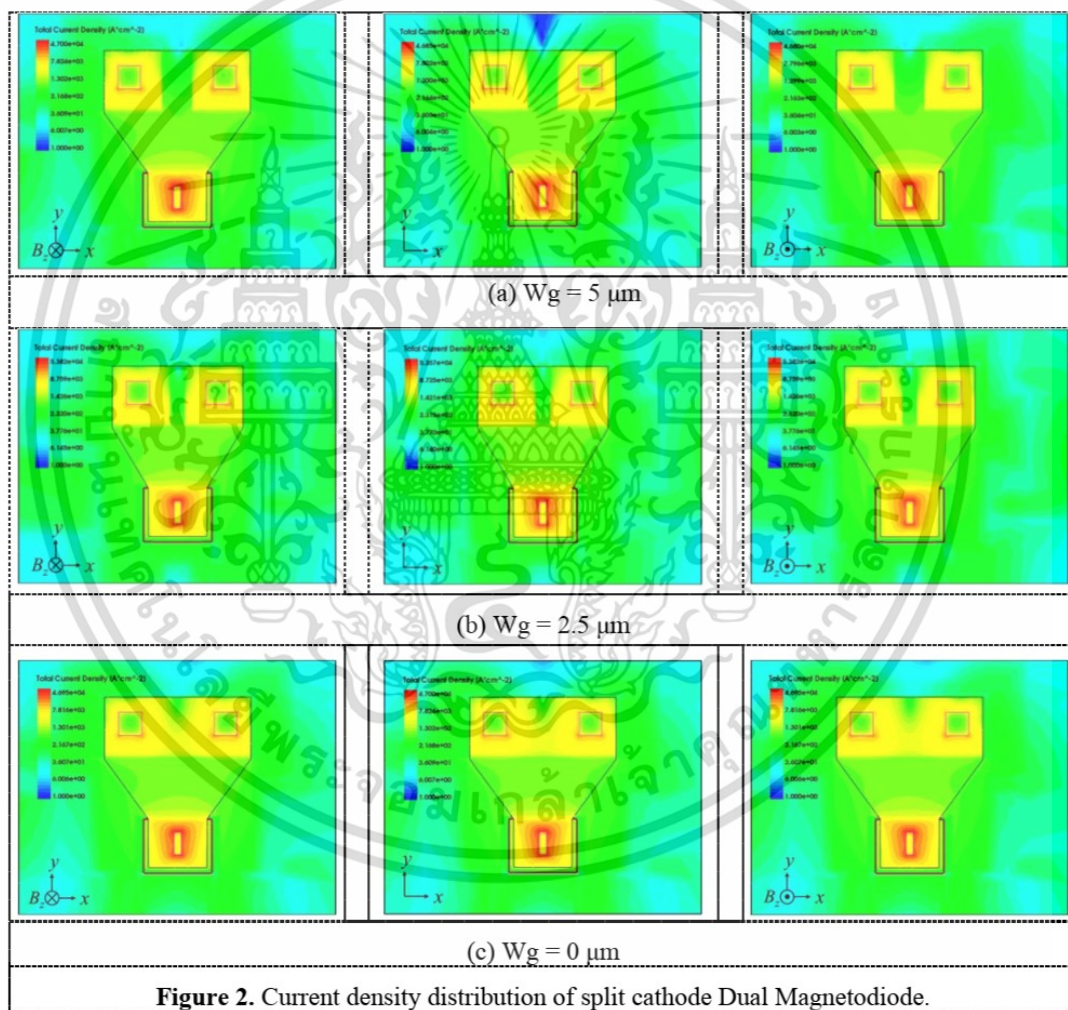
The reason why it has to split cathode or anode is for magnetic field detection in current mode. The split cathodes one is start from n-type substrate, 10^{15} cm^{-3} , and diffuse acceptor atoms for p⁺ anode, 10^{20} cm^{-3} , on substrate and split anode one is start from p-type substrate, 10^{15} 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 L_D and the width of injection carrier cross section area of diode is W_E which all of them are shown in Fig. 1. In this study, the W_E is fixed constant at $8 \mu\text{m}$, L_D is fixed at $10 \mu\text{m}$ but the gap W_g are varied in three values of 5, 2.5 and $0 \mu\text{m}$. 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

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

where α is n or p type of semiconductor material, \vec{J}_α is carrier current density, \vec{g}_α is current vector without mobility, μ_α is drift mobility, μ_α^* 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].

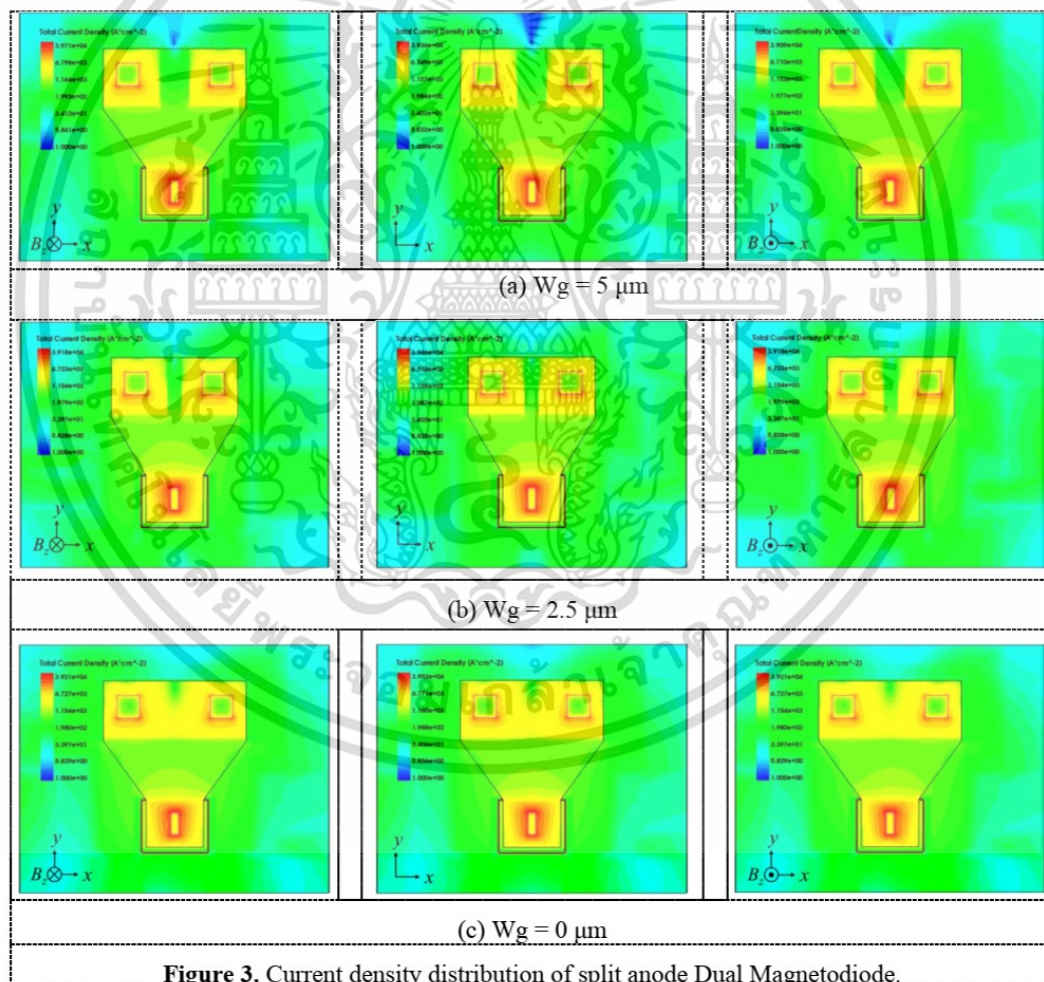


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. 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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 μm are 0.00084, 0.0020 and 0.0051 T^{-1} , respectively.

