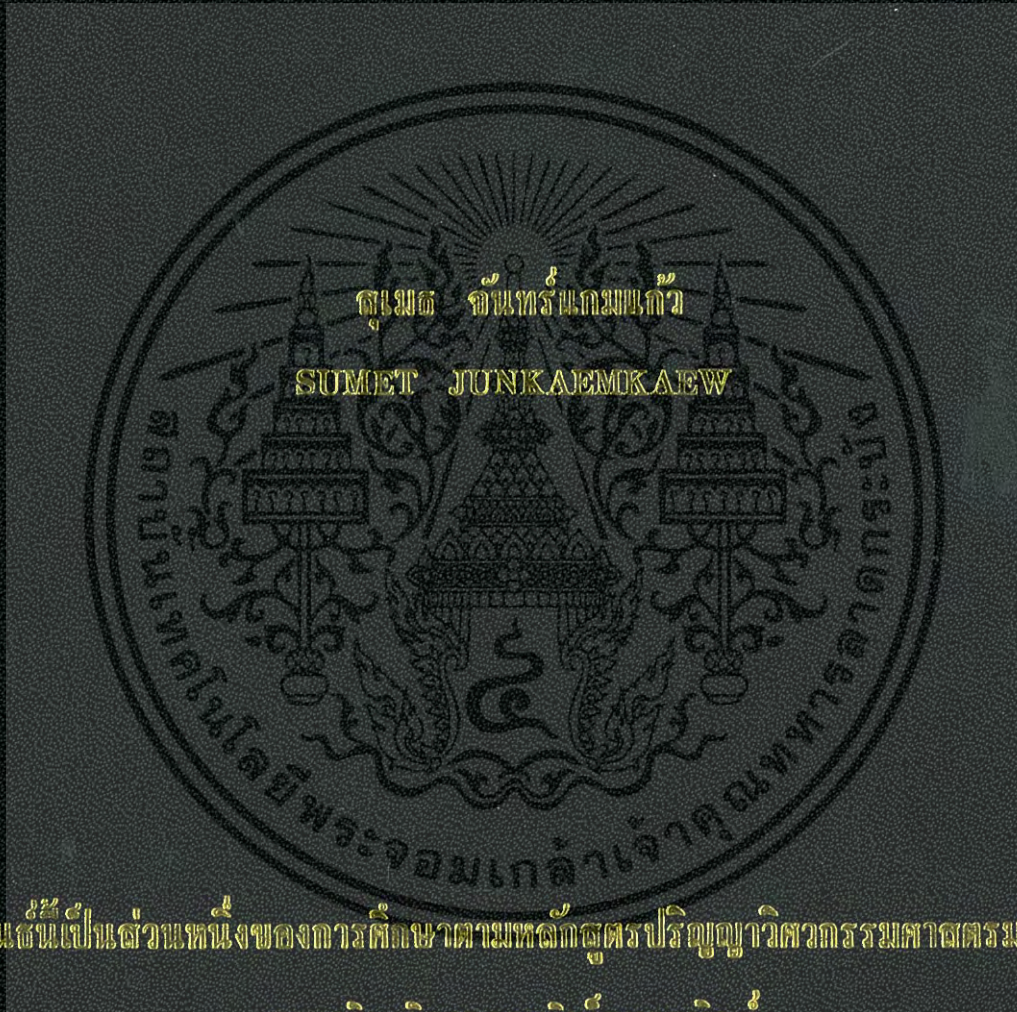


แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

DUAL CATHODES MAGNETODIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิทยาศาสตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

DUAL CATHODES MAGNETODIODE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DUAL CATHODES MAGNETODIODE



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

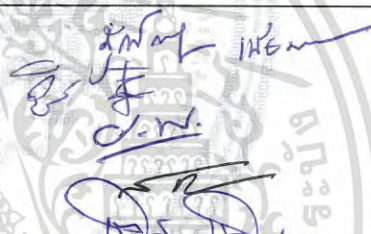
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แมคนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่  
Thesis Title Dual Cathodes Magnetodiode  
นักศึกษา นายสุเมธ จันทร์แกมแก้ว  
รหัสประจำตัว 51060401  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-040-021

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ |               | ลายมือชื่อ  |
|--------------------------|---------------|---|
| ผศ.ดร.สุรศักดิ์          | เนียมเจริญ    |  |
| รศ.ดร.วิสุทธิ์           | ฐิติรุ่งเรือง |   |
| ดร.อัมพร                 | โพธิ์ไย       |   |
| รศ.สมศักดิ์              | เชียรศิริกุล  |   |
| รศ.ดร.เต็มพงษ์           | เพ็ชรกุล      |   |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่  |
| นักศึกษา                    | นาย สุเมธ จันท์แกมแก้ว   |
| รหัสประจำตัว                | 51060401                 |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต   |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์   |
| พ.ศ.                        | 2556                     |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอแมกนีโตไดโอดแบบใหม่ที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดสองตัวที่ปลายด้านหนึ่งต่อร่วมกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแยกจากกันแบบสมมาตร การทำงานอาศัยหลักการฉีดพาหะจากปลายที่ต่อร่วมกันเรียกว่า ขั้วแอนโนด (A) ไปยังขั้วที่แยกจากกันอย่างสมมาตรเรียกว่า ขั้วแคโทด (K) ซึ่งมีสองขั้วเป็น K1 และ K2 โดยการไบอัสไปข้างหน้า ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กไหลผ่านจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านขั้วแคโทดทั้งสองมีกระแสที่เท่ากันเนื่องจากความสมมาตรของขั้ว แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กให้ทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าอุปกรณ์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของพาหะและความแตกต่างของกระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสอง ขึ้นอยู่กับทิศทางสนามแม่เหล็กที่ให้ ซึ่งแปรผันตรงอย่างเชิงเส้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยที่ความแตกต่างของกระแสที่ขั้วที่แยกออกจากกันนั้นมีความสัมพันธ์กับความยาว (L) ของขั้วแอนโนดกับแคโทดและความกว้าง (W) ระหว่างขั้วแคโทดทั้งสอง กระแสที่ให้กับไดโอด แรงดันไบอัส และความเข้มของสนามแม่เหล็ก แมกนีโตไดโอดชนิดนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งขนาดและทิศทาง ความไวอุปกรณ์ที่ค่ากระแส 3 mA สนามแม่เหล็กช่วง 0 ถึง 400 mT มีค่าความไวเท่ากับ 13.636 mV/T และมีค่าความไม่เชิงเส้นที่ตัวอุปกรณ์ 0.9 %

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| Thesis         | DUAL CATHODES MAGNETODIODE        |
| Student        | Mr. Sumet Junkaemkaew             |
| Student ID     | 51060401                          |
| Degree         | Master Degree of Engineering      |
| Program        | Electronics Engineering           |
| Year           | 2013                              |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr.Toempong Phetchakul |

### ABSTRACT

This thesis presents the new magnetodiode which the structure consists of two pn junction diodes. The anodes are common together and the cathodes are symmetrical separated, K1 and K2. The mechanism is carrier deflection of injected carrier from the common anode by forward biasing toward to separated cathode. When no magnetic field, there is no current difference of two cathode current. But when magnetic field is applied perpendicular to the device surface, the current difference caused by Lorentz force is linearly changed with the magnetic field density, It relate to deflection length between anode and cathode, the width (W) between cathodes, applied current and magnetic field density. It can detect both the direction and magnitude of magnetic field. The sensitivity at current 3 mA , magnetic field 0 - 400 mT is 13.636 mV / T and has a linearity 0.9%.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการดำเนินงาน การสนับสนุนเครื่องมือต่างๆ และรวมไปถึงการสนับสนุนการศึกษาค้นคว้าของนักศึกษาอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณชนะ สลักทรัพย์พันธ์และคุณวีระ เพ็งจันทร์ ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบการเขียนบทความ และการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณ นาย ชลินทร์ สุทธิเนตร นักศึกษาปริญญาโท สำหรับคำปรึกษาที่มีประโยชน์และแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (Thai Microelectronic Center) ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ การใช้เครื่องมือวัดต่างๆ และพี่ๆ ทุกคนในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ให้กำลังใจและคอยชี้แนะแนวทางต่างๆ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำแนะนำปรึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และคนในครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุเมธ จันท์แกมแก้ว

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                      | I    |
| Abstract.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                      | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญตาราง.....  | VIII |
| สารบัญรูป.....  | IX   |
| สัญลักษณ์.....  | XI   |
| <br>  |      |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                   | 1    |
| 1.2 สมมติฐานการศึกษา.....                                 | 2    |
| 1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....              | 2    |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....                                | 3    |
| 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....                               | 3    |
| <br>  |      |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                           | 5    |
| 2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect).....                    | 6    |
| 2.2 ประเภทของเซนเซอร์แม่เหล็ก.....                        | 9    |
| 2.2.1 เซนเซอร์แม่เหล็กแบบฮอลล์.....                       | 9    |
| 2.2.2 แมกนีโตรีซิสเตอร์ (Magnetoresistor).....            | 11   |
| 2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransister).....        | 12   |
| 2.2.4 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode).....                    | 14   |
| 2.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์.....                             | 17   |
| 2.3.1 ความแม่นยำ (accuracy).....                          | 18   |
| 2.3.2 ความแน่นอน (precision).....                         | 18   |
| 2.3.3 ความคลาดเคลื่อน (error).....                        | 18   |
| 2.3.4 การปรับเทียบ (calibration).....                     | 18   |
| 2.3.5 ขนาด (dimension ).....                              | 18   |
| 2.3.6 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone dead หรือ band)..... | 18   |
| 2.3.7 ดริฟท์ (drift).....                                 | 19   |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 2.3.8 ฮีสเทอริซิส (hysteresis).....   | 20        |
| 2.3.9 การหน่วงสัญญาณ (lag).....   | 20        |
| 2.3.10 ความเป็นเชิงเส้น (linearity).....                                      | 20        |
| 2.3.11 ผลตอบสนอง (response).....  | 21        |
| 2.3.12 ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response).....                          | 21        |
| 2.3.13 ความไว (sensitivity).....  | 21        |
| 2.3.14 เสถียรภาพ (stability).....   | 21        |
| 2.3.15 ค่าเบี่ยงเบน (tolerance).....  | 21        |
| <b>บทที่ 3 โครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....</b>        | <b>22</b> |
| 3.1 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....                                     | 22        |
| 3.2 หลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ.....         | 23        |
| 3.3 การออกแบบของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....                                  | 27        |
| <b>บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....</b> | <b>29</b> |
| 4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน.....   | 29        |
| 4.2 ทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean).....                                     | 30        |
| 4.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process).....                              | 30        |
| 4.3.1 การออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation).....                                | 31        |
| 4.3.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation).....                                | 32        |
| 4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography Process).....                     | 32        |
| 4.4.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์(Wafer Cleaning).....                          | 33        |
| 4.4.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating).....                            | 34        |
| 4.4.3 วิธีการเคลือบ (Coating).....  | 35        |
| 4.4.4 การอบขึ้น(Softback).....  | 36        |
| 4.4.5 การปรับชั้นมาสก์(Mask Alignment).....                                   | 37        |
| 4.4.6 การฉายแสง(Exposure).....  | 37        |
| 4.4.7 การล้างน้ำยาไวแสง(Development).....                                     | 37        |

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.4.8 การอบขึ้น Hardbake.....  | 38   |
| 4.4.9 การกัด(Etching).....   | 38   |
| 4.4.10 การลอกน้ำยาไวแสง.....   | 38   |
| 4.5 กระบวนการแพร่สารเจือ(Deposition).....                                  | 38   |
| 4.5.1 การแพร่สารเจือชนิดพี.....  | 39   |
| 4.5.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น.....  | 40   |
| 4.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน(Metalzation Process).....                        | 40   |
| 4.7 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....                             | 42   |
| 4.7.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design).....                                    | 42   |
| 4.7.2 กระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....                           | 45   |
| 4.7.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์.....                    | 45   |
| 4.7.4 ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างขั้วแคโทด.....                | 46   |
| 4.7.5 ขั้นตอนการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างขั้วแอโนด.....                   | 47   |
| 4.7.6 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ.....   | 48   |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....   | 52   |
| 5.1 วงจรวัดผลการทดลอง.....   | 52   |
| 5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล (Measurement and Discussion).....          | 55   |
| 5.2.1 การวัดคุณสมบัติรอยต่อทางไฟฟ้า.....                                   | 55   |
| 5.3 การวัดผลตอบสนองสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอด (Magnetic field response)..... | 56   |
| 5.3.1 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง.....                            | 56   |
| 5.3.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระแสแอโนดค่าต่างกัน.....              | 58   |
| 5.3.3 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....                                  | 63   |
| 5.3.4 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity).....                                    | 63   |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....                                   | 65   |
| เอกสารอ้างอิง.....   | 67   |
| ภาคผนวก.....   | 69   |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 70   |
| ประวัติผู้เขียน.....                          | 76   |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.1 ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่<br>ที่ค่าความกว้างแอนโนด (L) $40\ \mu\text{m}$ กับแคโทด (W) $40\ \mu\text{m}$ กระแสแอนโนดค่าแตกต่างกัน..... | 60   |
| 5.2 ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่<br>ที่ค่าความกว้างแอนโนด (L) $80\ \mu\text{m}$ กับแคโทด (W) $80\ \mu\text{m}$ กระแสแอนโนดค่าแตกต่างกัน..... | 62   |
| 5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด<br>ที่กระแสแอนโนดค่าแตกต่างกัน.....  | 63   |



## สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....  | 5    |
| 2.2 แสดงทิศของกระแสที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและแรงลอเรนซ์.....   | 7    |
| 2.3 การแสดงการเกิดปรากฏการณ์แรงดันฮอลล์.....   | 8    |
| 2.4 การแสดงการเกิดปรากฏการณ์กระแสฮอลล์.....  | 8    |
| 2.5 เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์และแรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ.....                                      | 9    |
| 2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง.....   | 10   |
| 2.7 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวนอน.....  | 11   |
| 2.8 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์.....   | 12   |
| 2.9 ด้านตัดขวางโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง.....                                      | 13   |
| 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน.....   | 14   |
| 2.11 แมกนีโตไดโอดเซนเซอร์แบบตั้งฉาก.....   | 15   |
| 2.12 แมกนีโตไดโอดเซนเซอร์แบบขนาน.....  | 15   |
| 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดเซนเซอร์.....  | 16   |
| 2.14 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ SOS แมกนีโตไดโอด.....  | 16   |
| 2.15 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ใช้เทคโนโลยีแบบ CMOS IC.....  | 17   |
| 2.16 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone).....  | 19   |
| 2.17 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮีสเตอร์ซิส.....  | 19   |
| 2.18 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น.....  | 20   |
| 2.19 ความเร็วในการตอบสนอง.....   | 21   |
| 3.1 แสดงภาพด้านมิติของแมกนีโตไดโอดตามลักษณะการออกแบบประกอบด้วย<br>แอนตรวมกันหนึ่งขา และขาแคโทดสองขา..... | 23   |
| 3.2 การเบี่ยงเบนพาหะ Hall โดย Lorentz force.....   | 24   |
| 3.3 พื้นที่ของการเบี่ยงเบนพาหะ (Hole).....   | 25   |
| 3.4 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว L ของอุปกรณ์ฮอลล์.....  | 26   |
| 3.5 การลดลงของความยาว L ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า.....                                  | 27   |
| 3.6 แสดงโครงสร้างทั้งสองค่าพารามิเตอร์.....  | 27   |
| 3.7 ชุดมาร์คที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....                                       | 28   |
| 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....                                  | 29   |
| 4.2 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน.....   | 31   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.3 กระบวนการออกซิเดชันแบบชั้น.....   | 31   |
| 4.4 กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง.....   | 32   |
| 4.5 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process .....   | 33   |
| 4.6 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด.....   | 34   |
| 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์.....  | 35   |
| 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์.....   | 36   |
| 4.9 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมตัวขาอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก.....   | 41   |
| 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator.....   | 41   |
| 4.11 มาส์คที่ 1 ( แคโทด Mask ).....   | 43   |
| 4.12 มาส์คที่ 2 (แอนโนด Mask).....  | 43   |
| 4.13 มาส์คที่ 3 Contact Windows .....   | 44   |
| 4.14 มาส์คที่ 4: Aluminum Mask.....   | 44   |
| 4.15 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์.....  | 45   |
| 4.16 ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างขั้วแคโทด.....  | 47   |
| 4.17 ขั้นตอนการสร้างขั้วแอนโนด.....   | 47   |
| 4.18 ขั้นตอนการเปิดช่องสร้างขั้วโลหะ.....   | 48   |
| 4.19 กระบวนการสร้างขั้วชั้นโลหะ.....  | 49   |
| 4.20 แสดงแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน.....  | 50   |
| 4.21 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ทำการขยายสัดส่วน.....  | 50   |
| 4.22 แสดงการเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งาน.....   | 51   |
| 5.1 แสดงวงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....   | 53   |
| 5.2 วงจรขยายแรงดันเอาต์พุตแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....  | 53   |
| 5.3 โครงสร้างและการต่อใช้งาน.....   | 54   |
| 5.4 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง.....   | 54   |
| 5.5 คุณสมบัติความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้.....   | 56   |
| 5.6 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด.....   | 58   |
| 5.7 แสดงผลของกราฟที่ค่าความกว้างแอนโนด (L) 40 $\mu\text{m}$ กับแคโทด (W) 40 $\mu\text{m}$ .....   | 59   |
| 5.8 แสดงผลของกราฟที่ค่าความกว้างแอนโนด (L) 80 $\mu\text{m}$ กับแคโทด (W) 80 $\mu\text{m}$ .....   | 62   |
| 5.9 เปรียบเทียบกราฟจากการทดลองจริงกับกราฟจากการประมาณค่าเพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น<br>ของแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 3.0 mA เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวก..... | 64   |
| 6.1 เปรียบเทียบโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่.....   | 65   |

## สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์   | คำอธิบาย   | หน่วย                     |
|-------------|--|---------------------------|
| $B$         | Magnetic field   | $\text{Wb/m}^2$           |
| $d$         | Hall thickness   | $\mu\text{m}$             |
| $e$         | Electron charge = $1.602 \times 10^{-19}$                | C                         |
| $E_H$       | Hall field   | V/cm                      |
| $E$         | Electric field   | V/cm                      |
| $\vec{F}_L$ | Lorentz force  | V.Wb/m.s                  |
| $G$         | Geometry Factor  | -                         |
| $I_D$       | Anode current  | A                         |
| $J_n$       | Electron density   | $\text{A/cm}^2$           |
| $J_p$       | Hole density   | $\text{A/cm}^2$           |
| $J_x$       | Current density  | $\text{A/cm}^2$           |
| $K_g$       | Constant of parameter structure                          | -                         |
| $L, l$      | Length of hall   | $\mu\text{m}$             |
| $n$         | Density of electron                                      | $\text{cm}^{-3}$          |
| $p$         | Density of hole  | $\text{cm}^{-3}$          |
| $q$         | Magnitude of electronic charge = $1.602 \times 10^{-19}$ | C                         |
| $r_n$       | Scattering parameter                                     | -                         |
| $R_H$       | Hall constant  | $1/\text{C.cm}^{-3}$      |
| $s$         | Contact width of hall                                    | $\mu\text{m}$             |
| $S_A$       | Absolute sensitivity                                     | V/T                       |
| $S_R$       | Relative sensitivity                                     | $\text{T}^{-1}$           |
| $v_x$       | Velocity   | cm/s                      |
| $V_H$       | Hall voltage   | V                         |
| $W, w$      | Width of hall  | $\mu\text{m}$             |
| $\mu_H$     | Hall mobility  | $\text{cm}^2/\text{V-s}$  |
| $\mu_{Hi}$  | Hall mobility (Consider collusion of lactic)             | $\text{cm}^2/\text{V-s}$  |
| $\mu_n$     | Electron mobility  | $\text{cm}^2/\text{V-s}$  |
| $\mu_p$     | Hole mobility  | $\text{cm}^2/\text{V-s}$  |
| $\theta_H$  | Hall angle   | rad                       |
| $\rho$      | Resistivity  | $\Omega\text{-cm}$        |
| $\sigma$    | Conductivity   | $(\Omega\text{-cm})^{-1}$ |

# บทที่ 1

## บทนำ

เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำในยุคปัจจุบันมีการวิจัยพัฒนาเพื่อนำไปสร้างและประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันไปอย่างหลากหลายรูปแบบ เช่น อุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานให้ตรงตามความต้องการ ซึ่งอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับนับว่ามีบทบาทที่สำคัญ เพราะในการวัดค่าบางอย่างเพียงสังเกตทางกายภาพหรือมองด้วยตาเปล่าไม่สามารถทำได้ สำหรับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนามาโดยตลอดคือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ในรูปแบบเซนเซอร์แม่เหล็กที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ฮอลล์เซ็นเซอร์, แมกนีโตไดโอด, แมกนีโตทรานซิสเตอร์ อุปกรณ์ที่กล่าวทั้งหมดนี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายการทำงานความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงลอเรนซ์สำหรับแมกนีโตไดโอดแบบคู่เป็นการนำเสนอแบบใหม่ที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานที่อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์เช่นเดียวกัน

แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กนี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่และมีความคล้ายกับแมกนีโตทรานซิสเตอร์[14,15] แล้วยังมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกันอีกด้วย โดยการที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการทำงานซึ่งทำให้เกิดแรงลอเรนซ์มากระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างกระแสไฟฟ้าส่วนแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่นี้จะมีความแตกต่างทางโครงสร้างกับแมกนีโตไดโอดแบบเก่าคือจะมีขั้วแอโนด หนึ่งขั้วและมีแคโทดสองขั้วที่มีขนาดเท่ากันและสมมาตรกัน ความไวในการตอบสนองจะขึ้นอยู่กับกระแสการไบอัสซึ่งแตกต่างกับแมกนีโตไดโอดแบบเก่าที่ค่าความไวในการตอบสนองจะขึ้นกับอุณหภูมิ แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่นี้ยังมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้าง มีความทนทานต่อกระแสเหมือนดังไดโอดและมีความเสถียรภาพ ซึ่งการทำงานที่กล่าวมาจากข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำงานในด้านอุตสาหกรรมได้อีกมากมายที่ใช้ในการตรวจจับขนาดของสนามแม่เหล็กและทิศทางของสนามแม่เหล็กได้

### 1.1 ความเป็นมาและ ความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเซนเซอร์แม่เหล็กที่เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำมีการวิจัยพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างต่อเนื่องโดยอุปกรณ์เหล่านี้ส่วนมากอาศัยหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของประจุพาหะ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและแรงที่เกิดจากการที่สนามแม่เหล็กตัดผ่าน จากอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบเก่านั้น อาศัยความแตกต่างระหว่างการรวมตัวของพาหะกับสองรอยต่ออันเป็นผลจากแมกนีโตเซนเตรชัน (magneto concentration effect) โดยที่พาหะจะถูกกระทำด้วย

แรงลอเรนซ์ให้เกิดการเบี่ยงเบนไปยังขอบของอุปกรณ์ ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะจะถูกนำไปใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบเก่า ข้อเสียในการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบเก่านั้น ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่ใช่เชิงเส้นและอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่มากระทำกับตัวอุปกรณ์ [1-3]

แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่นี้เป็นโครงสร้างเหมือนกับไดโอดสองตัว ที่ปลายด้านหนึ่งต่อร่วมกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแยกจากกันแบบสมมาตร การทำงานอาศัยหลักการฉีดพาหะ จากปลายที่ต่อร่วมกันไปยังขั้วที่แยกจากกันภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าอุปกรณ์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสที่ขั้วที่แยกจากกัน ซึ่งจะแปรผันตรงอย่างเชิงเส้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ชนิดนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งขนาดและทิศทาง ความไวอุปกรณ์แปรตามกระแสไดโอดและแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ชนิดนี้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้าง [4-6] ทนทานใช้งานง่ายเหมือนไดโอด

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ซึ่งมีขาอาโนดร่วมกันและมีขาแคโทดสองขา ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยที่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสของขั้วแคโทดทั้งสอง ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความแตกต่างของกระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสอง โดยการเปลี่ยนแปลงระยะความกว้างของแคโทดทั้งสอง (W) และระยะระหว่างขั้วอาโนดกับแคโทด (L) เพื่อดูผลของเอาต์พุตและความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก [7-15]

## 1.2 สมมติฐานการศึกษา

1. กระแสไดโอดในแผ่นฐานรองชนิดเอ็นสามารถทำการเบี่ยงเบนได้
2. การแบ่งกระแสไดโอดแบบสมมาตรทำให้สามารถแสดงการเปลี่ยนของกระแสที่เกิดจากสนามแม่เหล็กอย่างเป็นเชิงเส้น
3. ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเกิดจากความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและขนาดของกระแสไบอัสที่ขั้วแอโนด
4. ความกว้างของแคโทดทั้งสองและความยาวระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดมีผลทำให้ความไวแตกต่างกัน

## 1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบใหม่และสามารถนำมาใช้งาน ต่างๆได้หลากหลาย การใช้ประโยชน์จากโครงสร้างไดโอดแบบคู่เพื่อนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจึงเป็นอีกหนึ่งบทบาทของไดโอด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาแมกนีโตไดโอดสองตัวแบบสามขั้ว ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยทฤษฎี

ปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์มากระทำกับพาหะให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสของ  
ขั้วแคโทดทั้งสอง การเปลี่ยนแปลงระยะความกว้างของแคโทดกับระยะระหว่างขั้วแอโนดกับ  
แคโทดและการเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานจะสามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก  
เพิ่มขึ้น

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาหลักการการทำงานพื้นฐานของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก  
และอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยใช้โครงสร้างไดโอด เรียกอีกแบบว่าแมกนีโตไดโอดแบบ  
แคโทดคู่ เริ่มศึกษาแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่มีโครงสร้างไดโอดสองตัวที่ปลายด้านหนึ่งต่อร่วมกัน  
ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแยกจากกันตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้ง วิเคราะห์คุณสมบัติ  
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้รับและขนาดของสนามแม่เหล็กที่สามารถตรวจจับ  
เปรียบเทียบเอาต์พุตที่พารามิเตอร์ต่างๆ ศึกษาความสัมพันธ์ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก  
กับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กและกระแสของขั้วแคโทดทั้งสองและทำการประกอบเป็นตัวอุปกรณ์  
ต้นแบบ

#### 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
2. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่
3. ศึกษากระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่
4. ศึกษาการออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรม corel draw
5. ศึกษากระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
6. ศึกษากระบวนการโพโตลิโธกราฟี
7. ศึกษากระบวนการแพะอะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส
8. ศึกษาวิธีการระเหยในสุญญากาศ (evaporation)
9. ศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่
10. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งและแนวนอนที่มีผลต่อ  
เอาต์พุต ของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่
11. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กกับความหนาแน่น  
สนามแม่เหล็กและกระแสการทำของขั้วแคโทดทั้งสอง

โดยเนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่างๆตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขั้นตอนการศึกษาของ  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีเซนเซอร์ต่างๆ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก กล่าวถึง หลักการพื้นฐานปรากฏ

การณ้ฮอลล์ เช่น อุปกรณ์ฮอลล์, แมกนีโตรีซิสเตอร์, แมกนีโตไดโอดและแมกนีโตทรานซิสเตอร์  
 บทที่ 3 โครงสร้างและการออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ กล่าวถึง การออกแบบแมกนีโต  
 ไดโอดแบบแคโทดคู่โดยทำการออกแบบเปรียบเทียบความยาวแอนอด L และความกว้างระหว่าง  
 แคโทดทั้งสอง W ที่พารามิเตอร์ต่างๆ ทำการออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่โดยออกแบบ  
 เปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ในรูปแบบสองตัวรวมกระแสและการออกแบบ  
 มาส์คของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้าง กล่าวถึง เทคโนโลยีในการสร้างแมกนีโตไดโอด  
 แบบแคโทดคู่ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ฯลฯ กระบวนการสร้างของ  
 อุปกรณ์ทั้งโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

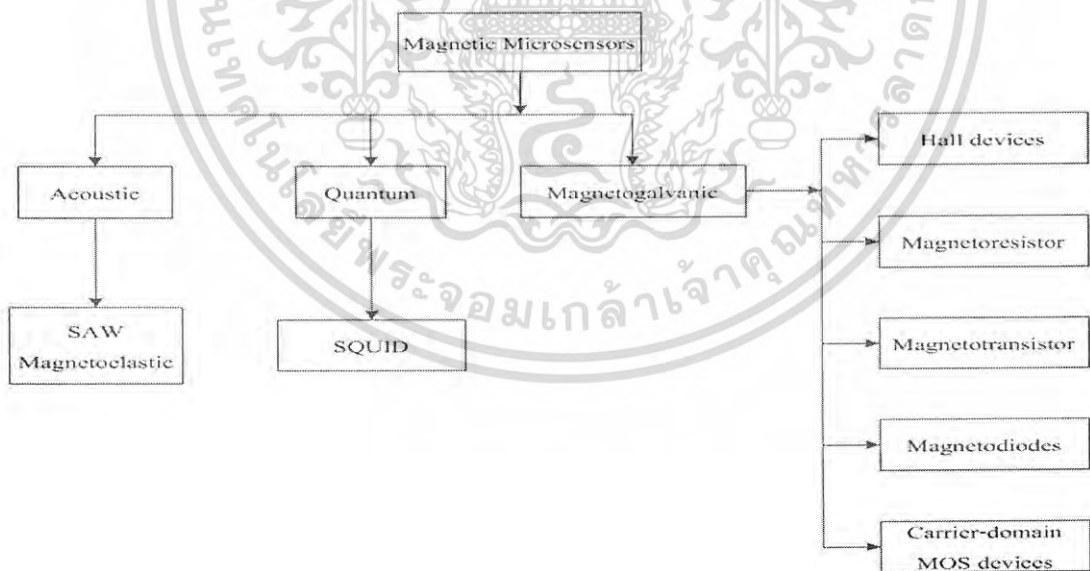
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึง การทดลองต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทดลอง  
 คุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทดลองการตอบสนอง  
 สนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอนของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ แสดงตาราง ค่าความไวในการ  
 ตรวจจับสนามแม่เหล็กของแต่ละรูปแบบ

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 5 โดยการนำผล  
 การทดลองทั้งหมดมาสรุปและรวมไปถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Magnetic Sensor หรือ เซนเซอร์แม่เหล็ก เป็นสิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือตรวจวัดสนามแม่เหล็ก โดยที่การตรวจจับสนามแม่เหล็กมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ.1842 จนเรื่อยมาซึ่งมีทฤษฎีมากมายที่ใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแต่จะมีหนึ่งประเภทที่นิยมใช้มากในการตรวจจับสนามแม่เหล็กก็คือ ประเภท Magnetic Microsensor โดยที่สามารถแบ่งประเภทของหลักการออกเป็นสามหลักการใหญ่ๆ ประกอบไปด้วยหลักการของ Acoustic , Quantum , และที่นิยมใช้กันมากก็คือ Magnetogalvanic sensor จากรูปที่ 2.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยหลักปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect),[1] จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถนำมาสร้างตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ เช่น ฮอลล์เซ็นเซอร์(Hall devices), ปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetoresistive Effect) แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor), แมกนีโตไดโอด (Magnetodiodes), แมกนีโตรซิสเตอร์ (Magnetoresistor) และ Carrier domain MOS devices เป็นต้น ในปัจจุบันการพัฒนาเซ็นเซอร์แม่เหล็กได้มีการสร้างโครงสร้างที่หลากหลายมากมายตามแต่วัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน ดังนั้นในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของโครงสร้างแต่ละแบบก็จะมีความแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