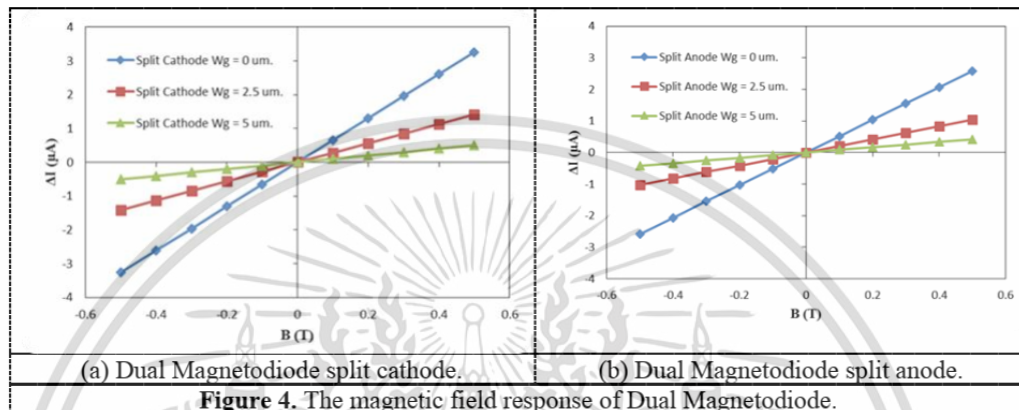


Figure 4. The magnetic field response of Dual Magnetodiode.

4. 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

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

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_{n0} and n_{p0} 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 $n_{p0} \ll p_{n0}$ 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 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].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

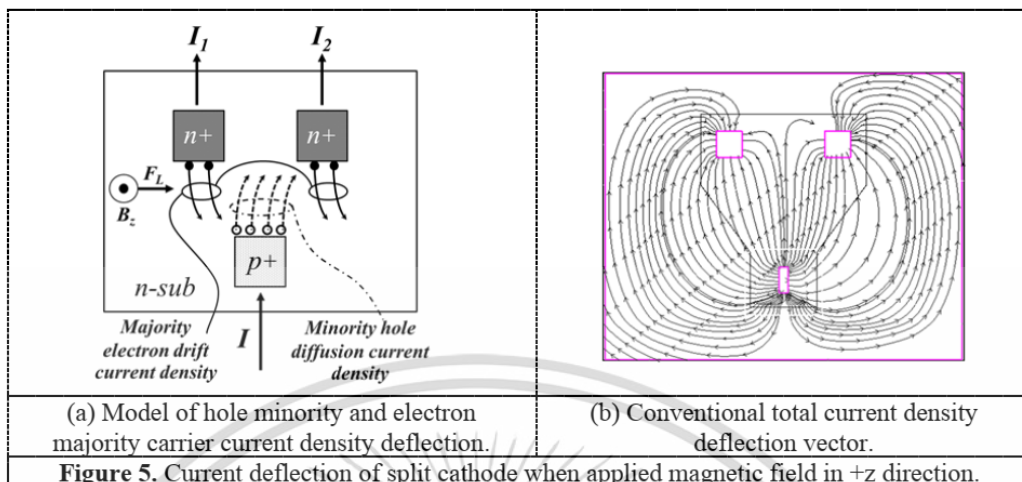


Figure 5. Current deflection of split cathode when applied magnetic field in +z direction.

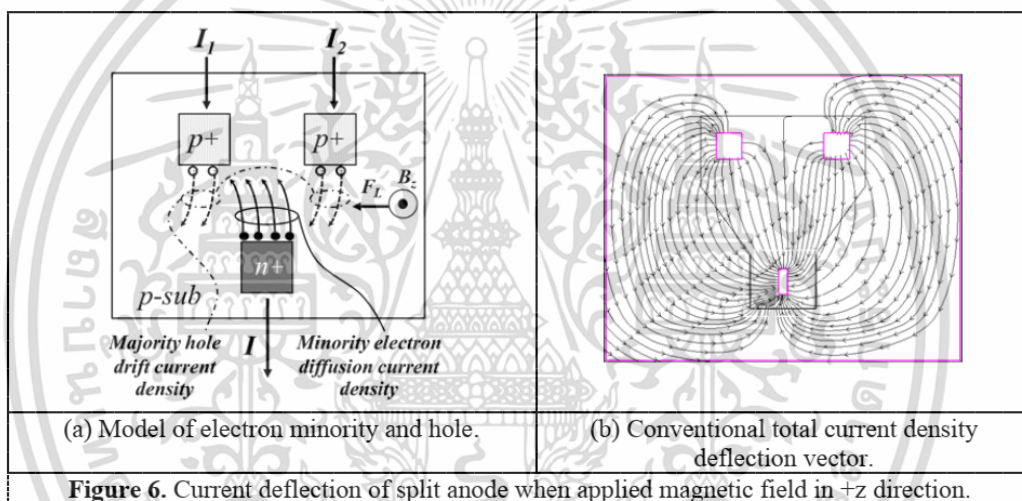


Figure 6. Current deflection of split anode when applied magnetic field in +z direction.

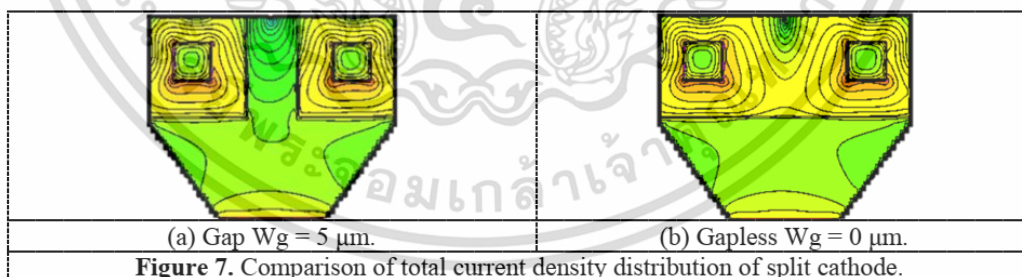


Figure 7. Comparison of total current density distribution of split cathode.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $W_g = 5 \mu m$ and gapless $W_g = 0 \mu m$ 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.

5. 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. It is 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 anode. 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.

6. 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] E. 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. Penponddee, 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-drain MAGFETs simulation," *Int. J. Electron. Commun. Comput. Eng.*, vol. 1, pp. 112-116, 2009.
- [8] T. Phetchakul and S. Junkamkaw, "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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [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. Crescentini, M. Biondi, A. Romani, M. Tartagni, and E. Sangiorgi, "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. Jeamsaksiri, et al., "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor," *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 1269-1272, 2011/01/01/ 2011.
- [16] C. Riccobene, G. Wachutka, J. Burgler, and H. Baltes, "Operating principle of dual collector magnetotransistors studied by two-dimensional simulation," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 41, pp. 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.

7. Acknowledgments

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Editor-in-Chief: Kwang-Cheng Chen

ISSN 1550-4646

Journal of Mobile Multimedia

JMM


River Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Novel Dual Magnetodiode for Wireless Sensor Networks

Chalin Sutthinet¹, Amporn Poyai² and Toempong Phetchakul^{1*}

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

E-Mail: 57601042@kmitl.ac.th, toempong.ph@kmitl.ac.th

²*Thai Microelectronics Center, Design & Engineering Consulting Service Center (DECC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand*

E-Mail: amporn.poyai@nectec.or.th

**Corresponding Author*

Abstract.

This paper presents a new magnetodiode so called dual magnetodiode for wireless sensor application. The device is a current mode which can be integrated on chip compatible to modern low power, low voltage IC. The structure and operation are completely different from conventional magnetodiode. The structure is composed of two pn junctions that one region is common and the others are split terminals for output differential current. The mechanism is carrier deflection by induced force from magnetic field. The carriers are injected from common region by forward bias. The deflection carriers diffuse, deflect and recombine along substrate through split terminals according to direction and density of magnetic field linear and symmetrical. From the comparison of complementary structure of the split cathode and the split anode structure of $L_D = 50 \mu\text{m}$, bias current 1 mA and magnetic field 0.5 T, the relative sensitivities (S_R) are 11.01 and 11.19 T^{-1} , respectively. This device is simple pn junction structure which is compatible for all Micro/Nano technology.

Keywords: pn junction, magnetic sensor, carrier deflection, diode, magnetodiode, Lorentz's force, TCAD

1. INTRODUCTION

Sensors are very importance device for measurement system [1, 2], wireless sensor network [3, 4], interactive multimedia system [5], automation [6], robot [7, 8], learning machine, internet of thing (IoT) [9 - 11], artificial intelligent (AI) and others smart system [12]. In general application, magnetic sensors are used for measuring speed detection, proximity switching, positioning, current sensing, etc. The key feature of the magnetic sensor is sensors that is contactless switching, so there is no wear on the contact, high reliability and long live. When magnetic sensors are used together in many units, it will result in a magnetic sensor network. From the advancement of wireless technology,

multimedia communication and intelligent systems, it has created mobile multimedia sensor networks (MMSNs) or wireless multimedia sensor networks (WMSNs) [13] that have been applied in many applications, such as game, virtual reality, interactive multimedia, smart environment monitoring, intelligent transport system [14], autonomous driving, etc. Magnetic sensor is a kind of sensors that use to detect magnetic energy or quantity and transfer to electrical energy by some phenomena. Among of all phenomena, Hall Effect is one of the most popular effect to create magnetic devices [15, 16]. There are two modes of operation of Hall effect, one is Hall voltage mode and the another is Hall current mode. The Hall voltage mode is used to make Hall plate device that change magnetic field to Hall voltage [17, 18]. This device is very popular in magnetic device group. The current mode is also used to make magnetoresistance device [19]. Unfortunately, this effect gives the percentage of magnetoresistance not so high for non-magnetic material such as semiconductor and metal material. The magnetic material exhibits the so-called anisotropic magnetoresistance effect. In these materials the magnetization vector determines the direction along which the current normally flows. Because it gives very high percent of magnetoresistance than magnetoresistance from non-magnetic materials so much so we call the giant magnetoresistance (GMR) [20].

Although Hall effect current mode for magnetoresistance is not as popular as GMR, there are many device structure that adapt the Hall effect current mode for magnetic detection. Magnetotransistor uses the Hall current mode for emitter current deflects to collector by induced Lorentz's force from magnetic density [21, 22]. This device must use current to supply device more than one and it has at least four terminals [23]. There is a proposed three terminal magnetotransistor but it is not naturally symmetry device which have to adjust offset by external circuit before [24, 25]. It is not popular as Hall plate device in voltage mode. Magneto MOSFET or MAGFET uses the MOS structure for detecting magnetic field [26, 27]. There are still some researches until now. Magnetodiode use Hall effect current mode with two different surface recombination rate of interfaces and double injection of carriers [28]. Since it requires the two different interfaces, it is difficult to control properties which depend on fabrication process so much to be the same in each fabrication. It needs some voltage dropped on pn junction and response to high magnetic field density. It is not symmetry device because the two different surface recombination rate. Even though it is simple two terminals and a voltage supply device, it is not so popular and interesting rapidly from the first time of introduction.

In this paper, the new structure and operation of magnetodiode is proposed. This device uses pn junction diode for detecting magnetic field. The mechanism is carrier deflection in bulk from Hall effect current mode. The structure composes of two diodes that one terminal is common and the others are split. The pn junction is basic structure that compatible to all technology. This will bring the magnetodiode back to the point of interest again, especially the current mode device which does not have a simple structure device to fabricate and operate look like in Hall device in voltage mode. From the current trend of energy saving, low power, low voltage and low current, when the voltage is reduced, the Hall device operating in the voltage mode has a problem with sensitivity decreasing. Using current mode will have a technological advantage in reducing size. Dual magnetodiode can be fabricated easily with PN junction in bulk. From the basic mechanism of operation of the device, it will be used to design and develop a new generation of high efficiency device in the future.

2. DEVICE STRUCTURE AND FABRICATION

The dual magnetodiode are fabricated and measured for this study. The structure and process of device are discussed in this section. It will be seen that dual magnetodiode is so different from conventional magnetodiode even though it is constructed by diode structure. The fabrication process is the fundamental process in laboratory in electronics department.

The structure of device is shown in Figure 1(a). It composes of one anode and two split cathodes. The symbol for dual magnetodiode device is shown in Figure 1(b). The symbol is diode that has one anode and two cathodes. The distance between cathodes is gap (W_g) and the distance from anode to cathode is length (L_D). The substrate is n type silicon which is cathode and two separate ohmic contacts act as two separate cathodes. This structure is called split cathode dual magnetodiode. The key parameters for this study are W_g and L_D which the ratios W/L are 50/50 and 60/60 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. The ohmic contact cathodes are square with the dimension $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. The width of anode (W_E) is equal the distance of the outer edges of two cathodes. The dimensions are so large because they are designed and fabricated in the fundamental laboratory as mention before. However it is enough to proof the idea of device and can be scale down if it is fabricated in other technology.

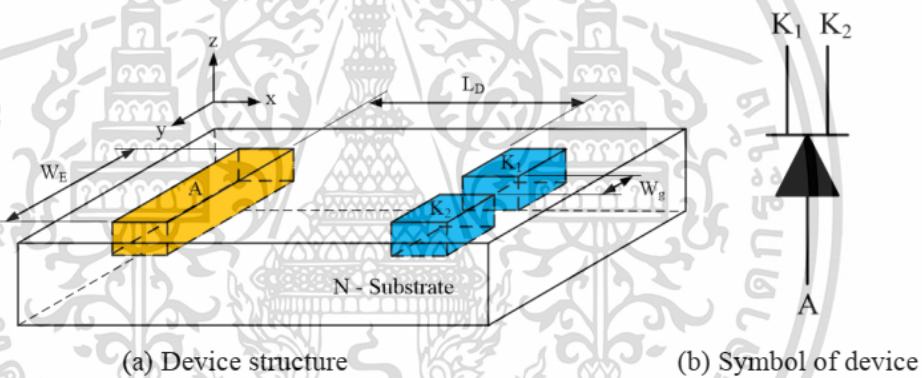
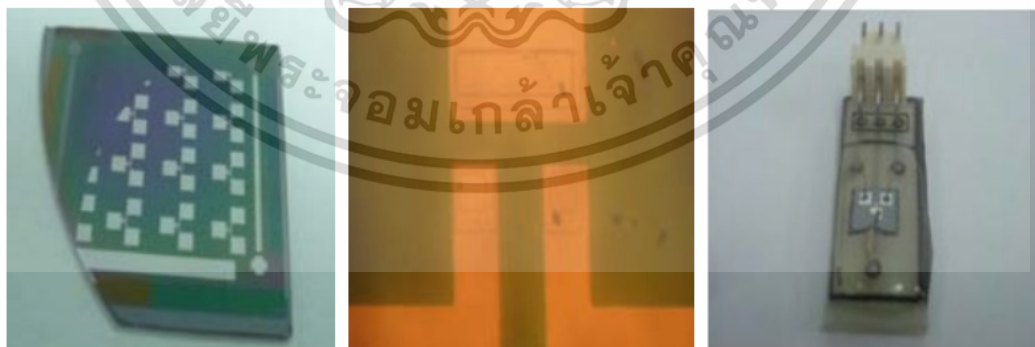


Figure 1 Split cathode Dual Magnetodiode structure.



(a) Devices on wafer (b) Top view layout of device (c) Packaging device

Figure 2 Photograph of Dual Magnetodiode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4

The device fabrication starts from n type silicon substrate with the resistivity 3 - 6 Ω -cm. The anode P⁺ is formed by boron thermal diffusion. The split cathodes N⁺ and ohmic contacts are formed by phosphorus diffusion. The aluminum is evaporated and etching for device terminal. Figure 2 (a) shows a photograph of complete fabricated devices on wafer and Figure 2 (b) shows the top view layout of complete device. The packaging device for measurement is shown in Figure 2(c).

3. MEASUREMENT AND RESULTS

The device was measured for electrical and magnetic responses. The pn junction was investigated for pn junction confirmation. Figure 3 shows the rectify characteristic of pn junction diode. It is tested by anode and each cathode to confirm diode structure. The measurement circuit for magnetic response is shown in Figure 4. It was applied forward bias via constant current source which push current from anode to cathodes. This will keep

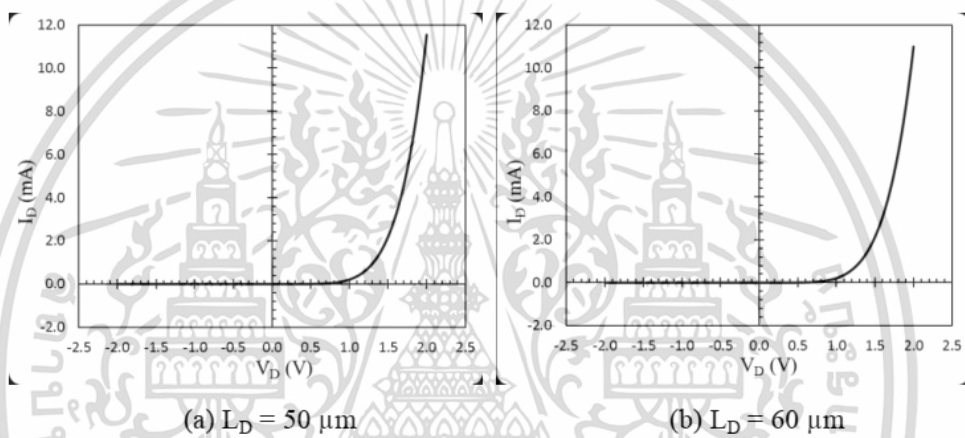


Figure 3 PN junction I-V characteristics.