จากที่กล่าวมาข้างต้น เซ็นเซอร์แม่เหล็กใช้หลักการทำงานของปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นส่วนใหญ่ และปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลผ่านให้กับแผ่นสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุพาหะภายในแผ่นสารกึ่งตัวนำนั้น และถ้านำไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของพาหะจะมีแรงกระทำต่อพาหะเกิดขึ้น ซึ่งแรงที่กระทำต่อพาหะนี้เรียกว่า “แรงลอเรนซ์ โดยจะมีทิศตั้งฉากกับทั้งทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

แรงลอเรนซ์ คือแรงที่กระทำต่อประจุพาหะ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อประจุพาหะขนาด  $q$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย  $v$  (ภายใต้สนามไฟฟ้า  $E = qv$ ) และมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก  $B_z$  พบว่ามีแรงกระทำต่อประจุนั้นเกิดขึ้น โดยสามารถคำนวณขนาดของแรงลอเรนซ์ได้จากสมการที่ (2.1) [4]

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}_z) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $F_L$  คือแรงลอเรนซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดย  $q$  คือประจุไฟฟ้า และ  $B_z$  คือขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอก

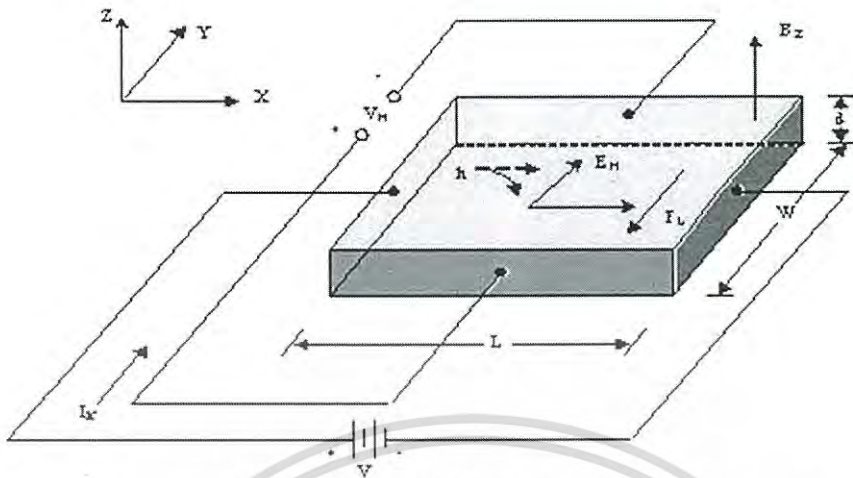
ในการศึกษาหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กของเซ็นเซอร์แม่เหล็กโครงสร้างแบบฮอลล์นั้น จะอาศัยพื้นฐานมาจากหลักการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแผ่นฮอลล์เพลต ในการศึกษาถึงปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น

พิจารณาแผ่นฮอลล์เพลตดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์  $V$  โวลต์ ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (current density)  $J_x$  ไหลในทิศ  $+X$  และให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่น (flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ  $+Z$

เมื่อโฮล (Hole) คือพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก ได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าในทิศทาง  $+X$  ส่งผลให้เกิดมีแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟท์ (drift velocity)  $v_x$  ในทิศทาง  $+X$  และเมื่อมีสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ตัดผ่านในทิศตั้งฉากกับทิศทางของกระแส จะทำให้เกิดมีแรงลอเรนซ์กระทำต่อโฮลเกิด ดังสมการที่ (2.1)

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ  $\vec{F}_L$  คือแรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะ ดังนั้นจะได้ว่า

$$|\vec{F}_L| = F_L = e \cdot v_x \cdot B_z \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 แสดงทิศของกระแสที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และแรงลอเรนซ์ (F)

จากสมการที่ (2.2) ดังนั้นจะได้ทิศทางของแรงลอเรนซ์อยู่ในแกน  $-Y$  ซึ่งจะทำให้โฮลที่เป็นพาหะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปยังแกน  $-Y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมากๆ ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนของโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $\vec{E}_H$  ในทิศ  $+Y$  สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในภาวะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ  $+Y$  ได้แสดงว่าแรงลอเรนซ์  $\vec{F}_L$  และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน  $e\vec{E}_H$  มีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$eE_H = F_L = e \cdot v_x \cdot B_z \quad (2.3)$$

จากสมการ 
$$E_H = v_x \cdot B_z \quad (2.4)$$

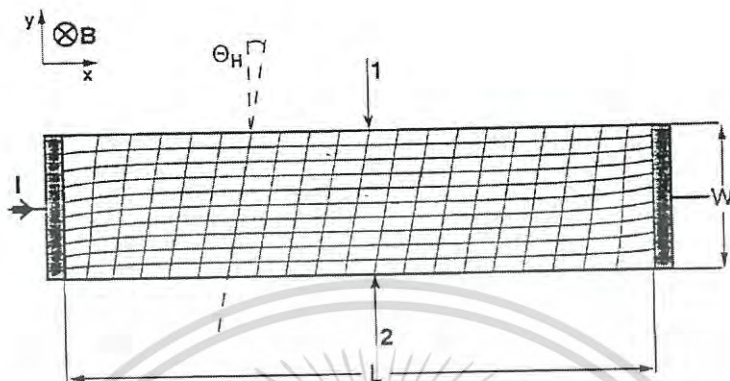
และสมการ 
$$J_x = p \cdot e \cdot v_x \quad \text{หรือ} \quad v_x = \frac{J_x}{p \cdot e} \quad (2.5)$$

ดังนั้นแทนค่า  $v_x$  ในสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.5) จะได้ค่าสนามไฟฟ้าภายในดังสมการต่อไปนี้

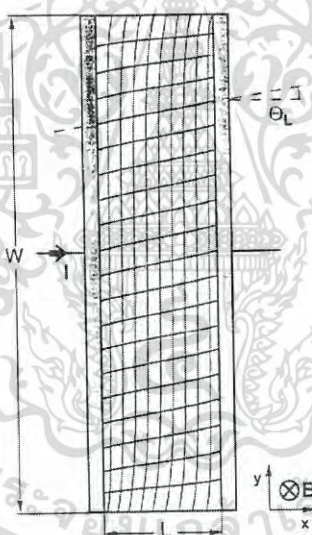
$$E_H = \frac{J_x \cdot B_z}{p \cdot e} \quad (2.6)$$

ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์สิ่งที่จะขาดไปไม่ได้คือ แรงดันฮอลล์และการเลี้ยวเบนของพาหะจากรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงการเกิดปรากฏการณ์แรงดันฮอลล์จะกล่าวถึง แท่งสารกึ่งตัวนำที่มีความยาว  $L$  เมื่อมีสนามแม่เหล็กมาเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้เต็มที่และสมบูรณ์ แรงดันฮอลล์ที่

เหนี่ยวนำจะมีค่าขึ้นอยู่กับแรงลอเรนซ์ ทำให้เส้น equippotential มีมุมฮอลล์เกิดขึ้น การทำให้พาดะที่ถูกแรงลอเรนซ์กระทำจะถูกสนามไฟฟ้าจากแรงดันฮอลล์ดึงกลับทำให้กระแสวิ่งเป็นเส้นตรง สังเกตได้จากเส้นกระแสแนวอนดงรูปที่ 2.3 การนำค่าแรงดันฮอลล์ไปใช้งานจะต้องออกแบบให้อุปกรณ์แท่งสารกึ่งตัวนำนี้ให้มีค่าความยาว



รูปที่ 2.3 การแสดงการเกิดปรากฏการณ์แรงดันฮอลล์

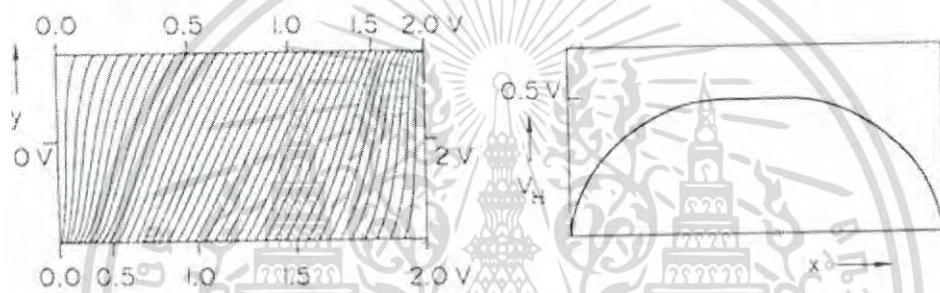


รูปที่ 2.4 การแสดงการเกิดปรากฏการณ์กระแสฮอลล์

สิ่งที่เกิดคู่กับปรากฏการณ์ฮอลล์คือการเลี้ยวเบนของพาดะเกิดจากกรณีที่สารกึ่งตัวนำมีความสั้น  $L$  คือความกว้าง ( $W$ ) มากกว่า ความยาว ( $L$ ) และเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้แรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นเหนี่ยวนำไม่เต็มทีเส้น equip-potential จะมีค่าค่อนข้างขนานไม่เกิดมุมฮอลล์ที่สมบูรณ์จึงทำให้แรงลอเรนซ์มีค่ามากกว่าค่าแรงจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ทำให้พาดะมีการเลี้ยวเบนทำให้กระแสเลี้ยวเบนเป็นมุมลอเรนซ์แสดงดังรูปที่ 2.4 การนำค่ากระแสที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้ไปใช้งานจะต้องเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบให้มีความสั้นด้าน  $L$  หรือมีความกว้าง ( $W$ ) มากกว่า ความยาว ( $L$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาการกำหนดระยะความยาว  $L$  สามารถทำการศึกษาจากทฤษฎีฮอลล์โดยที่รูปที่ 2.5 (ก) แสดงเส้นศักย์เท่ากัน (equipotential lines) ของอุปกรณ์ฮอลล์ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทำให้พาหะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่คงที่ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้สมบูรณ์ ซึ่งจะแตกต่างกับบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์โดยสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถมีค่าได้สูงสุดรูปที่ 2.5 (ข) แสดงค่าแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ฮอลล์แรงดันฮอลล์มีค่าสูงที่สุดในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์และบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีค่าแรงดันฮอลล์ที่น้อยเพราะฉะนั้นการออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ววัดแรงดันฮอลล์โดยส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบให้อยู่ตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์



(ก) เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์

(ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ

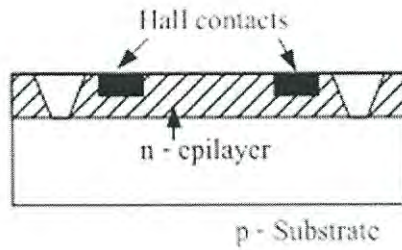
รูปที่ 2.5 เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์และแรงดันฮอลล์ในบริเวณต่างๆ

## 2.2 ประเภทของเซนเซอร์แม่เหล็ก

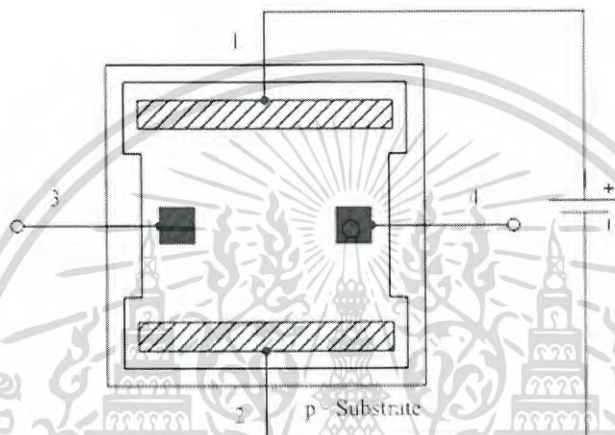
จากรูปที่ 2.1 เป็นการจำแนกของประเภทเซนเซอร์แม่เหล็กที่ใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งจำแนกตามหลักการทำงานพื้นฐานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแต่ละอุปกรณ์แต่ละชนิดได้ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 เซนเซอร์แม่เหล็กแบบฮอลล์

ในปัจจุบันเซนเซอร์แม่เหล็กแบบอุปกรณ์ฮอลล์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เซ็นเซอร์ชนิดแวนดิงและแวนอน ซึ่งแบ่งตามความสามารถในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยรูปที่ 2.6 (ก) และ 2.6 (ข) แสดงมุมมองด้านบนและด้านภาคตัดขวางของฮอลล์เซ็นเซอร์แวนดิงชนิดเอ็นซึ่งสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์ โครงสร้างคือ ใช้ฐานรองชนิดพี



(ก). ภาคตัดขวาง



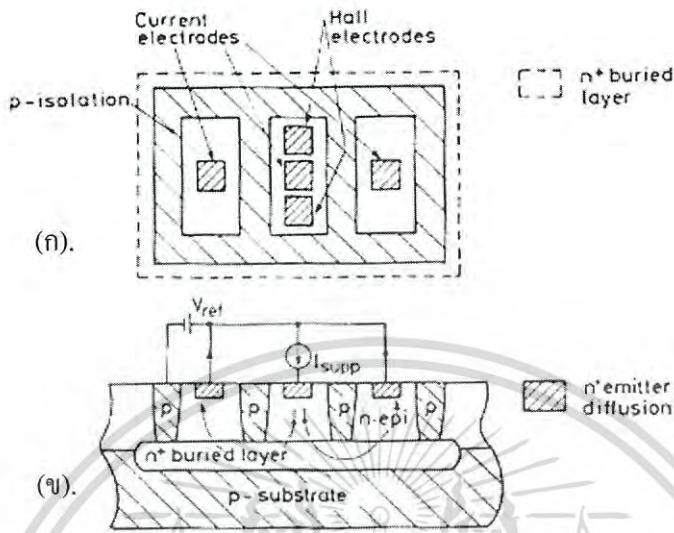
(ข). มุมมองด้านบน

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวตั้ง

สร้างด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ กระแสจะไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 และ 2 ขณะที่แรงดันฮอลล์ถูกวัดระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 3 และ 4 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนประมาณ  $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  และมีความหนาแน่นอิพิทาเซียระหว่าง  $5 - 10 \mu\text{m}$  โดยที่ออกแบบมิติของเพลทประมาณ  $200 \times 200 \mu\text{m}$  สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นอิพิ (Epilayer) สามารถลดลงได้โดยใช้วิธีการยิงฝังประจุ (Ion implantation) ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ขนาดของแผ่นอุปกรณ์ฮอลล์มีความสม่ำเสมอได้ [4]

ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งแต่สามารถประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวอนได้โดยเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แนวอน โดยแสดงดังรูปที่ 2.7 (ก) และ 2.7 (ข) โดยที่โครงสร้างนี้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นพื้นฐานที่จะสร้างเข็มทิศแม่เหล็ก โดยพื้นที่ของอิเล็กโทรด

ออกแบบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และพาหะจะมีทิศทางการฉีดในลักษณะแนวตั้ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางขนานกับผิวของอุปกรณ์ [6]-[7]



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของฮอลล์เซ็นเซอร์แนวอน (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) ภาคตัดขวาง

### 2.2.2 แมกนีโตรริซิสเตอร์ (Magnetoresistor)

สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างของความต้านทานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแมกนีโตรริซิสเตอร์ อาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตรริซิสแตนส์ (magnetoresistance effect) ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ กระทำกับพาหะเกิดเป็นมุม  $\theta$  ทำให้พาหะเคลื่อนที่ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานมากขึ้น มุมการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนหาได้โดยสมการที่ และการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากมุมเบี่ยงเบน  $\theta$  หาได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\theta = \tan^{-1}(\mu \cdot B_z) \tag{2.7}$$