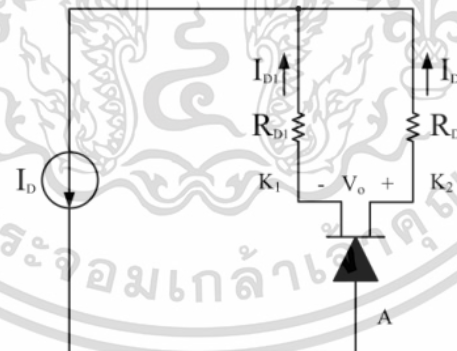


Figure 4 Measurement circuit for magnetic response.

the total current (I_D) constant in order to avoid any modulation from the magnetic field. The total current is sum of diode currents, I_{D1} and I_{D2} as follow

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (1)$$

The output V_o , the voltage between two cathodes, can be express as

$$V_o = I_{D2}(R_{D2}) - I_{D1}(R_{D1}) \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where $R_{D1} = R_{D2} = R_D$ and Equation (1) will become as

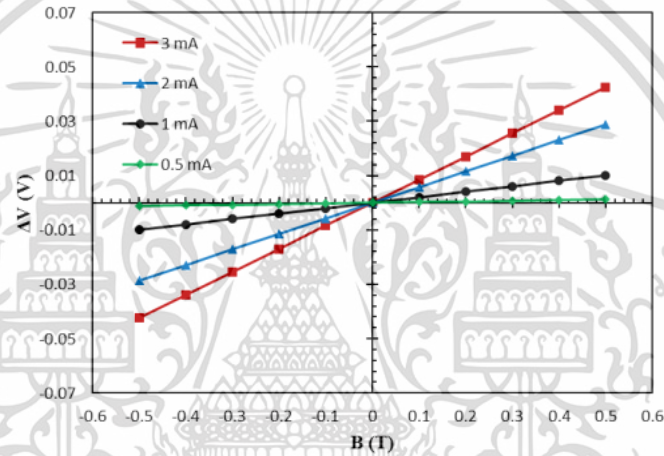
$$V_o = \Delta I_D (R_D) \quad (3)$$

and

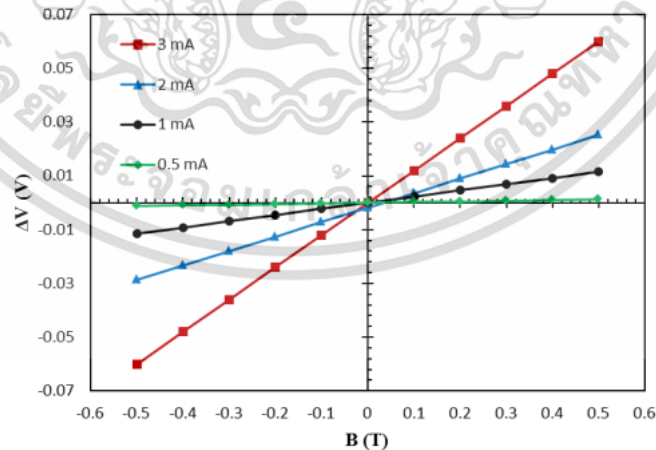
$$\Delta I_D = I_{D2} - I_{D1} \quad (4)$$

The output voltages are amplified by instrument amplifier.

The output responses are measured as shown in Figure 5. They were applied magnetic field density from 0 – 0.5 T perpendicular to device surface in Z and –Z direction as shown in Figure 1. The bias currents by constant current source are varied at 0.5, 1, 2 and 3mA. Figure 5(a) is the parameter of $W = 50 \mu\text{m}$ and $L = 50 \mu\text{m}$. It was plot between V_o and magnetic field density (B). The slope of graph is defined as absolute sensitivity (S_A) as shown below



(a) $L_D = 50 \mu\text{m}$



(b) $L_D = 60 \mu\text{m}$

Figure 5 Magnetic responses of split cathode dual magnetodiode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6

$$S_A = \frac{\Delta I_{DRD}}{\Delta B} \quad (5)$$

From Figure 5 (a), the lineally dependence of V_o and B are observed. The biased currents affect to sensitivity directly. The higher biased current gives the higher sensitivity. The absolute sensitivities S_A are 0.0025, 0.0200, 0.0575 and 0.085 mV/T at the biased current 0.5, 1, 2 and 3 mA, respectively. The device can detect the direction of magnetic field by symmetry responses.

Figure 5(b) is the response of device parameter $W = 60 \mu\text{m}$ and $L = 60 \mu\text{m}$. The overall looks similar to the case in Figure 5(a). The sensitivities are 0.0025, 0.0230, 0.0540 and 0.1200 mV/T at biased current at 0.5, 1, 2 and 3 mA, respectively. Comparison of sensitivity between Figure 5(a) and Figure 5(b) appears that the sensitivity value of Figure 5(b) is greater than Figure 5(a). The device still detect quantity and direction linearly and symmetrical.

4. DISCUSSION

This section will discuss about proposed model for mechanism explanation. Experimental results will be confirmed not only by this model, but also by a simulation. Some aspects will be discussed by this model and made clear by simulation results.

4.1. Proposed Model for Split cathode dual magnetodiode

The dual magnetodiode operates by forward bias pn junction. The diffusion hole minority current density (J_{px}) from hole carriers are injected from p type to n type and diffusion electron minority current density (J_{nx}) from electron carriers from n type to p type combine to total current J_D as diode current. It can be written as

$$J_D = J_{px} + J_{nx} \quad (6)$$

$$J_{px} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \left(e^{\left(\frac{V_a}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (7)$$

$$J_{nx} = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \left(e^{\left(\frac{V_a}{kT}\right)} - 1 \right) \quad (8)$$

where q is electron charge, D_p and D_n are diffusion coefficient of hole and electron, L_p and L_n are diffusion length of hole and electron, k is Boltzman constant, T is ambient temperature and V_a is applied forward bias voltage.

From the practical diode fabrication, J_{px} is much larger than J_{nx} in this structure at least 3 orders according the high p-type doping concentration greater than n-type doping concentration. It is convenient to simplify as

$$J_D \approx J_{px} \quad (9)$$

The cathodes current (J_{D1} and J_{D2}) are equal and balance with the value $J_D / 2$ as written below

$$J_{D1} = J_{D2} = \frac{J_{px}}{2} \quad (10)$$

When magnetic field is applied in z direction, Lorentz's force is induced in y direction and injected hole currents J_D from anode to cathode are deflected in y direction. The carrier

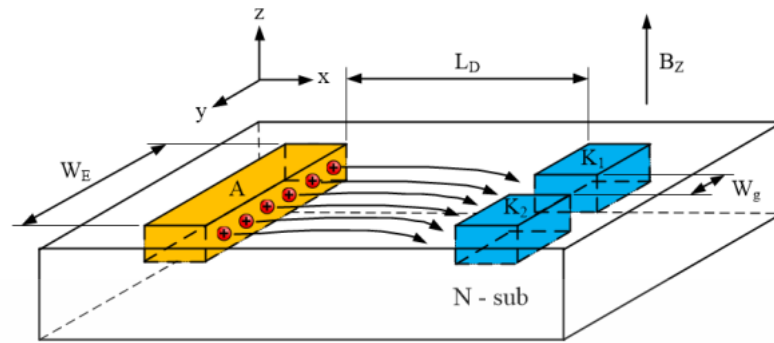


Figure 6 Proposed model for split cathode dual magnetodiode when applied magnetic field in +Z direction.

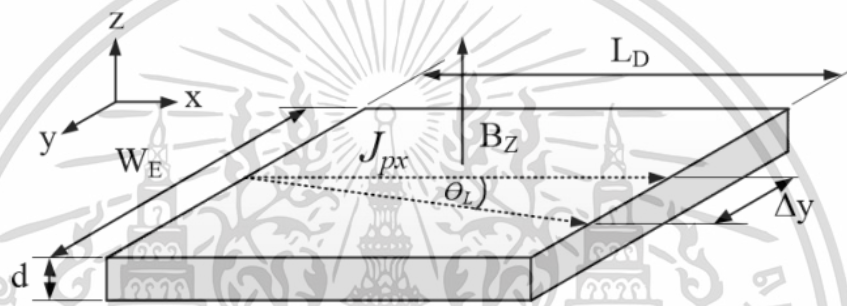


Figure 7 Active area of carrier deflection.

deflection effect by Lorentz's force causes cathode current J_{D2} greater than J_{D1} created output differential current ΔI_D which is $I_{D2} - I_{D1}$. This discussion can be concluded in proposed model as shown in Figure 6.

Figure 7 shows the active area of current deflection where d is defined as depth of current according to current cross section area. The carriers are deflected by Lorentz's force causes the Lorentz's angle θ_L which is

$$\tan \theta_L = \frac{\Delta y}{L_D} = \mu_p \cdot B_z \quad (11)$$

and

$$\Delta y = L_D \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (12)$$

where μ_p is hole mobility. The differential current ΔI_D is the integrating current density J_{px} over the effective area $d \cdot \Delta y$. It can be written as follow

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot \Delta y \quad (13)$$

By using Equation (12), Equation (13), it will become as

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (14)$$

The sensitivity (S) of device is

$$S = \frac{\Delta I_D}{B_z} = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \quad (15)$$

The relative sensitivity (S_R) is defined as sensitivity per biased the current (I) which is

$$S_R = \frac{S}{I} \quad (16)$$

Equation (15) told that sensitivity of device depend on biased current, the length between anode and cathode contact (L_D) and mobility. Biased current is the term $J_{px} \cdot d$ which is controlled by constant current source that is confirmed by experimental results from Figure 5. The length (L_D) is confirmed by the results in Figure 5 (a) and (b).

The cathode contact currents J_{D1} and J_{D2} are the electron majority drift current J_{n1} and J_{n2} will drift by electric field to support hole minority diffusion current J_{px} which recombine along the substrate and electron minority diffusion current J_{nx} which injected from n-type to p-type through pn junction as shown in Equation (6). The two contact currents density while applied magnetic field in the term of Equation (1) while applied magnetic field in z direction can be written as

$$I_{D1} = J_{n1} = q\mu_n n_1 \cdot A = \left(\frac{J_{px}}{2} - \frac{\Delta J_{px}}{2} + \frac{J_{nx}}{2} \right) \cdot A \quad (17)$$

$$I_{D2} = J_{n2} = q\mu_n n_2 \cdot A = \left(\frac{J_{px}}{2} + \frac{\Delta J_{px}}{2} + \frac{J_{nx}}{2} \right) \cdot A \quad (18)$$

where ΔJ_p is deflection hole current, n is electron carrier concentration at terminal and A is cross section area which is $\Delta y \cdot d$. By using in the same way of Equation (11), (12) and (13)

$$\Delta I_D = I_{n2} - I_{n1} = \Delta J_{px} \cdot A = J_{px} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (19)$$

which is similar as shown in Equation (14)

4.2. Simulation of split cathode and split anode dual magnetodiode

The proposed model will be confirmed by simulation [29]. In this section, the structure of split anode will be introduced. The simulation tool is Synopsys Sentaurus TCAD package program [30 - 32]. All semiconductor equation such as continuity, recombination, mobility, impurity ionization and Hall effect are available and used for simultaneous calculation [33 - 35].

Device structures for simulation are shown in Figure 8. It consists of two basic structures: the split cathode in the Figure 8 (a) and the split anode in Figure 8 (b). The structures have a modified design to have symmetry for each other in order to compare the performance. The common terminal is designed to have less space on both sides and placed in the middle to reduce losses and increase efficiency. The split cathode starts from n-type substrate with the concentration 10^{15} cm^{-3} and p-type anode and n doping split ohmic contact areas are doped with the concentration 10^{18} cm^{-3} . In the same way, the split anode starts from p-type substrate with the concentration 10^{15} cm^{-3} . The cathode is n-type with the concentration 10^{18} cm^{-3} , and two anodes are p-type with the concentration 10^{18} cm^{-3} . The parameters are the length between cathode and anode (L_D) which is 5, 10, 20, 30, 40 and 50 μm . The width between split contacts (W_g) is 5 μm and the substrate thickness is 1 μm . There is field oxide covered throughout all area in addition to make the current path between anode and cathode.

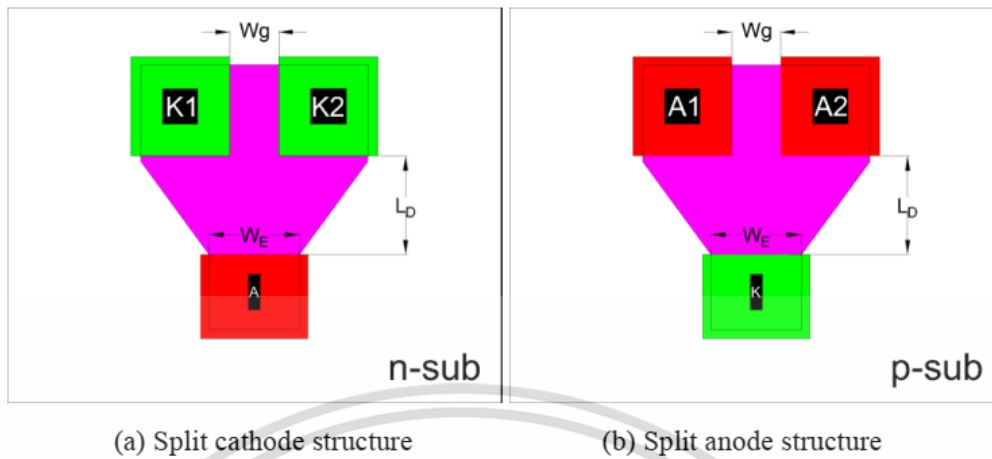


Figure 8 Dual magnetodiode structure for simulation.

The magnetic responses of split cathode in various parameters L_D are shown in Figure 9. The responses are linearly dependence with magnetic field density and length L_D according to Equation (14). The device detects the density and direction of magnetic field. The relative sensitivities at biased current 1 mA, magnetic field density 0.5 T, are 0.987, 1.611, 2.870, 4.097, 8.076 and 11.01 T^{-1} for the deflection length L_D 5, 10, 20, 30, 40 and 50 μm , respectively. Figure 10 shows the responses of split cathode at various biased current of deflection length $L_D = 50 \mu m$. The relative sensitivities are 7.506, 11.09, 24.08 and 45.08 T^{-1} for biased current 0.5, 1, 2 and 3 mA. The more biased current increase the term $J_{ps} \cdot d$ in Equation (14).

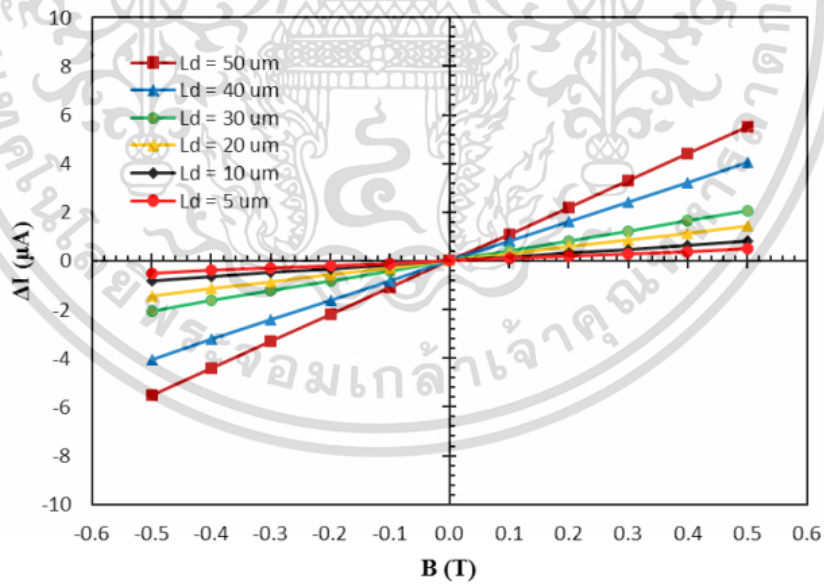


Figure 9 The magnetic responses of split cathode at biased current 1 mA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