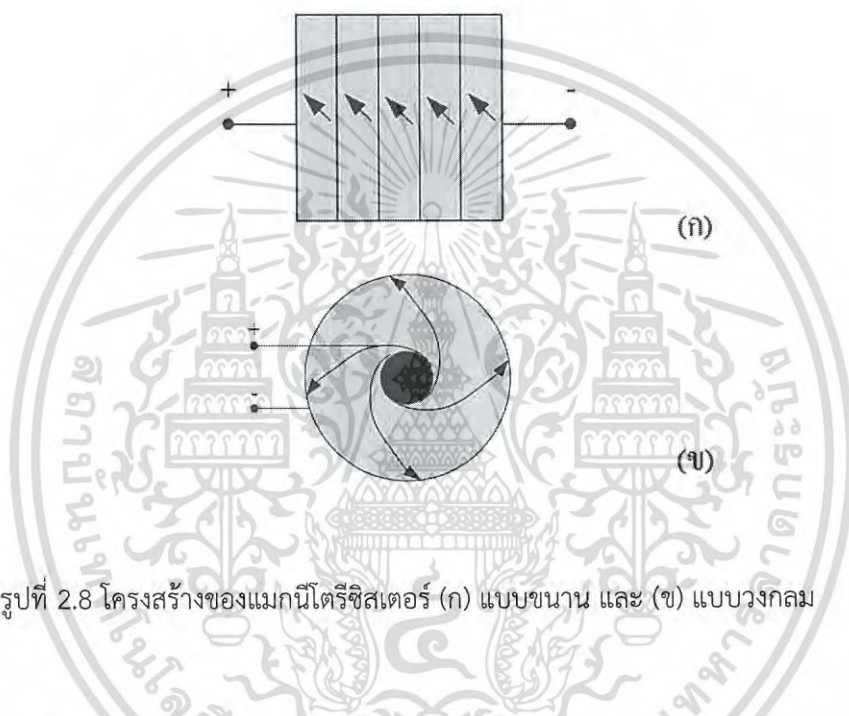
$$R(\theta) = R_0(1 + \tan^2 \theta) \rightarrow R(B_z) = R_0(1 + K_{ar} \cdot \mu^2 \cdot B_z^2) \tag{2.8}$$

โดยที่  $K_{ar}$  ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเพลทซึ่งในอุดมคติเพลทมีความกว้างมากกว่าความยาว

โดยปกติแล้วแมกนีโตรริซิสเตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ฮอลล์เพลทแบบขนาน (parallel Hall plates) และ แบบวงกลม (caibino disc) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดย รูปที่ 2.8 (ก) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรริซิสเตอร์ฮอลล์เพลทแบบขนานซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยความต้านทานที่เรียงต่อกันเป็นแผ่นขนาน โดยการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกับอุปกรณ์ฮอลล์คือ ใน

อุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะไม่อาศัยการเกิดขึ้นของแรงดันฮอลล์แต่จะอาศัยแรงลอเรนซ์กระทำกับประจุพาหะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้า

รูปที่ 2.8 (ข) แสดงโครงสร้างแมกนีโตรีซิสเตอร์แบบวงกลมซึ่งเป็นโครงสร้างที่แรงดันฮอลล์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กสามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นกับสภาพความคล่องตัวของวัสดุอีกด้วย โดยอุปกรณ์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีสภาพความคล่องตัวต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วอุปกรณ์แมกนีโตรีซิสเตอร์จะเลือกสารประกอบที่มีค่าสภาพความคล่องตัวสูงในการสร้าง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแมกนีโตรีซิสเตอร์ (ก) แบบขนาน และ (ข) แบบวงกลม

### 2.2.3 แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor)

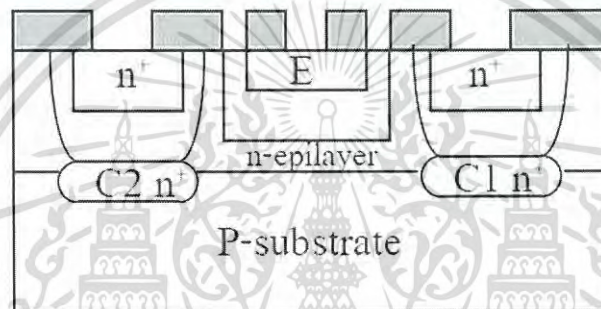
แมกนีโตทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้งโดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (vertical magnetotransistor) และแมกนีโตทรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ในแนวนอน (lateral magnetotransistor)

หลักการในการตรวจจับสนามแม่เหล็กอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง โดยกลไกใน

การเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ (Carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (Modulation current injection)

### แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง (Vertical magnetotransistor)

รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ที่พาหะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งโดยสร้างจากกระบวนการสร้างพื้นฐานของไบโพลาร์ โครงสร้างประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN สองตัวต่อกันด้วยอิมิตเตอร์ร่วมและเบสร่วม มีชั้นฝัง (buried layer) อยู่ใต้ส่วนเบส คอลเลคเตอร์ทั้งสองสร้างจากอะตอมสารเจือชนิด  $n^+$  เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจร จึงกำหนดให้มีช่องว่างระหว่างชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง



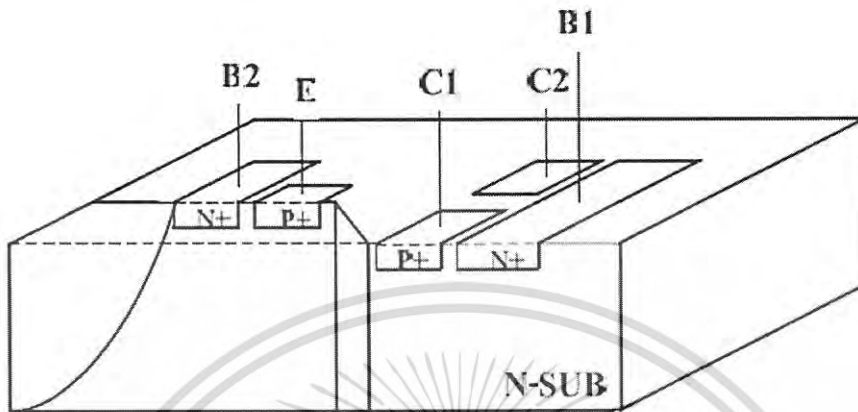
รูปที่ 2.9 ด้านตัดขวางโครงสร้างแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลแนวตั้ง

พาหะส่วนมากถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ผ่านส่วนเบสไปยังชั้นอีพิกของคอลเลคเตอร์ กระแสจะแยกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนจะไปถึงชั้นฝัง (buried layer) ทั้งสอง ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน อยู่ในสภาวะสมดุล  $I_{C1} = I_{C2} = I_{C0}$  โดยที่  $I_{C0}$  คือ ผลรวมกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสคอลเลคเตอร์ แรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะในเบสทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่สมดุลเกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง

### แมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอน (Lateral magnetotransistor)

โครงสร้างโดยทั่วไปของแมกนีโททรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวนอนแสดงดังรูปที่ 2.10 โดยการทำงานพาหะจะเคลื่อนที่จากอิมิตเตอร์ไปถึงคอลเลคเตอร์ที่แยกกันอยู่สองข้างอย่างสมมาตร โดยสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางแนวตั้งอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C$ ) กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ

(carrier deflection) และ กระแสการฉีดจากการมอดูเลท (modulation current injection) อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างแมกนีโตทรานซิสเตอร์แบบ pnp ชนิดกระแสไหลตามแนวอนประกอบด้วย อิมิตเตอร์ E, คอลเลคเตอร์ C1, C2 และสองขั้วเบสคอนแทค B1, B2

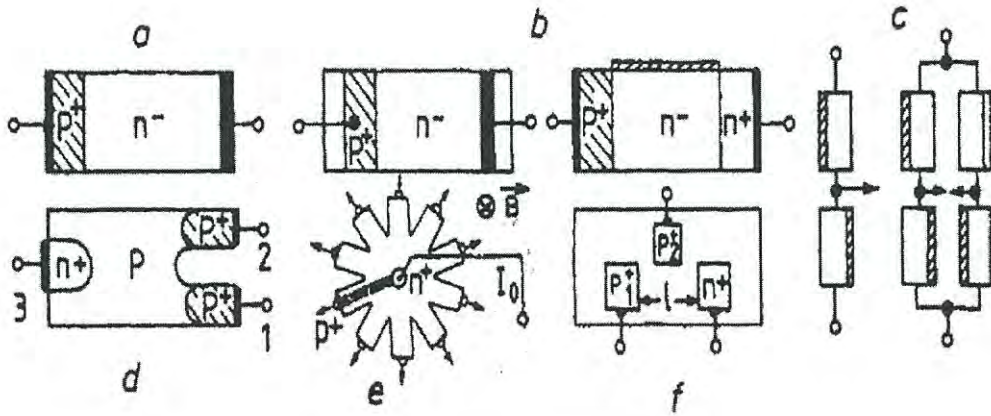


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ชนิดกระแสไหลตามแนวอน

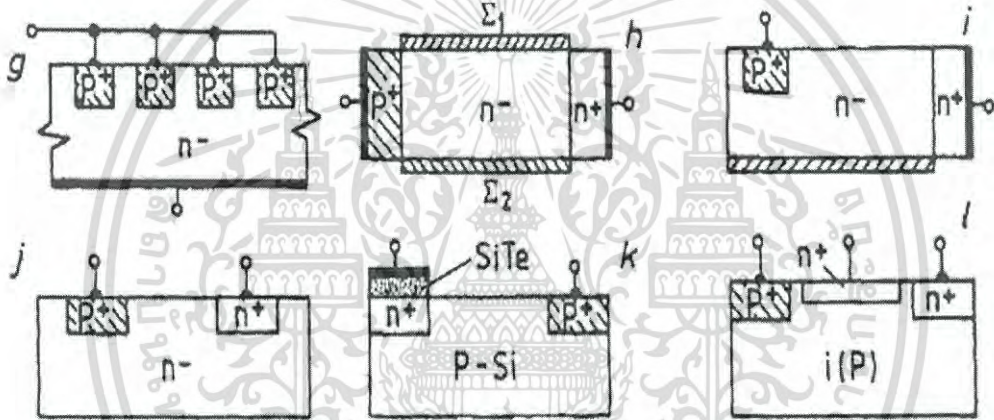
แมกนีโตทรานซิสเตอร์เมื่ออิมิตเตอร์และเบสไบอัสไปข้างหน้าพาหะส่วนมาก (majority carriers) จากอิมิตเตอร์ถูกฉีดเข้าไปในเบสข้ามเบสไปยังคอลเลคเตอร์ สนามไฟฟ้าในเบสช่วยพาหะในการเคลื่อนที่จากเบสไปยังคอลเลคเตอร์ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ความหนาแน่นของพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน กระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ( $\Delta I_C = 0$ ) นั่นคืออยู่ในภาวะสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.10 แต่เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำกับประจุพาหะ ทำให้พาหะส่วนน้อยในเบสเบี่ยงเบนความหนาแน่นของประจุพาหะที่คอลเลคเตอร์ทั้งสองไม่เท่ากัน เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ทั้งสอง ( $\Delta I_C \neq 0$ ) นั่นคือการเปลี่ยนแปลงจากภาวะสมดุลเป็นไม่สมดุล

#### 2.2.4 แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode)

แมกนีโตไดโอดเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ฮอลล์ที่รู้จักกันอย่างกว้างขวางและสามารถจำแนกออกเป็น ดังรูปที่ 2.11 เป็นโครงสร้างแมกนีโตไดโอดเซนเซอร์แบบตั้งฉาก (Orthogonal Magnetodiode) และ รูปที่ 2.12 เป็นโครงสร้างแมกนีโตไดโอดเซนเซอร์แบบขนาน (Parallel-Field Magnetodiode) ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกันไปดังรูป [1],[8]



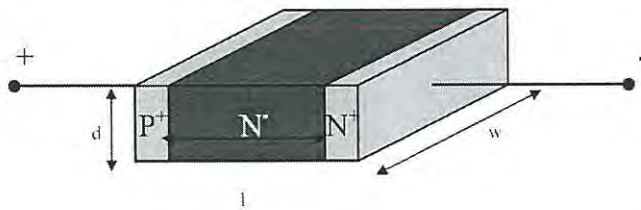
รูปที่ 2.11 แมกนีโตไดโอดเซนเซอร์แบบตั้งฉาก (Orthogonal Magnetodiode)



รูปที่ 2.12 แมกนีโตไดโอดเซนเซอร์แบบขนาน (Parallel-Field Magnetodiode)

จากรูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดเซนเซอร์ โดยที่โครงสร้างจะประกอบไปด้วย  $n^+$  และ  $p^+$  มีส่วน intrinsic อยู่ตรงส่วนกลางโดยที่มีมิติความยาว ความกว้าง และความสูง ( $l \times w \times d$ ) แมกนีโตไดโอดอาศัยความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกันสองพื้นผิวและการ double injection ของพาหะ และพาหะจะถูกแรงลอเรนซ์ผลักไปที่ผิวทั้งสอง ทำให้เกิด าระดับความเข้มข้นของพาหะ (gradient concentration) ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้จะมีส่วนรวมที่ว่า modulation กับคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) รูปทรงและกระแสไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



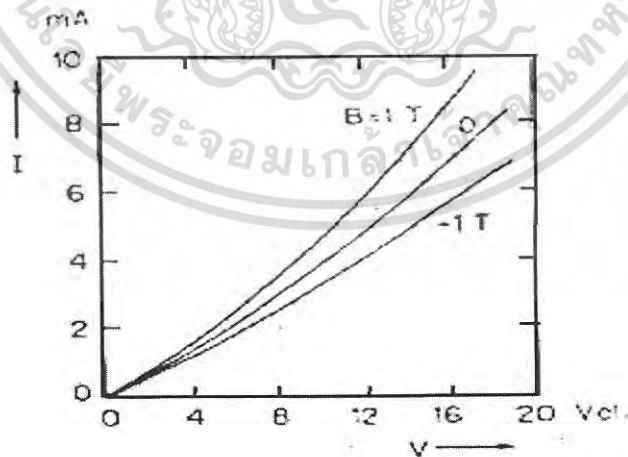
รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของแมกนีโตไดโอดเซนเซอร์

ความแตกต่างของอัตราการรวมตัวพาหะ (recombination) ถูกนำมาใช้ในการทำงานของแมกนีโตไดโอด โดยการใช้รอยต่อ  $Si-Al_2O_3$  (high rate) และ  $Si-SiO_2$  (low rate) ที่ผิว เรียกว่า SOS (Silicon On Sapphire) เป็นโครงสร้าง แสดงในรูปที่ 2.13 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่กระแสดังกล่าวสามารถหาได้โดยสมการที่ (2.9)

$$S_{vf} = \frac{dV_f}{dB_z} = \frac{e(\mu_n + \mu_p)\tau_{eff}(v_2 - v_1)}{8KTI} \cdot V_f^2 \quad (2.9)$$