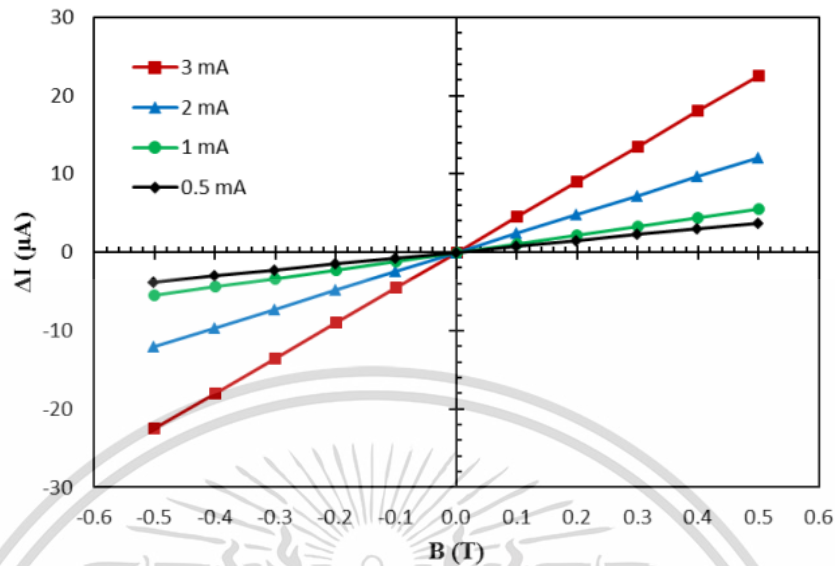


Figure 10 The magnetic responses of split cathode of length $L_D = 50 \mu\text{m}$.

The two dimension top view of current density distribution while applied magnetic field is shown in Figure 11. The current density distribution of conventional current, electron current and hole current are shown in Figure 11 (a), (b) and (c), respectively. The magnetic field is applied at 0.5 T and biased current is 1 mA. The left hand side of Figure 11 is the case of applied magnetic field in $-z$ direction, the right hand side is the case of applied magnetic field in z direction and in the middle is the case of no magnetic field. The conventional current flow from anode to two cathodes equally when no magnetic field is applied that we can see the symmetry color distribution in the middle of Figure 11 (a). The current density is dense at anode contact and reduce from anode to cathodes and denser again at cathode contacts. When magnetic is applied in z direction, the Lorentz' s force is induced in y direction causes the current defects on the right hand as shown in the right hand of Figure 11 (a). In a similar way, the current deflects on the left hand when magnetic field is applied in $-z$ direction. It is easier to observe these changes when observing the current distribution in circles that is made in Figure 11. Figure 11 (b) is the case of hole current density. Holes are injected from p-type anode to n-type cathode and diffuse and recombine along n-type cathode. The hole current density is dense at anode contact and reduce from anode to cathode and denser again at cathode contacts. But the current density at cathode is less than anode because the anode current is combined with electrons during diffusion in n-type semiconductor, resulting in a reduced amount of hole diffusion current that we can see the current density of hole current at anode and cathode in Figure 11 (b). It differs from conventional total current in Figure 11 (a) because total current is created by the sum of electron and hole currents which are constant throughout the device, as we will observe the current density at anode and cathode in Figure 11 (a). The hole current deflection on magnetic field in $-z$ and z direction in Figure 11 (b) is in the same way as

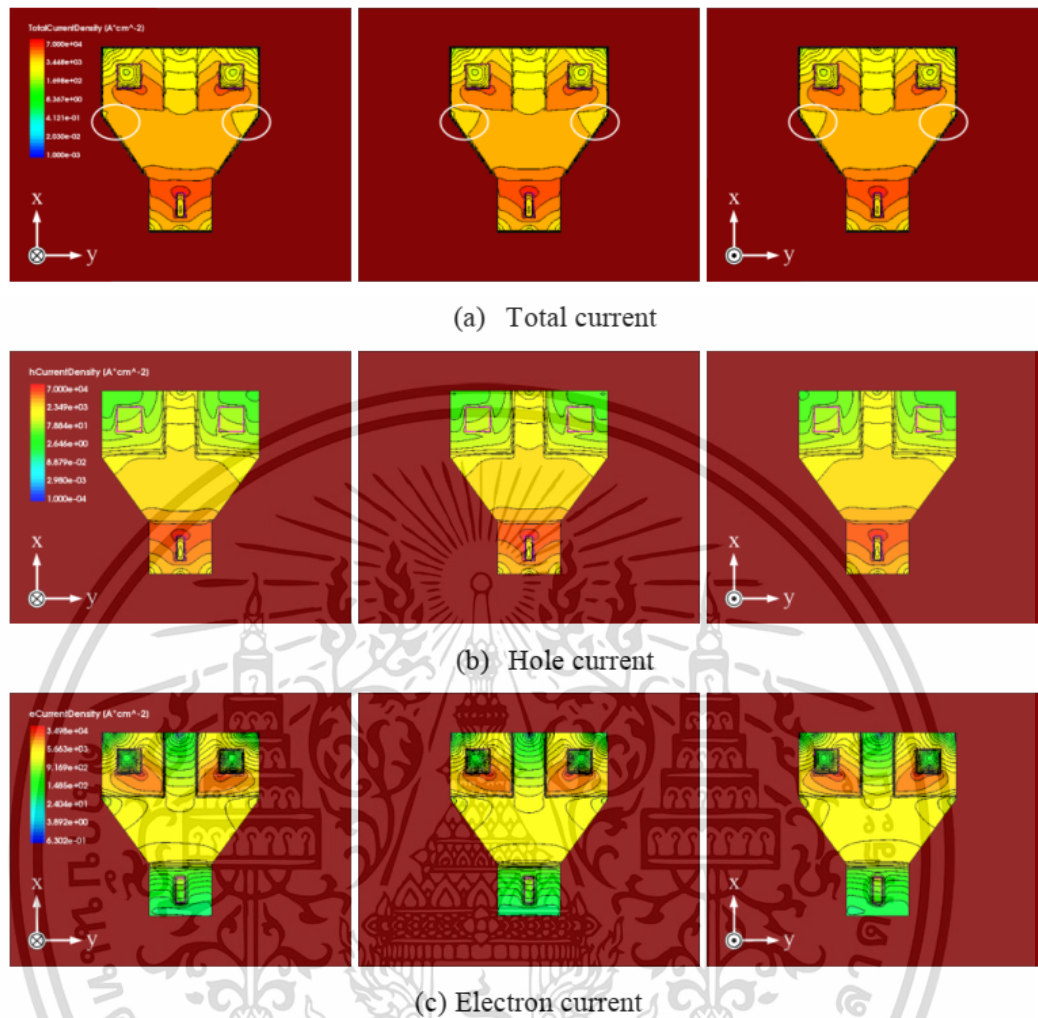


Figure 11 Current density distribution of split cathode dual magnetodiode.

the total current in Figure 11 (a). Figure 11 (c) is the electron current density distribution. This electron current drifts by electric field from cathode to anode to compensate electrons that combine with hole that injected and diffuse from anode to cathode. The electron current density is dense at cathode and reduce from cathodes to anode and dense again at anode contact. We can observe this change from the current density of the anode and cathode in Figure 11 (c) compared to Figure 11 (b). The current density of electron when applied magnetic field in z direction, the current density of cathode 2 (I_{D2}) is greater than cathode 1 (I_{D1}) because Lorentz's force is induced in y direction or electron current drifts to compensate with hole current in cathode 2 greater than hole current in cathode 1.