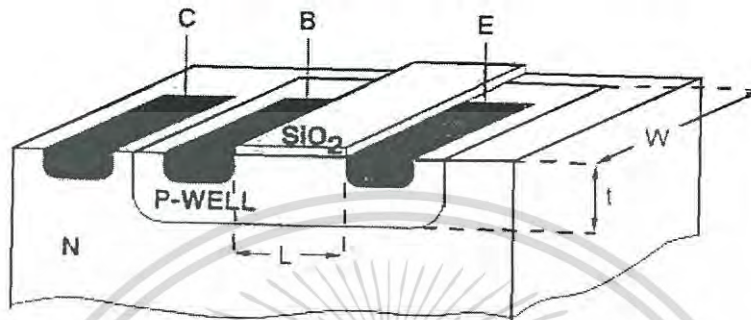
โดยที่  $l$  คือความยาวของซิลิคอนชนิดเอ็น,  $v_1$  และ  $v_2$  คืออัตราการรวมตัวของพาหะของพื้นผิวทั้งสองจะเห็นว่าอัตราการรวมตัวยิ่งแตกต่างกันมากเท่าไรจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ดี,  $\mu_p$  และ  $\mu_n$  คือสภาพความคล่องตัวของพาหะ และ  $\tau_{eff}$  คืออายุของพาหะ

คุณสมบัติกระแสและแรงดันของแมกนีโตไดโอดในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า เมื่อให้สนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.14 ทั้งโฮลและอิเล็กตรอนจะมีทิศทางไปยังรอยต่อ Si-sapphire เป็นสาเหตุให้กระแสลดลงที่แรงดันคงที่ ในทางตรงข้ามเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางตรงข้ามจะทำให้กระแสเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.14 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของ SOS แมกนีโตไดโอด

อย่างไรก็ตามแมกนีโตไดโอดก็ยังไม่เป็นที่นิยมเท่าอุปกรณ์ฮอลล์อื่นๆ เพราะอุปกรณ์ทำงานโดยใช้การรวมตัวของรอยต่อเป็นสำคัญทำให้การสร้างในแต่ละครั้งควบคุมคุณสมบัติให้เหมือนกันได้ยากและยังมีข้อเสียของ SOS แมกนีโตไดโอด เช่น ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กค่าสูงจะไม่เป็นเชิงเส้น และอุปกรณ์จะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นสำคัญ พื้นฐานของการใช้โครงสร้างแมกนีโตไดโอดสามารถสร้างได้โดยกระบวนการสร้างพื้นฐานวงจรรวม เช่น CMOS



รูปที่ 2.15 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ใช้เทคโนโลยีแบบ CMOS IC

จากรูปที่ 2.15 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ใช้เทคโนโลยีแบบ CMOS IC โดยใช้ p-well เป็นชั้นเบสที่มีขั้ว B ส่วนขั้ว E ใช้โครงสร้างของซอสหรือเดรน  $n^+$  ของมอสทรานซิสเตอร์ สำหรับรอยต่อระหว่าง  $SiO_2$  กับ p-well แทนรอยต่อที่มีอัตราการรวมตัวต่ำ ส่วนรอยต่อที่มีอัตราการรวมตัวสูงใช้รอยต่อระหว่าง p-well กับ n-substrate โดยรอยต่อนี้จะถูกไบอัสย้อนกลับ โครงสร้างนี้จะต้องมีพื้นที่เกตหรือ  $SiO_2$  ขนาดใหญ่กว่ามอสที่ใช้งานปกติมีค่าราว 100 ไมโครเมตร

### 2.3 คุณสมบัติของเซนเซอร์

ในการนำเอาเซนเซอร์มาใช้งานในระบบการวัดหรือระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ นั้นเราต้องคำนึงหลายด้าน เช่น ราคา ความเหมาะสม ประสิทธิภาพ รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างๆ เป็นต้น แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการเลือกพิจารณา คือ คุณสมบัติของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ควรมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสัญญาณหรือรูปแบบที่ต้องการนำไปใช้งานต่อนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบและคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ที่ใช้ นับเป็นปัจจัยประการแรกๆ ที่ควรทราบ และในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายถึงข้อกำหนดตลอดจนคุณสมบัติที่สำคัญประจำตัวเซนเซอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ความแม่นยำ (accuracy) เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าทางเอาท์พุทว่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากน้อยเพียงใด ในทางปฏิบัติ การวัดย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนในตัวอุปกรณ์ แต่จะมีค่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำของอุปกรณ์นั้น ซึ่งทั่วไปค่าความแม่นยำนี้อาจแสดงในเทอมของหน่วยในการวัด เช่น เทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งถูกกำหนดไว้ว่ามีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายความว่าหากนำเทอร์โมมิเตอร์ตัวนี้ไปทำการวัดอุณหภูมิแล้วแสดงค่าเท่ากับ  $20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  แสดงว่าขณะนี้อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดมีค่าอยู่ระหว่าง  $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  กับ  $20.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในบางครั้งค่าความแม่นยำนี้อาจใช้ไปถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของย่านการวัดของอุปกรณ์วัดตัวนั้นๆอีกด้วย

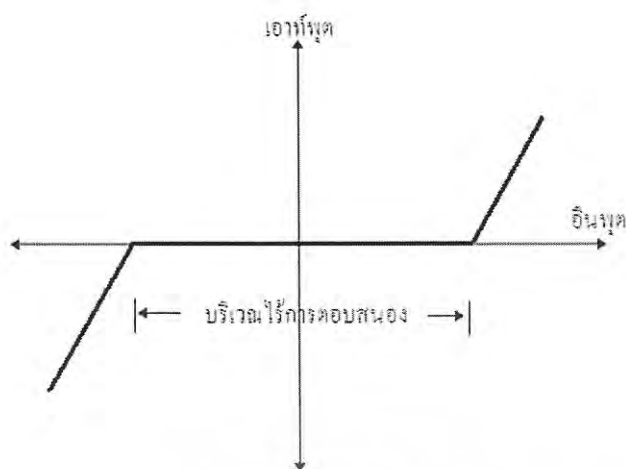
2.3.2 ความแน่นอน (precision) คือค่าบ่งชี้ถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการแสดงค่าเอาท์พุทเหมือนค่าเดิมทุกครั้งเมื่อทำการวัดสัญญาณอินพุทค่าเดิมซ้ำๆหลายๆครั้ง โดยทั่วไปมักเข้าใจสับสนว่า ความแน่นอนกับความแม่นยำคือข้อเดียวกัน แต่ในระบบการวัดแล้วจะมีความหมายที่ต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ เซนเซอร์ตัวใดที่มีค่าความแม่นยำสูง หมายความว่า เซนเซอร์ตัวนั้นสามารถแสดงค่าทางเอาท์พุทได้เหมือนค่าเดิมทุกครั้งในการที่มีอินพุทซ้ำค่าเดิม แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าเซนเซอร์ตัวนี้มีค่าความแม่นยำสูง หากค่าที่ได้จากเอาท์พุทของเซนเซอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนแตกต่างจากค่าที่เป็นจริง

2.3.3 ความคลาดเคลื่อน (error) คือผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริงโดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ และยังเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแม่นยำของระบบการวัดนั้นอีกด้วย

2.3.4 การปรับเทียบ (calibration) หมายถึงการเปรียบเทียบหน่วยของสกุลในการแสดงผลของเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ตรวจสอบความเร็วรถยนต์บางชนิดที่ให้เอาท์พุทออกมาอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าแปรผันตรงกับความเร็วรถยนต์ จากนั้นเข็มชี้ของมิเตอร์วัดความเร็วจะแสดงผลโดยการเบี่ยงเบนเป็นสัดส่วนไปตามแรงดันไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการอ่านค่าที่ได้จากหน่วยของปริมาณหนึ่งมาเป็นอีกหน่วยของปริมาณหนึ่งโดยการเปรียบเทียบแบบนี้ จึงเรียกว่า การปรับเทียบ

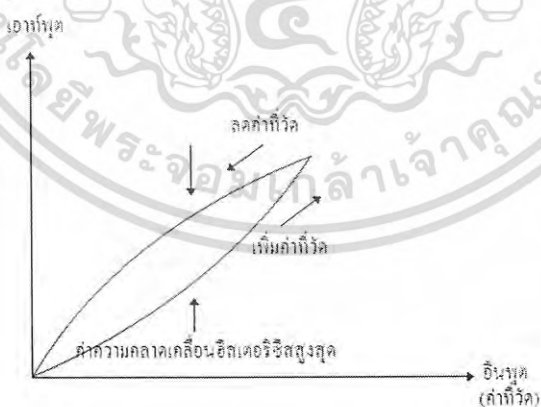
2.3.5 ขนาด (dimension) ขนาดของเซนเซอร์เป็นขนาดทางกายภาพ คือ กว้าง×ยาว×สูง ที่ประจำตัวของเซนเซอร์นั้นๆ

2.3.6 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone dead หรือ band) เป็นข้อกำหนดที่แสดงถึงขนาดสูงสุดของปริมาณที่ทำการวัดทางอินพุท โดยไม่ทำให้สัญญาณทางเอาท์พุทมีการเปลี่ยนแปลงหรือขนาดอินพุทสูงสุดที่ยังคงทำให้เอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงได้ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.16 สาเหตุที่ทำให้เกิดบริเวณไร้การตอบสนองนี้มาจากผลของแรงเสียดทานสถิตหรือเนื่องจากคุณสมบัติฮีตเตอร์ซิส



รูปที่ 2.16 บริเวณไร้การตอบสนอง (dead zone)

2.3.7 ดริฟท์ (drift) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซนเซอร์ วงจร หรือระบบ เมื่อเวลาในการใช้งานหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ คุณสมบัติดริฟท์นี้ทำให้สัญญาณเอาท์พุทเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงแม้ว่าอินพุทของระบบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงก็ตาม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของอุปกรณ์นั้นด้วย อุณหภูมิรอบข้างในการใช้งานเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดผลของการดริฟท์ขึ้นซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเซนเซอร์ ทำให้ระบบของการวัดมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป



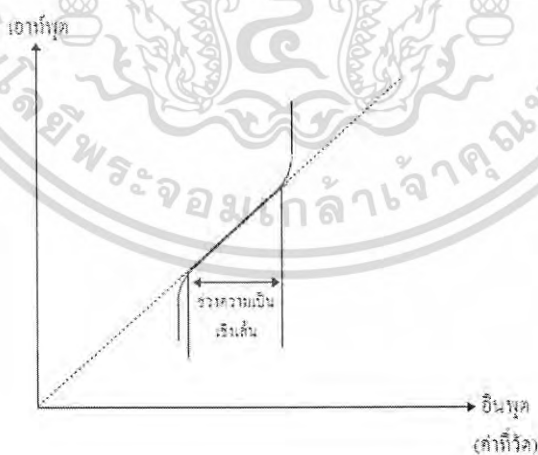
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากคุณสมบัติของฮิสเตอรีซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 ฮิสเทอรีซิส (hysteresis) เกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์เมื่อทำการตรวจวัดปริมาณฟิสิกส์ทางอินพุต โดยการปรับค่าจากน้อยไปมาก และปรับค่าลดลงจากมากไปน้อย คุณสมบัติฮิสเทอรีซิสนี้ก่อให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบอุปกรณ์ด้วย กราฟคุณสมบัติของฮิสเทอรีซิสดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 ปริมาณอินพุตของเซนเซอร์ซึ่งเป็นค่าที่ทำการวัดหรือต้องการตรวจสอบจะถูกปรับค่าให้มีมากขึ้นจนกระทั่งถึงย่านในการวัดสูงสุดในทางกลับกันก็ทำการปรับค่าให้ลดลงจนกระทั่งถึงย่านในการวัดต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งพบว่าเกิดผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ โดยจะเรียกค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฮิสเทอรีซิส

2.3.9 การหน่วงสัญญาณ (lag) คือการล่าช้าของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตที่ทำการวัด ทั่วไปมีหน่วยเป็นวินาที (second) หรือเศษส่วนของวินาที ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น ในงานระบบควบคุมกระบวนการ การหน่วงสัญญาณเป็นข้อกำหนดสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากมีผลต่อสมรรถนะของระบบเป็นอย่างมาก

2.3.10 ความเป็นเชิงเส้น (linearity) คุณสมบัติของความเป็นเชิงเส้น คือ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น หรือมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 2.18 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นยังแสดงถึงช่วงสูงสุดที่กราฟคุณสมบัติยังคงเป็นเชิงเส้นอยู่ หรือเรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า ช่วงปฏิบัติงาน (operating range) ของเซนเซอร์ โดยทั่วไปนิยมบอกในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ โดยวิธีในการวัดความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟสามารถวัดได้หลายวิธี โดยที่วัดจากค่าความแตกต่างสูงสุดของค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างกราฟจากการประมาณค่ากับกราฟจากการทดลองจริง

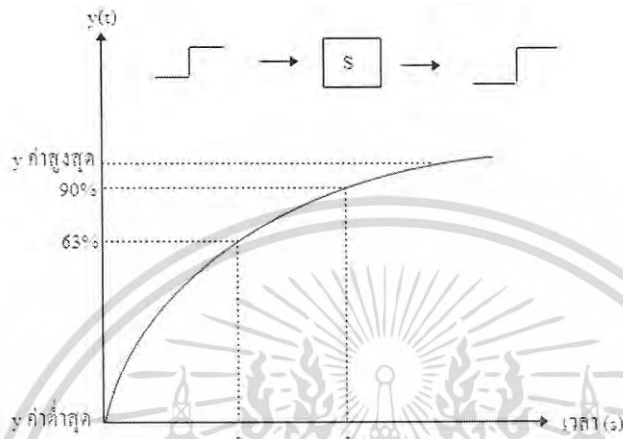


รูปที่ 2.18 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.11 ผลตอบสนอง (response) คือช่วงเวลาที่อุปกรณ์ใช้ในการตอบสนองสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับค่าเอาต์พุตสุดท้าย มีหน่วยเป็นวินาที หรือเศษส่วนของวินาที หรือบางครั้งอาจบอกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ของค่าเอาต์พุตสุดท้ายได้

2.3.12 ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response) เวลาที่ค่าเอาต์พุตเป็น 63% ของค่าสุดท้าย เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นแบบ step แสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความเร็วในการตอบสนอง

2.3.13 ความไว (sensitivity) คือความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตของอุปกรณ์เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอินพุต สำหรับค่าความไวของเซนเซอร์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตในย่านวัดที่กำหนดมาให้หารด้วยผลต่างของสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นปริมาณที่ทำการวัดหรือเขียนสมการได้ดังนี้

$$\text{ความไว} = (\text{ค่าเอาต์พุตสูงสุด} - \text{ค่าเอาต์พุตต่ำสุด}) / (\text{ค่าอินพุตสูงสุด} - \text{ค่าอินพุตต่ำสุด})$$

2.3.14 เสถียรภาพ (stability) บ่งชี้ให้เห็นสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์หรือระบบว่ามีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยแค่ไหนเมื่อป้อนอินพุตที่มีค่าคงที่เป็นเวลานานๆภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงมากนัก

2.3.15 ค่าเบี่ยงเบน (tolerance) บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำการวัด ในบางครั้ง ค่าความเบี่ยงเบนอาจใช้ในการแสดงถึงความแม่นยำของอุปกรณ์ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

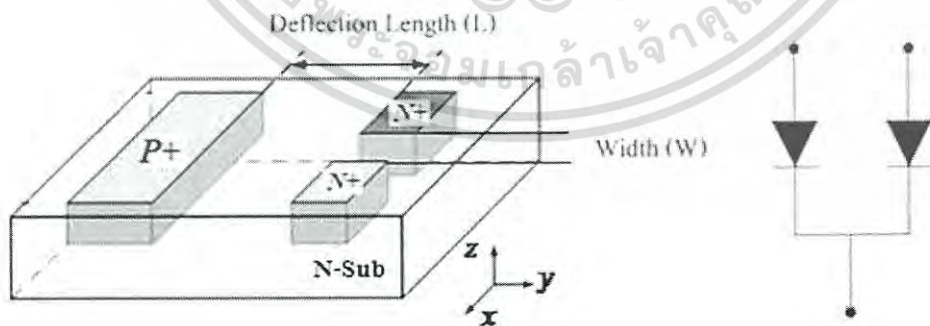
## โครงสร้างหลักการทำงานและการออกแบบของ แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

บทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างหลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ รวมทั้งการออกแบบ โดยที่แสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆของตัวอุปกรณ์มีทั้งการจัดเรียงตำแหน่งของขั้วอุปกรณ์ พื้นที่การเบี่ยงเบนและการฉีดพาหะ ผลของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งอธิบายการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

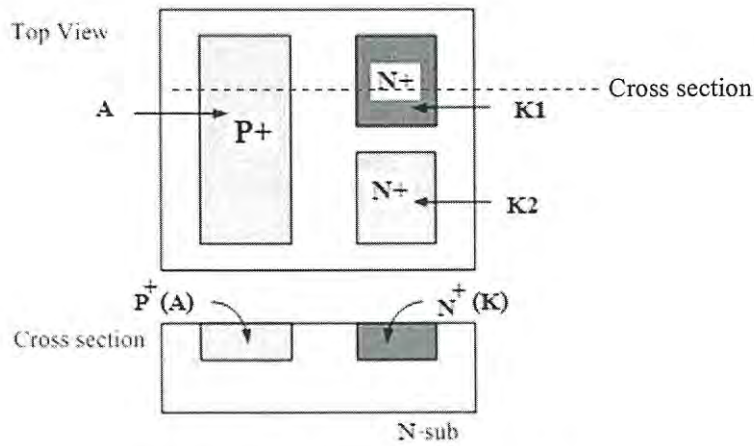
ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบใหม่ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบเก่าและยังมีหลักการทำงานที่มีความคล้ายกับหลักการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์ โดยที่แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่นี้ได้ทำการออกแบบค่าพารามิเตอร์เป็นสองส่วน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองการหาค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็กอีกด้วย

### 3.1 โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากดังแสดงใน รูปที่ 3.1 (ก) โดยรูปนี้เป็นภาพโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดกระแสไหลตามแนวนอน โดยมีขาสองขามีขนาดสมมาตรกันและแยกออกจากกันซึ่งสร้างจากสารชนิด  $N^+$  ซึ่งเป็นขาคะโทดซึ่งมีจุดประสงค์ทำให้เกิดรอยต่อแบบโอไมคคอลลแท็ค ( contact ) ส่วนอีกหนึ่งขาซึ่งสร้างจากสารชนิด  $P^+$  จุดประสงค์ให้เกิดรอยต่อ P-N ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น จากโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่สามารถดูจากวงจรเสมือนดังรูปที่ 3.1 (ก)



(ก) โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่และวงจรเสมือนแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่



(ข) แสดงภาพตัดขวางของแมกนีโตไดโอด

รูปที่ 3.1 แสดงภาพด้านมิติของแมกนีโตไดโอดตามลักษณะการออกแบบ

(ก) โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่และวงจรมีแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

(ข) แสดงภาพตัดขวางของแมกนีโตไดโอด

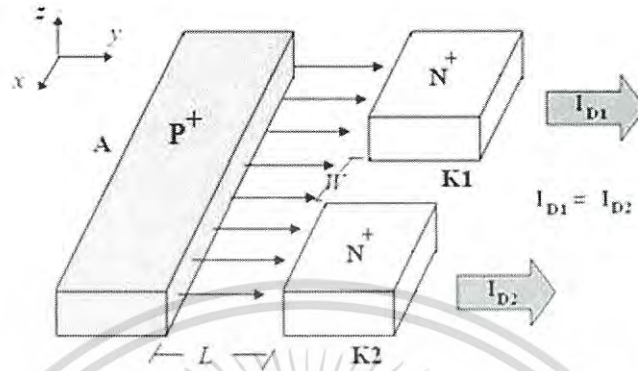
K1 และ K2 เป็นขั้วแคโทดของไดโอดทั้งสองตัวที่มีขนาดสมมาตรและแยกออกจากกัน ในขณะที่สภาวะปกติ (ไม่มีสนามแม่เหล็ก) กระแสที่ไหลผ่านชั้นสารทั้งสองมีปริมาณเท่ากัน เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส แรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำกับพาหะทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะเบี่ยงเบน ปริมาณของกระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองจะมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมากจะทำให้ปริมาณความแตกต่างกระแสระหว่างชั้นสาร  $N^+$  หรือขั้วแคโทดทั้งสองมีค่ามากขึ้นด้วยระยะห่างระหว่างชั้นสารทั้งสอง มีผลต่อการเบี่ยงเบนของพาหะด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าระยะห่างระหว่างชั้นสารทั้งสองมากจะต้องใช้ปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมาก ในการทำให้พาหะเบี่ยงเบน

ขั้ว (Pad) ขั้วอลูมิเนียมสำหรับใช้ในการวัดทดสอบอุปกรณ์ ออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อความคล่องตัวในการตรวจวัดทดสอบ เนื่องจากแมกนีโตไดโอดแบบคู่ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยการอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสของขั้วแคโทดของไดโอดทั้งสองตัว กลไกในการเกิดความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ และการแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) ซึ่งสามารถอธิบายกลไกหลักการทำงานเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบได้ดังนี้

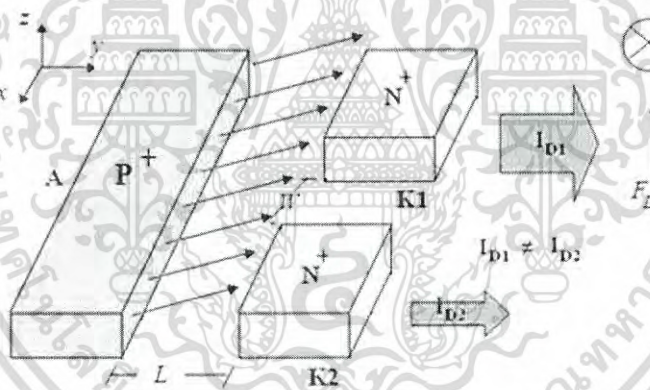
### 3.2 หลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่กับการเบี่ยงเบนของพาหะ

แมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสอง ( $\Delta I$ ) กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ ในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่

เคลื่อนที่จากแอนโอดไปแคโทดในระยะความยาว  $L$  แรงลอเรนซ์จะกระทำกับพาหะทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุม  $\theta$  ซึ่งระยะการเบี่ยงเบน  $W$  คือระยะระหว่างคือระหว่าง แคโทดทั้งสองรูปที่ 3.2 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านในระยะความยาว  $L$  โดย  $\theta$  คือมุมเบี่ยงเบนของพาหะและ  $W$  คือ ระยะการเบี่ยงเบนของพาหะ



(ก.) ทิศทางกระแสเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน



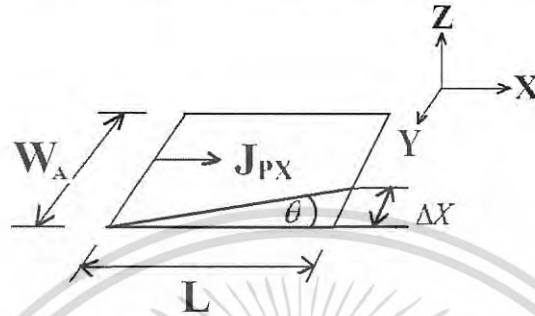
(ข.) ทิศทางกระแสเมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

รูปที่ 3.2 การเบี่ยงเบนพาหะ Hall โดย Lorentz force

จากรูปที่ 3.2 เป็นการเบี่ยงเบนพาหะโดยแรงลอเรนซ์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศทาง  $-Z$  จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ เคลื่อนที่ในทิศทาง  $-Y$  กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองนั้นจะเกิดความไม่สมดุลขึ้น ทำให้กระแส  $I_{D1}$  มีค่าความหนาแน่นมากกว่ากระแส  $I_{D2}$  ในทางกลับกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศ  $Z$  แรงลอเรนซ์ก็จะเคลื่อนที่ในทิศทาง  $Y$  เมื่อเกิดแรงลอเรนซ์จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส ความหนาแน่นของกระแส  $I_{D2}$  มีค่ามากกว่ากระแส  $I_{D1}$  เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเบี่ยงเบนพาหะโฮลของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่สามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.3 กระแสไดโอดที่เพิ่มขึ้นกับค่าความไวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการฉีดพาหะโฮลที่มีมากขึ้นที่กระแสสูงชันและเป็นสัดส่วนกับการเบี่ยงเบนพาหะโฮล แม้การฉีดพาหะจะมีทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า แต่จะมีพาหะโฮลเท่านั้นที่มีผลต่อเอาพุท อัตราส่วนของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถควบคุมได้จากความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและ ชนิดเอ็น พาหะโฮลที่ถูกฉีดจาก อาโนด ( $p^+$ ) ไปยังแคโทด ( $n$ ) มีค่าเบี่ยงเบนด้วยมุมหักเห  $\theta$  เนื่องจากแรงลอเลนซ์กับสนามแม่เหล็ก  $B_z$



รูปที่ 3.3 พื้นที่ของการเบี่ยงเบนพาหะ (Hole)

กระแสแอนโนด  $I_D$  คือผลรวมกันของกระแส  $I_{D1}$  และ  $I_{D2}$  สามารถแสดงในสมการที่ (3.1)

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (3.1)$$

กระแสแอนโนด  $I_D$  สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮลดังสมการที่ (3.1)

$$I_D = J_{px} \cdot W_A \cdot d \quad (3.2)$$

เมื่อ  $d$  คือความลึกรอยต่อแอนโนด  $p^+$ ,  $W$  คือความกว้างของแอนโนด มุมความแตกต่างสามารถเขียนสมการโดยใช้มุมรอลเลนซ์หรือมุมเบี่ยงเบน

$$\tan \theta = \mu_p B_z \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\mu_p$  คือ การเคลื่อนไหวของโฮล และ  $B_z$  คือความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก การขจัด  $\Delta x$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\Delta x = L \cdot \mu_p \cdot B_z \quad (3.4)$$

เมื่อ  $L$  คือความยาวระหว่างแคโทดทั้งสอง กระแสเอ้าท์พุทคือความแตกต่างของกระแสไดโอด ( $\Delta I_D$ ) จากสมการ (3.1) และ (3.2) กระแสเอ้าท์พุทสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot W_A \cdot L \tan \theta \quad (3.5)$$

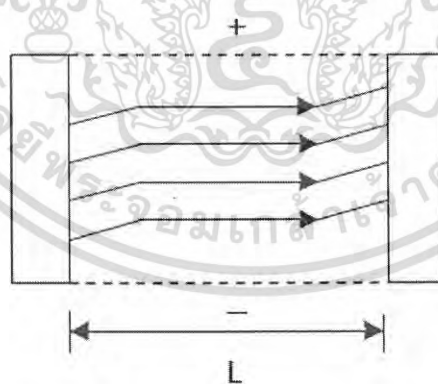
ความสัมพันธ์ของสมการความไวและความไวสัมบูรณ์สามารถเขียนแสดงได้ดังสมการ(3.6) และ (3.7) ตามลำดับ

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D B_z} \quad (3.6)$$

$$S_A = \frac{\Delta V_0}{\Delta B} \quad (3.7)$$

โดยที่  $V_0$  คือ ความต่างแรงดันเอ้าท์พุทเนื่องจากค่าความแตกต่างของกระแส  $\Delta I_D$  ที่เกิดการเบี่ยงเบนพาหะโดยตรง

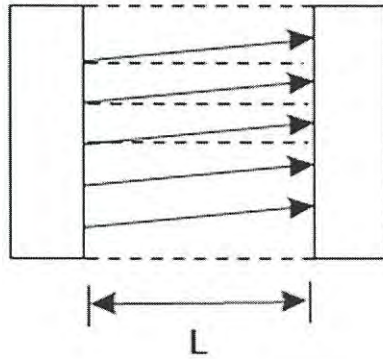
จากการวิเคราะห์ที่ในรูปที่ 3.4 สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบแมกนีโตไดโอดได้โดยในการออกแบบจะกำหนดระยะความยาว  $L$  เป็นระยะระหว่างแอโนดและแคโทดของแมกนีโตไดโอดสามขา โดยอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว  $L$  รูปที่ 3.4 แสดงการเหี้ยวเบนสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้ สมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์นั้น คือ กระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่ง ทิศทางกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีการเบี่ยงเบนเพราะสนามไฟฟ้าไม่สามารถเหี้ยวเบนได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.4 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอลล์

รูปที่ 3.5 แสดงการลดลงของความยาว  $L$  ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจนเนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหี้ยวเบนสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนได้อย่างชัดเจน ( $\Delta$ ) ซึ่งลักษณะของกระแสที่เบี่ยงเบนจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบแมกนีโตไดโอดนั้นคือ

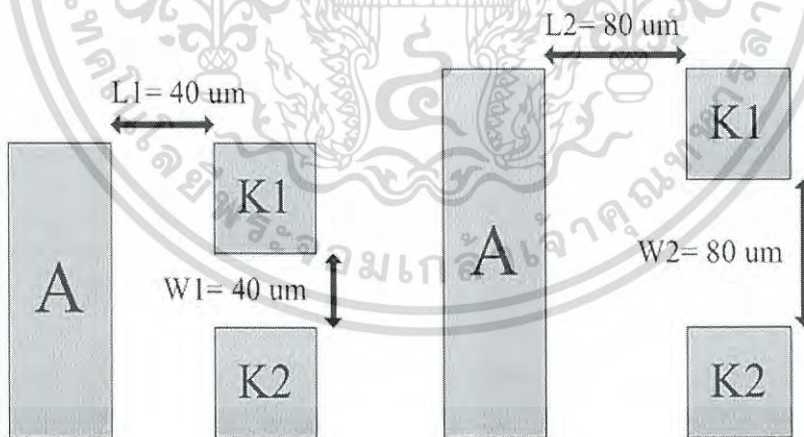
แสดงให้เห็นว่าระยะความยาว  $L$  ไม่สามารถที่จะออกแบบให้มีความกว้างมากได้



รูปที่ 3.5 การลดลงของความยาว  $L$  ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า

### 3.3 การออกแบบของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

การออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ในการสร้างจะมีค่าพารามิเตอร์อยู่สองโครงสร้างจากรูปโครงสร้างจะมีค่าความกว้าง ( $W$ ) คือค่าความกว้างระหว่างแคโทดทั้งสองจะออกแบบที่สองค่า  $W_1$  ที่  $40 \mu m$  และ  $W_2$  ที่  $80 \mu m$  ส่วนการออกแบบความยาว ( $L$ ) ระหว่างแอโนดกับแคโทดทั้งสองโดยที่มีค่าพารามิเตอร์คือ  $L_1$  ที่  $40 \mu m$  และ  $L_2$  ที่  $80 \mu m$  การออกแบบเช่นนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบผลของพารามิเตอร์ทั้งสองรูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างทั้งสองค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างทั้งสองค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 เป็นการออกแบบมาสก์โดยการใช้โปรแกรม COREL DRAW ออกแบบแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ เริ่มต้นด้วยการใช้แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ (100) ใช้กระบวนการ Oxidation ในการสร้างชั้นออกไซด์โดยใช้ขั้นตอนการสร้างแบบ Dry-Wet-Dry Oxidation ใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีในการเปิดช่องเพื่อทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเข้าไปเพื่อให้เกิดบริเวณเอ็นโดยการใช่มาสก์ที่ 1 ในการเปิดช่องครั้งที่สองเพื่อแพร่สารโบรอนโดยการใช่มาสก์ที่ 2 ซึ่งต่อด้วยเปิดมาสก์คอนแทคมาสก์ที่ 3 ใช้ในการเปิดช่องเพื่อสร้างขั้วคอนแทคสัมผัสอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพีที่ได้ทำการแพร่ไปก่อนแล้ว ส่วนมาสก์ที่ 4 ใช้สำหรับกระบวนการระเหยของอะลูมิเนียมเพื่อทำการสกัดเอาเฉพาะอะลูมิเนียมส่วนที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าส่วนหลักการทำงานประกอบไปด้วยหัวข้อด้านล่าง