Figure 12 is magnetic responses of split anode that the parameters deflection lengths L_D are varied at 5, 10, 20, 30, 40 and 50 μm . The relative sensitivities at biased current 1 mA, magnetic field density 0.5 T, are 0.989, 1.702, 2.936, 4.177, 8.106 and 11.19 T^{-1} , respectively. Figure 13 shows the responses of split anode at various biased current of deflection length $L_D = 50 \mu\text{m}$. The relative sensitivities are 7.606, 11.18, 26.09 and 47.09 T^{-1} for biased current 0.5, 1, 2 and 3 mA. The more biased current increases minority

12

electron diffusion current density J_{nx} . In the same way as split cathode, the differential output current ΔI_D in Equation (14) will become

$$\Delta I_D = J_{nx} \cdot d \cdot L \cdot \mu_n \cdot B_z \tag{20}$$

The sensitivity of device becomes

$$S = \frac{\Delta I_D}{B_z} = J_{nx} \cdot d \cdot L_D \cdot \mu_n \tag{21}$$

where μ_n is electron mobility. The sensitivity in Equation (15) is the slope of graphs in Figure 12 and Figure 13 which are the same sign as in the case of split cathode because the differential current now is

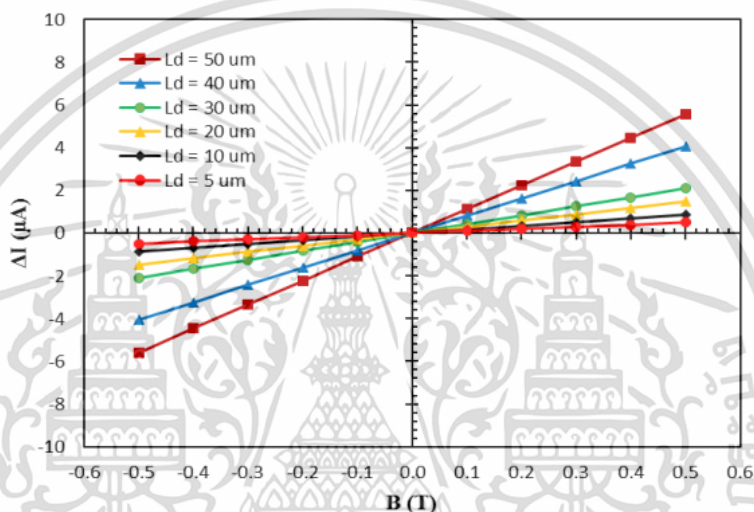


Figure 12 The magnetic responses of split anode at biased current 1 mA.

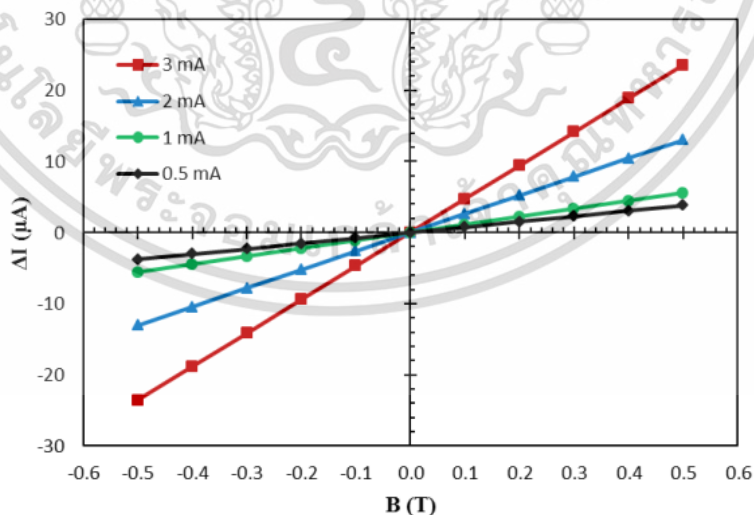


Figure 13 The magnetic responses of split anode at length $L_D=50 \mu\text{m}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

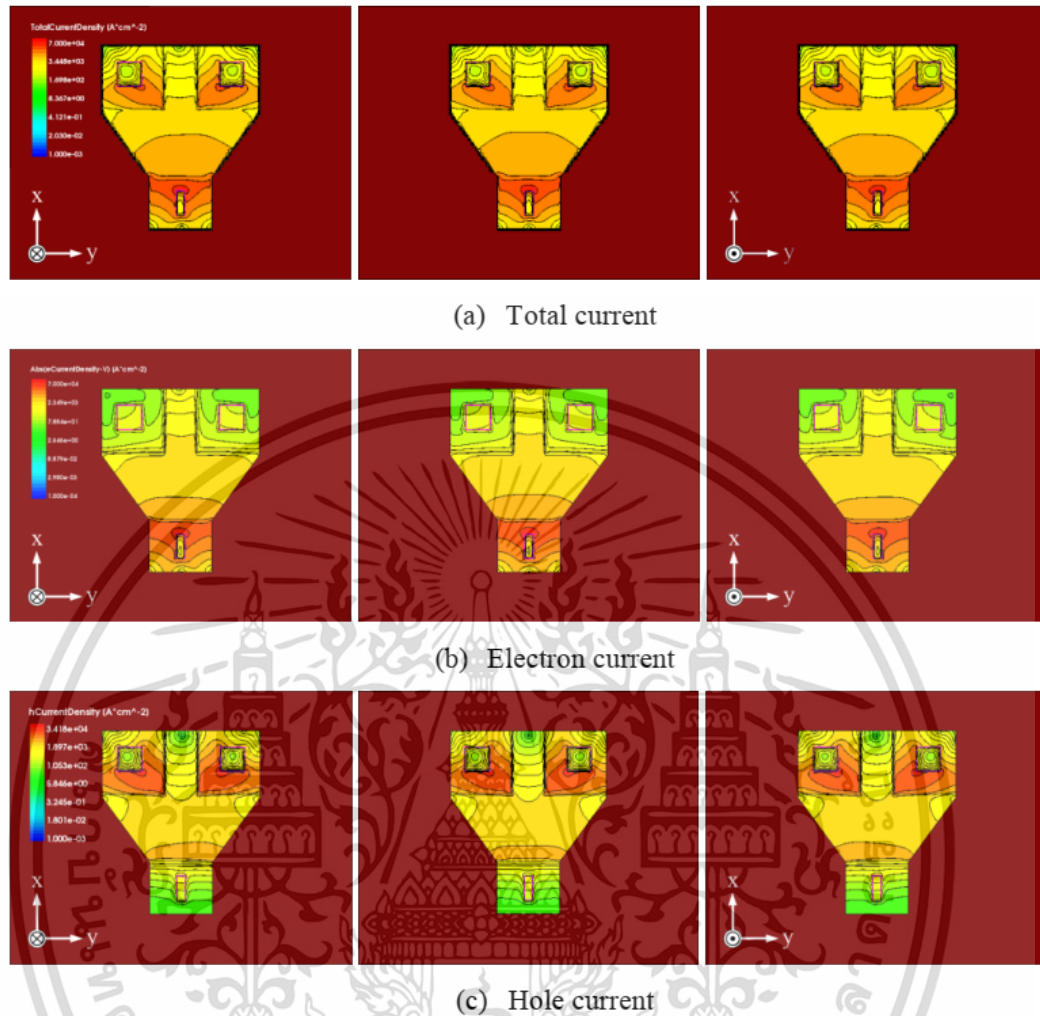


Figure 14 Current density distribution of split anode dual magnetodiode.

$$\Delta I_D = I_{D2} - I_{D1} = (-|I_{D2}|) - (-|I_{D1}|) = |I_{D1}| - |I_{D2}| \quad (22)$$

The current I_{D1} and I_{D2} flow into the anode terminals which are opposed to the split cathode case which currents flow out of cathode terminals. The current density distribution of total current J_D from anode to cathode, hole majority drift current from anode to cathode to compensate electron recombination in substrate and electron minority diffusion current from cathode to anodes are shown in Figure 14 (a), (b) and (c), respectively. The biased current is 1 mA and applied magnetic field is 0.5 T. The current density is symmetry when no magnetic field is applied and deflected on the left hand for the applied magnetic field in z direction which cause magnitude of I_{D1} , ($-I_{D1}$), greater than magnitude of I_{D2} , ($-I_{D2}$). The currents are deflected on the right hand for applied magnetic field in $-z$ direction as shown in Figure 14.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

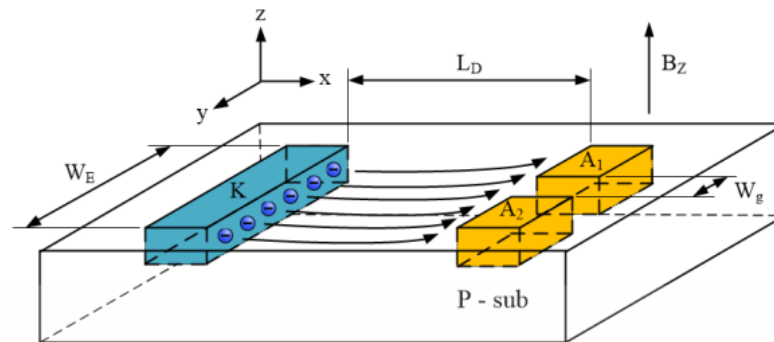


Figure 15 Proposed model for split anode dual magnetodiode when applied magnetic field in +Z direction.