รูปที่ 3.7 ชุดมาสก์ที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

## บทที่ 4

# เทคโนโลยีการสร้างและกระบวนการสร้าง

## แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

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



รูปที่ 4.1 แสดงลำดับขั้นตอนเทคโนโลยีการสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

### 4.1 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนที่ใช้ในการสร้างแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Initial Wafer) ที่ใช้ในการสร้างเป็นดังนี้

- แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100
- ค่าพิสัยความต้านทาน 3-6 โอห์ม-เซนติเมตร
- ขนาดความหนาของแผ่นผลึกประมาณ 400 um

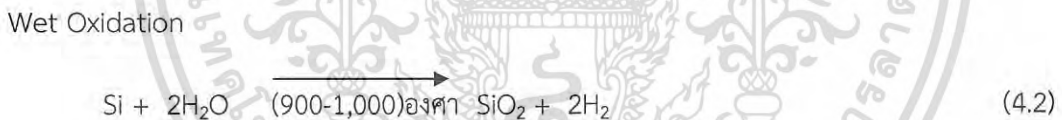
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ทำความสะอาดผิวหน้า (Wafer clean)

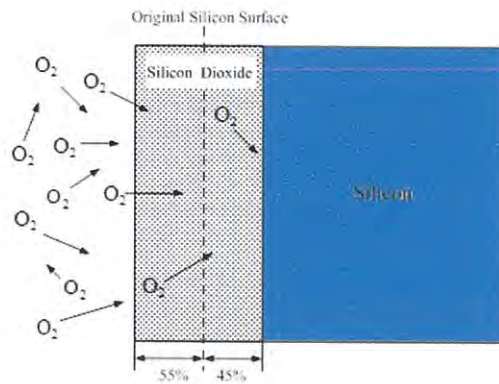
ก่อนที่จะเริ่มต้นกระบวนการใดๆ ที่เกี่ยวกับการสร้าง จำเป็นที่จะต้องมีการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียก่อน เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ เช่น คราบไขมันที่ติดมาหรือคราบฝุ่นละอองต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการทางเคมีในการกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ออกไป ซึ่งหลังจากที่ทำความสะอาดด้วยสารเคมีแล้ว ต่อจากนั้นจะนำไปล้างด้วยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงที่เรียกว่าน้ำ ดีไอ (DI, deionized) เพื่อทำการล้างสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดผิวหน้าออกไป และขั้นตอนสุดท้ายนำไปสปินให้แห้ง

#### 4.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Process)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นกระบวนการทางความร้อน (Thermal process) ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการสร้างอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ โดยเป็นกระบวนการของการสร้างชั้นออกไซด์ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ซึ่งอาจเป็นออกซิเจนบริสุทธิ์หรือออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) กับซิลิคอน (Si) เกิดเป็นสารประกอบ ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) แสดงดังสมการดังนี้



เริ่มต้นด้วยการที่ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนที่ผิวเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งจะปกคลุมอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) อย่างหนาแน่น โดยชั้นออกไซด์ที่ผิวจะทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้โมเลกุลของออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนส่วนที่อยู่ลึกลงไปได้ อย่างไรก็ตาม อาจมีออกซิเจนบางส่วนที่สามารถแพร่ข้ามชั้นออกไซด์ที่ผิวเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนได้ ดังรูปที่ 4.2 ชั้นออกไซด์จะมีความหนาเพิ่มขึ้นและทำหน้าที่ป้องกันหรือลดการแพร่ของออกซิเจนให้ลดลง โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ขยายออกจากผิวหน้าเดิมของแผ่นเวเฟอร์ซึ่งมีความหนาประมาณ 55% และส่วนที่เกิดลึกลงไปในเนื้อซิลิคอน ซึ่งมีความหนาประมาณ 45% จากผิวเดิมของแผ่นเวเฟอร์

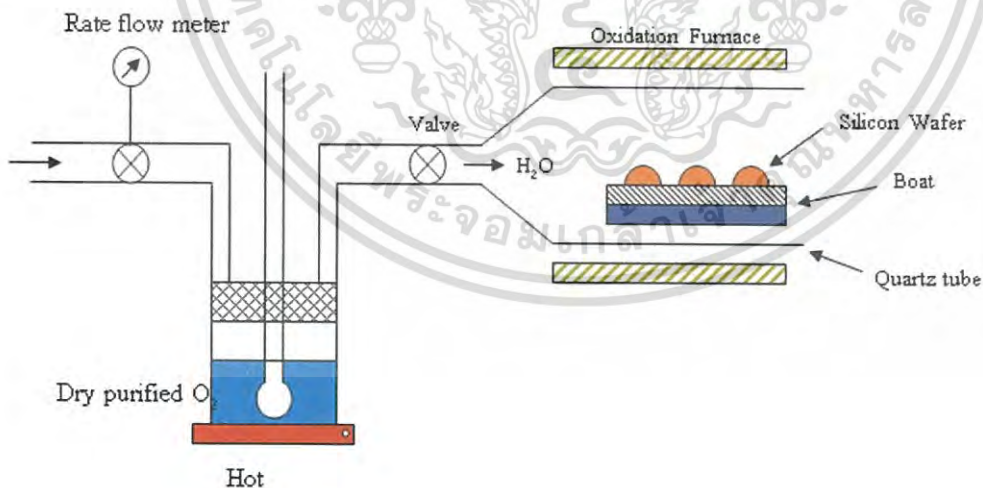


รูปที่ 4.2 กระบวนการเกิดชั้นออกไซด์บนผิวของแผ่นซิลิคอน

จากกลไกของการเกิดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน เกิดเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีกันระหว่าง โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนกับซิลิคอนดั้งที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยกระบวนการในการสร้างชั้นออกไซด์นี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

#### 4.3.1 การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)

จากรูปที่ 4.3 เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ การเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่า Dry Oxidation เนื่องจากโมเลกุลเองดั้งที่ได้กล่าว แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือ คุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของอะตอมของสารเจือปนน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุน ซึ่งเป็นผลมาจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ



รูปที่ 4.3 กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น

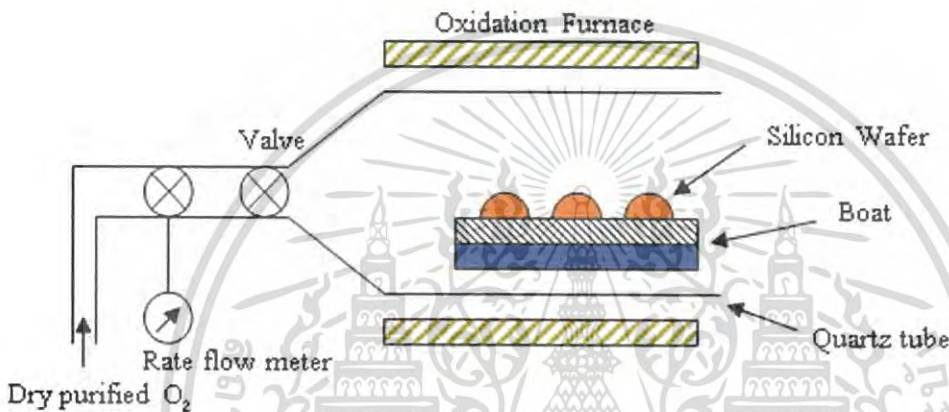
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation )

จากรูปที่ 4.4 เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูง พื้นผิวที่ได้ค่อนข้างเรียกว่า ฟิล์มของ Wet Oxidation แต่ ปฏิกิริยาเกิดช้าและอัตราการเกิดต่ำกว่าแต่เกิดออกไซด์ได้ช้ากว่า แสดงดังรูปที่ 4.4

**ข้อดี** การสร้างชั้นซิลิคอนด้วยชั้นออกไซด์ด้วยวิธีนี้ จะให้ชั้นออกไซด์ที่มีความเป็นฉนวนสูงและมีคุณภาพดี เพราะมีความหนาแน่นสูง ทำให้สามารถสร้างเป็น Gate Oxide

**ข้อเสีย** เนื่องจากขั้นตอนนี้ใช้ก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดการรวมตัวกับซิลิคอนได้ยากกว่าแบบ Wet ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นั้น จะต้องใช้เวลานานในการสร้าง จึงสร้างชั้นออกไซด์หนาได้ยาก



รูปที่ 4.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง

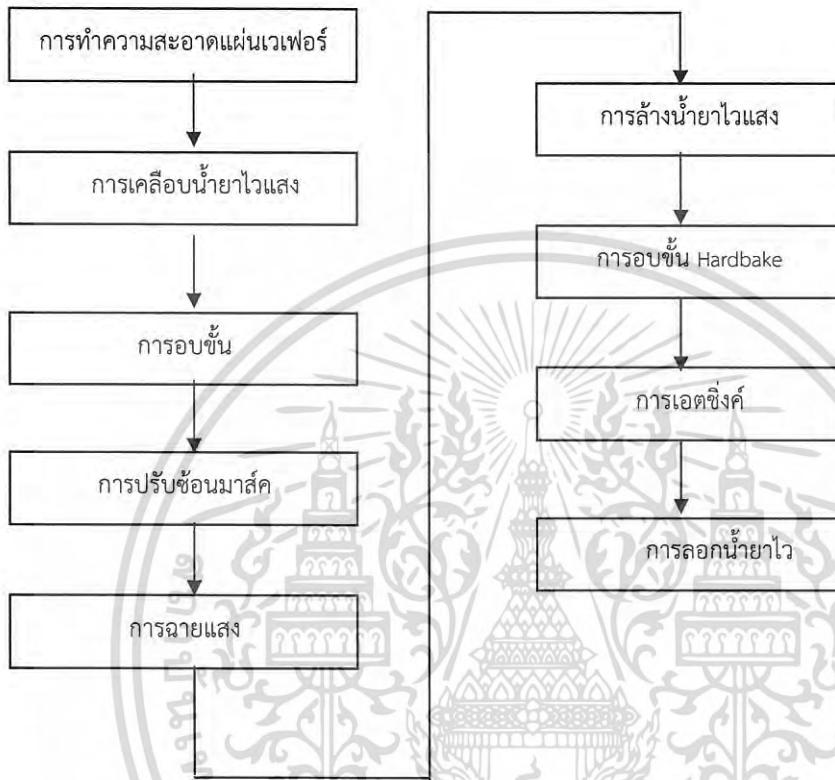
### 4.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นกระบวนการของการถ่ายแบบ (Patterning) จากมาสก์ (mask) หรือ เรติเคิล (reticle) จากการออกแบบ ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเมื่อฉายแสงลงบนผิวของแผ่นเวเฟอร์ จะทำให้เกิดลวดลายต่างๆ ตามที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเริ่มแรกถูกใช้ในอุตสาหกรรมทางการผลิตแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) ต่อมาถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตทรานซิสเตอร์และแผ่นวงจรรวม (Integrated circuit) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีถือเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิต IC โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างลวดลายต่างๆ ลงบนแผ่นเวเฟอร์ ก่อนทำการกัด (etching), การยิงฝังประจุ (ion implantation) หรือการแพร่สารเจือ (Diffusion) เพื่อทำเป็นขั้วต่างๆ ต่อไป

โดยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือเริ่มต้นจากการทำความสะอาดผิวของแผ่นเวเฟอร์ (Wafer clean) เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ออกจากผิวหน้า ต่อมาเป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมผิวหน้า (Preparation) เพื่อกำจัดความชื้นออกไป หลังจากนั้นจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist coating) และทำการอบ (soft bake) เพื่อให้หน้ายาไวแสงติดกับแผ่นเวเฟอร์ได้ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นกระบวนการฉายแสง ซึ่งเป็นการถ่ายแบบจากมาสก์ไปยังน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนแผ่นเวเฟอร์ และขั้นตอนสุดท้ายจะทำการอบอีกรอบหนึ่ง หลังจากนั้นจะส่งต่อไปยังขั้นตอนของการกัด หรือกระบวนการยิงฝังประจุต่อไป กระบวนการ Photolithography Process จะมีขั้นตอนพื้นฐานต่างดังรูปที่ 4.5 ดังนี้



รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนกระบวนการ Photolithography Process

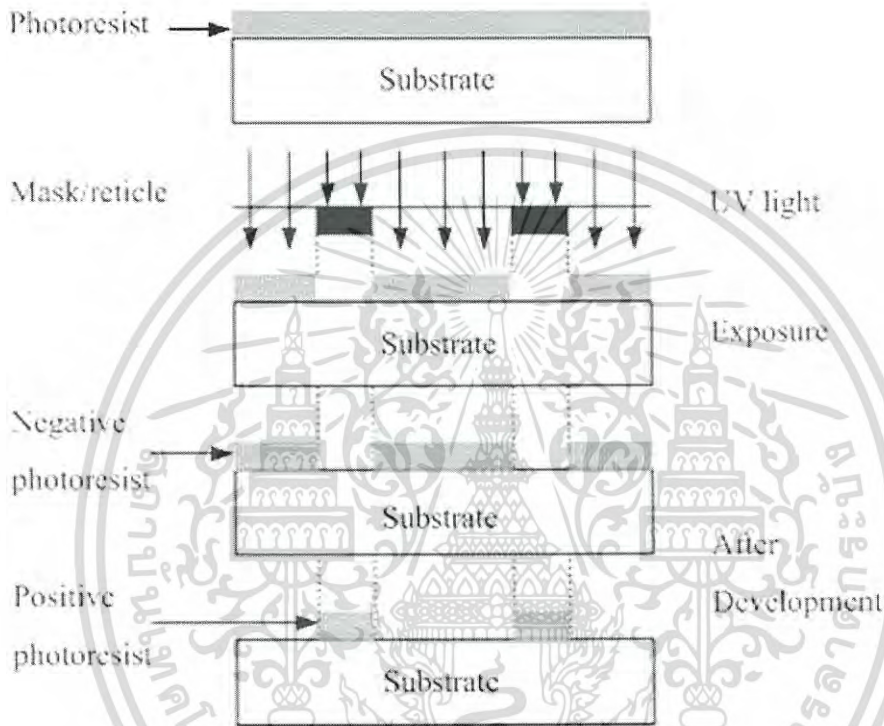
#### 4.4.1 การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Cleaning)

ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ด้วยสารเคมีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนผิวเวเฟอร์ เช่น โลหะ ฝุ่นละออง สารอินทรีย์หรืออไอออนต่างๆ สิ่งสำคัญของกระบวนการ Photolithography สารละลายที่สำคัญมากและใช้บ่อยที่สุดก็คือ น้ำ DI (deionized) ซึ่งเป็นน้ำที่ทำให้บริสุทธิ์และผ่านตัวกรองหรือฟิลเตอร์เพื่อกรองฝุ่นละออง อนุภาคและสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำ DI เป็นน้ำที่มีความต้านทานสูงมาก

#### 4.4.2 การเคลือบสารไวแสง (Photoresist coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงเป็นขั้นตอนการเคลือบชั้นฟิล์มบางของน้ำยาไวแสงที่ผิวด้านบนของแผ่นเวเฟอร์ โดยน้ำยาไวแสงจะมีด้วยกันสองแบบคือ แบบ Positive และแบบ Negative ซึ่งมีวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน ในขณะที่กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสงก็จะมีด้วยกันหลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน สารไวแสงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

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



รูปที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติทางแสงที่แตกต่างกันของน้ำยาไวแสงสองชนิด