The proposed model for split anode magnetodiode is shown in Figure 15. The magnetic field is applied in +z direction. The device current is minority electron diffusion current injected from cathode to split anodes. This current diffuses and recombines along the current path in p substrate. The split contact anode hole majority drift current flow into to support recombination current. The Lorentz's force is induced in -y direction and the conventional current J_D of device is in -x direction. The current difference ΔI_D in Equation (22) and sensitivity in Equation (21) is positive again as in the case of split cathode that are shown in Figure 9 and Figure 12.

5. CONCLUSION

The new structure and mechanism of magnetodiode is proposed. It is different from the conventional magnetodiode that used the two difference surface recombination. The structure is like two pn junction diode so called dual magnetodiode that one terminal is common and the others are split. There are two structures of device which are split anode and split cathode. The mechanism is deflection of diffusion carries that are injected from common terminal through pn junction by Lorentz's force which is induced linearly from magnetic field density cross with carrier conventional current. The diffusion current deflection causes the differential output current ΔI_D according to direction and density of magnetic field linearly and symmetry. The device is pn junction structure that is compatible with all technologies including low power low voltage integrated circuit. It is a device with high potential for current mode magnetic sensor similarly to Hall plate in voltage mode magnetic device.

ACKNOWLEDGEMENTS

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

REFERENCES

- [1] O. Kanoun and H. Trankler, 'Sensor technology advances and future trends', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, pp. 1497-1501, 2004.
- [2] S. Shenghe, 'Development trend of modern sensor', *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, vol. 1, pp. 1-10, 2009.
- [3] L. Zheng, 'Industrial wireless sensor networks and standardizations: The trend of wireless sensor networks for process automation', *Proceedings of SICE Annual Conference 2010*, pp. 1187-1190, 2010.
- [4] K. E. Skouby, I. William, and A. Gyamfi, *Handbook on ICT in developing countries: 5G perspective*: River Publishers, 2017.
- [5] M. Chen, C.-F. Lai, and H. Wang, 'Mobile multimedia sensor networks: architecture and routing', *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, p. 159, 2011.
- [6] N. Derbel, F. Derbel, and O. Kanoun, *Systems, Automation and Control: 2017 vol. 5*: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2017.
- [7] H. F. Durrant-Whyte, *Integration, coordination and control of multi-sensor robot systems vol. 36*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [8] A. Ghorbel, M. Jallouli, L. Amouri, and N. B. Amor, 'A HW/SW Implementation on FPGA of Absolute Robot Localization Using Webcam Data', *Sensors, Circuits & Instrumentation Systems*, vol. 2, p. 75, 2017.
- [9] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, 'Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions', *Future generation computer systems*, vol. 29, pp. 1645-1660, 2013.
- [10] O. Vermesan and J. Bacquet, *Next generation Internet of Things: Distributed intelligence at the edge and human machine-to-machine cooperation*: River Publishers, 2019.
- [11] A. Banafa, *Secure and Smart Internet of Things (IoT)*: River Publishers, 2018.
- [12] O. Vermesan and J. Bacquet, *Cognitive Hyperconnected Digital Transformation: Internet of Things Intelligence Evolution*: River Publishers, 2017.
- [13] K. Sha, A. Striegel, and M. Song, *Advances in Computer Communications and Networks: From Green, Mobile, Pervasive Networking to Big Data Computing*: River Publishers, 2016.
- [14] R. Chimata, R. Singh, and B. Singh, *Internet of Things in Automotive Industries and Road Safety*: River Publishers, 2018.
- [15] E. H. Putley, *The Hall effect and semi-conductor physics*, 1968.
- [16] R. S. Popovic, *Hall effect devices: magnetic sensors and characterization of semiconductors*: CRC Press, 2004.
- [17] E. Ramsden, *Hall-effect sensors: theory and application*: Elsevier, 2011.
- [18] M. Crescentini, M. Biondi, A. Romani, M. Tartagni, and E. Sangiorgi, 'Optimum design rules for CMOS Hall sensors', *Sensors*, vol. 17, p. 765, 2017.
- [19] Y. Chemthung, T. Phetchakul, and A. Poyai, 'Effect of Horizontal Magnetic Field on Magnetoresistance', *15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON2018)*, pp. 209-212, 2018.
- [20] C. Reig, S. Cardoso, and S. C. Mukhopadhyay, 'Giant magnetoresistance (GMR) sensors', *SSMI6*, vol. 1, pp. 157-80, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] L. Davies and M. Wells, 'Magneto-transistor incorporated in a bipolar IC', Proc. ICMCST, Sydney, Australia, pp. 34-35, 1970.
- [22] C. Riccobene, G. Wachutka, J. Burgler, and H. Baltes, 'Operating principle of dual collector magnetotransistors studied by two-dimensional simulation', IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, pp. 1136-1148, 1994.
- [23] Lj. Ristic M. Doan and M. Paranjape, '3-D Magnetic Field Sensor Realized as Lateral Magnetotransistor in CMOS Technology', Sensor and Actuators, Vols. A21-A23, pp. 770, 1990.
- [24] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, 'Magnetotransistor based on the carrier recombination-deflection effect', IEEE Sensor Journal 10(2), pp. 294-299, 2010
- [25] C. Leepattarapongpan et al., 'A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection effect', Microelectron Journal, vol. 45, pp. 565-573, 2014.
- [26] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk, 'Compact model of dual-drain MAGFETs simulation', Int. J. Electron. Commun. Comput. Eng, vol. 1, pp. 112-116, 2009.
- [27] R. Nakachai, A. Poyai, and T. Phetchakul, 'Non-Split Drain MAGFET', 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), pp. 1-4, 2019.
- [28] 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.
- [29] A. Nathan, A. M. J. Huiser, 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.
- [30] Sentaurus Process User Guide, Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [31] Sentaurus Structure Editor User Guide, Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [32] Sentaurus Device User Guide, Mountain View, CA, USA: Synopsys Inc, 2016.
- [33] K. Hess, Advanced theory of semiconductor devices, 2000.
- [34] J.-P. Colinge and C. A. Colinge, Physics of semiconductor devices: Springer Science & Business Media, 2005.
- [35] D. A. Neamen, Semiconductor physics and devices: basic principles: New York, NY: McGraw-Hill, 2012.

BIOGRAPHIES



Chalin Sutthinet 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, internet of thing, data science, artificial intelligence, virtual reality, 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, micro fabrication technology and integrated circuit. He worked at Thai Microelectronics Center (TMEC) and now he is currently working at Design & Engineering Consulting Service Center (DECC) as part of the National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand.



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, 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายชลินทร์ สุทธิเนตร
 วัน เดือน ปีเกิด 30 มีนาคม พ.ศ. 2513
 สถานที่เกิด ตำบลเจ้าเจ็ด อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
 ที่อยู่ 167/150 หมู่ 10 ตำบลบางเลน อำเภอบางใหญ่ จังหวัดนนทบุรี 11140
 ประวัติการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปริญญาวิชาชีพ (ปวช) วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม (Siam Technologe College)

ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1) ระบบควบคุมอัตโนมัติและหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
- 2) นักวิเคราะห์ระบบ โปรแกรมเมอร์ และผู้ดูแลระบบ
- 3) ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ระบบสมองกลฝังตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ไอโอที

ประสบการณ์การทำงาน

วิศวกรซ่อมบำรุง บริษัทสหวิริยา เพ็ญพาณิชย์ จำกัด ซ่อมบำรุงเครื่องมือวัดวิเคราะห์ทางเคมี ฟิสิกส์ เช่น UV-VIS Spectrophotometer (UV) , Atomic Absorption Spectrophotometer, Gas Chromatograph (GC), FTIR Spectrophotometer (FTIR), High Performance Liquid Chromatograph (HPLC), Gas Chromatograph Mass Spectrometer (GCMS), Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX)

วิศวกรฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท รอมบิกซ์ จำกัด ออกแบบระบบเครื่องเสียง และระบบควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม

วิศวกรฝ่ายวิจัยและพัฒนา (โปรแกรมเมอร์และนักวิเคราะห์ระบบ) บริษัท สยามอินเวอร์เตอร์ จำกัด ออกแบบและซ่อมบำรุงระบบควบคุมอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้