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

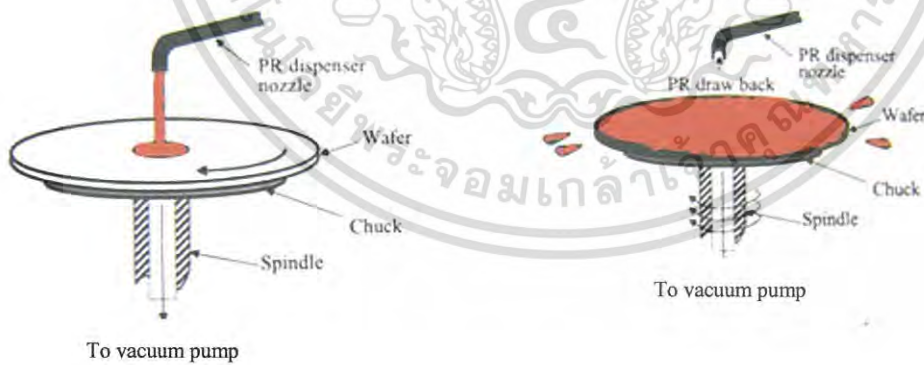
สิ่งสำคัญก่อนเคลือบสารไวแสงคือแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดผิวหน้าและสร้างชั้นออกไซด์แล้ว อบในตู้ประมาณ 30-60 นาที เพื่อเป็นการไล่ความชื้นที่ผิวหน้า เพราะถ้ามีความชื้นจะทำให้สารไวแสงหลุดออกได้ง่าย

#### 4.4.3 วิธีการเคลือบ (Coating)

การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกหรือแผ่นเวเฟอร์ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ หรือชั้นวัสดุ อื่น ๆ อยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมหรือประเภทของงานที่ใช้ ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้

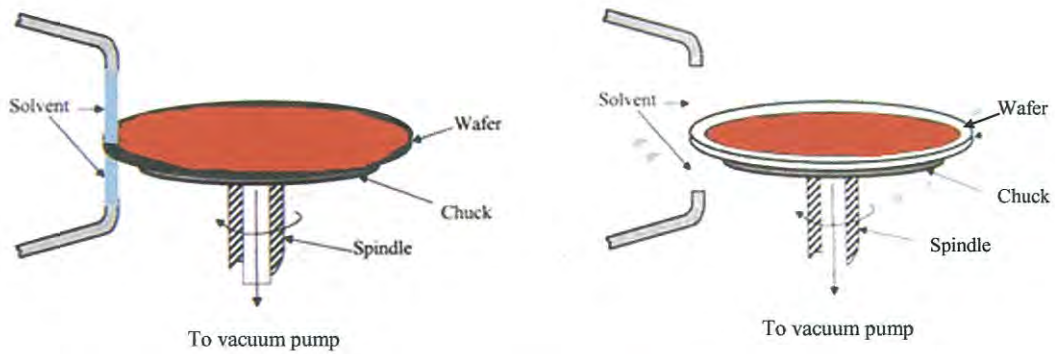
##### ■ แบบสปินเนอร์ (Spinner coating)

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



รูปที่ 4.7 การเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยวิธีการสปินเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การลอกฟิล์มที่ขอบของแผ่นผลึกหลังจากการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยการสปินเนอร์

#### ■ แบบสเปรย์ (Spray coating)

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

#### ■ แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller coating)

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

#### 4.4.4 การอบขึ้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

#### 4.4.5 การปรับชิ้นมาส์ค (Mask Alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโตมาส์ค โดยการนำกระจกโฟโตมาส์ควางทับบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็กระจกโฟโตมาส์คชั้นแรกสามารถทำได้โดยไม่มีการปรับชิ้นมาส์ค ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวมบนแผ่นผลึกเลยแต่ในกรณีที่แผ่นผลึกนั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไป จำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

ดังนั้นการใช้กระจกมาส์คตั้งแต่มาส์ค 2 เป็นต้นไปก่อนที่จะฉายแสงจำเป็นต้องมีการปรับชิ้นมาส์คเพื่อให้ลวดลายบนกระจกมาส์คซ้อนทับกับลวดลายที่อยู่บนแผ่นผลึกอย่างถูกต้อง ซึ่งทำให้ขบวนการโฟโตกราฟิสามารถเปิดชั้นออกไซด์ได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมากดังนั้นการปรับชิ้นจึงใช้อุปกรณ์ช่วยเรียกว่า ตัวปรับชิ้นมาส์ค ซึ่งอาศัยหลักการง่าย ๆ คือ นำแผ่นผลึกวางและติดกับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับเลื่อนได้ในแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงนอกจากนี้ยังปรับหมุนแผ่นผลึกได้โดยรอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ส่วนกระจกโฟโตมาส์คจะถูกยึดให้อยู่เหนือน้ำยาไวแสงเล็กน้อย และด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึกและบนแผ่นโฟโตมาส์คพร้อมกับทำการปรับแผ่นเลื่อนแนวนอน แนวตั้งฉากและแนวสูงจนกระทั่งภาพลวดลายที่บนแผ่นผลึกและบนโฟโตมาส์คซ้อนทับกันตรงตำแหน่งที่ถูกต้องจากนั้นทำการปรับแผ่นผลึกเลื่อนขึ้นในแนวสูงจนแนบสนิทกับกระจกมาส์คดังนั้นเราก็จะได้ตำแหน่งที่ถูกต้องเพื่อเตรียมขั้นตอนการฉายแสงต่อไป

#### 4.4.6 การฉายแสง (Exposure)

การฉายแสง (Exposure) คือขั้นตอนที่ต่อจากการปรับชิ้นมาส์ค (Aligment) วิธีการก็คือการใช้แหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงย่านอุลตราไวโอเล็ตเอ็กโพสหรือฉายผ่านลวดลายฟิล์มโลหะบนกระจกมาส์คที่ทำการอัลไลน์กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่ด้านบนมีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่แสงจะผ่านลวดลายหรือไม่ผ่านลวดลายฟิล์มโลหะด้านบนจะเป็นตัวบังแสงไว้ส่วนที่ผ่านได้จะทำปฏิกิริยากับน้ำยาไวแสงหรือโฟโตริซิซบนผิวซิลิคอน การเอ็กโพสหรือฉายแสงจะใช้เวลาช่วงหนึ่งพอให้แสงทำปฏิกิริยากับโฟโตริซิซอย่างสมบูรณ์

#### 4.4.7 การล้างน้ำยาไวแสง (Development)

Development เป็นการสร้างลวดลายบนสารไวแสงที่ผ่านการฉายแสงด้วยน้ำยา Developer โดยสารไวแสงแบบบวกเมื่อทำการ Develop ส่วนที่ถูกแสงจะละลายออกไป ส่วนสารไวแสงแบบลบส่วนที่ถูกแสงจะยังคงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.8 การอบขึ้น Hardbake

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

#### 4.4.9 การกัด (Etching)

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

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

#### 4.4.10 การลอกน้ำยาไวแสง

การลอกน้ำยาไวแสงออกจากแผ่นผลึกเป็นขั้นตอนต่อจากการ Etching โดยการจุ่มแผ่นผลึกลงไปในน้ำยาลอกฟิล์ม อาจเป็นสารเคมีหรือใช้พลาสมาเพื่อทำให้ผิวผลึกสะอาดเตรียมนำไปแพร์สารเจือได้ ซึ่งถ้าบนผิวหน้าของซิลิคอนมีความสกปรกจะมีผลอย่างมากต่อการแพร์สารเจือ

เมื่อลอกชั้นไวแสงออกแล้ว นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ (microscope) เพื่อดูว่ามีสารกัดเซาะด้านข้างหรือเปล่า ซึ่งเป็นผลมาจากชั้นฟิล์มที่ติดไม่แน่นหรือเกิดการกัดที่มากเกินไปถ้าเสียหายมากอาจต้องกลับไปเริ่มทำใหม่

### 4.5 กระบวนการแพร์สารเจือ (Deposition)

กระบวนการแพร์สารเจือเป็นการแพร์สารเจือลงในแผ่นซิลิคอนด้วยวิธีการแพร์ด้วยอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (Source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรองและถ้าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงกว่าแผ่นฐานรองทำให้เกิดรอยต่อ พี-เอ็น ขึ้น

ขั้นตอนการแพร์สารเจือทำได้โดยกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งเป็นแหล่งเจือโบรอน (Boron Source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และฟอสฟอรัสใช้สร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปในบรรยากาศของสารเจือทำให้อะตอมของสารเจือเคลื่อนที่เข้าไปยังฐานรองความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิตลอดจนระยะเวลาในการแพร์ที่มีผลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร์ ในขบวนการแพร์สารเจือแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การแพร์สารเจือขั้นต้น (Pre-deposition) และการขับลึก (Drive-in)

#### 4.5.1 การแพร่สารเจือชนิดพี

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

เทคนิคการแพร่สารเจือโดยใช้โบรอนอาจสามารถทำได้ 3 แบบคือ อะตอมของโบรอนสามารถสังเคราะห์มาได้จากสารประกอบ 3 ชนิดในสถานะของแข็งคือโบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) หรือในสถานะของเหลวคือ โบรอนไตรโบไรด์ ( $\text{BBr}_3$ ) และในสถานะของก๊าซคือ โบรอนไตรคลอไรด์ ( $\text{BCl}_3$ ) ซึ่งไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดใดก็ตาม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนจะเป็นปฏิกิริยาระหว่างโบรอนไตรออกไซด์และซิลิคอน ทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมโบรอนออกมาจาก  $\text{B}_2\text{O}_3$  ที่ผิวของซิลิคอน โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ดังนี้คือ



จากนั้นโบรอนจะแพร่เข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอน แต่ในงานทางด้านอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนิยมใช้สารประกอบ โบรอนไนไตรด์ (BN) เป็นต้นกำเนิดของโบรอน เนื่องจากมีความสะดวกในการแพร่มากที่สุด โดยที่สารประกอบโบรอนไนไตรด์ที่เป็นของแข็งจะทำให้อยู่ในลักษณะเป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นผลึกซิลิคอนก่อนทำการแพร่แผ่นโบรอนไนไตรด์จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ คือจะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้บริเวณผิวของแผ่นโบรอนไน

ไตรด์กลายเป็นโบรอนไตรออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) เสียก่อนซึ่งเรียกว่าการ Activate จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกซิลิคอนมาวางใกล้ๆ กับแผ่นโบรอนไนไตรด์นี้แล้วจึงทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว 1100 °C (ในสถานะของก๊าซไนโตรเจน)

#### 4.5.2 การแพร่สารเจือชนิดเอ็น

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



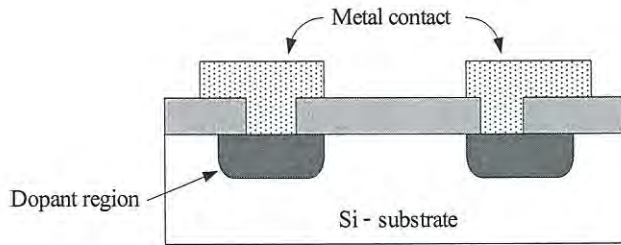
โดยธาตุฟอสฟอรัสจะแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อผลึกซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้  $POCl_3$  เป็นต้นกำเนิดของสารเจือฟอสฟอรัสโดยทำการแพร่ที่อุณหภูมิราว  $1200^\circ C$  ในช่วงเวลาตามต้องการในสภาวะของก๊าซไนโตรเจน

#### 4.6 กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalization Process)

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ตามลำดับขั้นตอนต่างๆ จนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ละส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้ยังคงแยกกันอยู่ในสภาพยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้จึงจำเป็นต้องเข้าสู่กระบวนการเมทัลไลเซชัน (Metalization Process) ก่อน

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

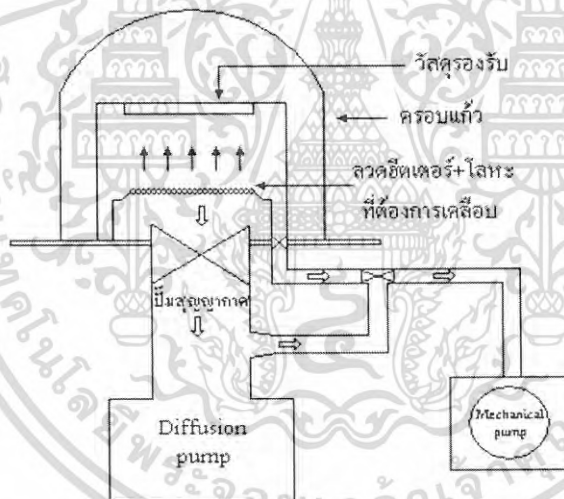
สำหรับโลหะที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การต่อชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่อขั้วอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก

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

#### เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เมื่อไส้หลอดถูกทำให้ร้อนโดยผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะถูกควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆจนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้จนเป็นของเหลวที่ติดกับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางไว้ใน Chamber

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจะระเหยกลายเป็นไวก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องเลือกให้มีขนาดที่พอเหมาะสมกับสารที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

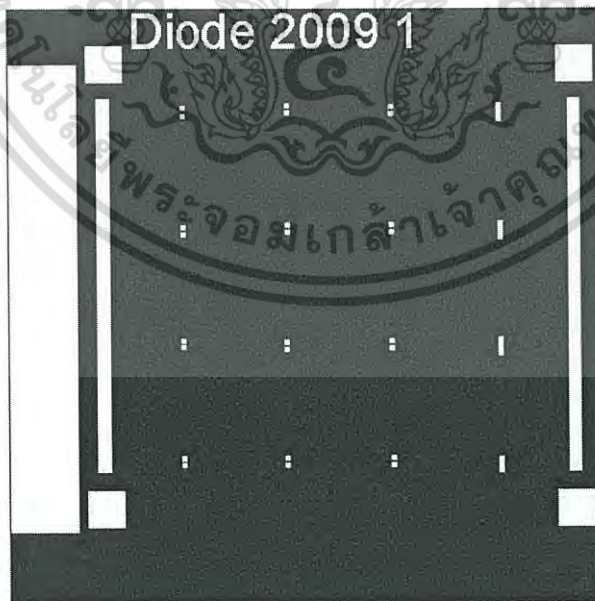
ระเหย ถ้าไม่เช่นนั้นก็จะสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการและพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับสาร AL,Au,Ag,Pd เป็นต้น

#### 4.7 กระบวนการสร้างแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

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

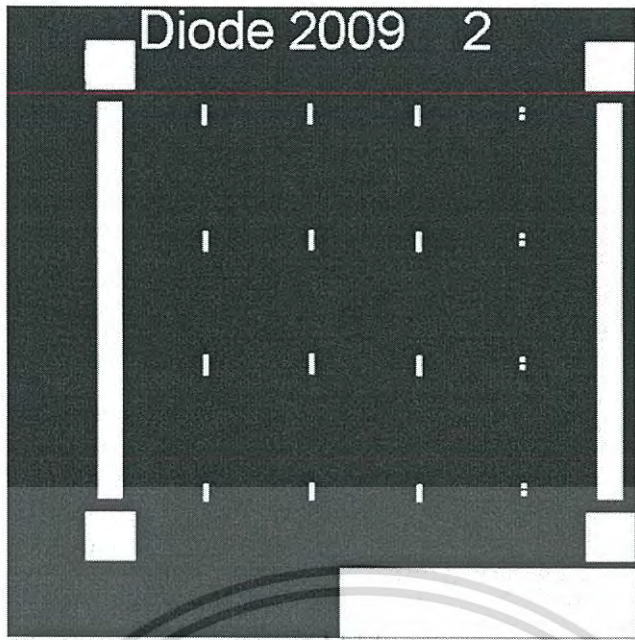
##### 4.7.1 การออกแบบมาสก์ (Mask Design)

- **มาสก์ที่ 1:** Ohmic Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ โดยการแพะอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ( $N^+$ ) เพื่อสร้างรอยต่อ Ohmic ให้กับขั้วแคโทด Cathod ซึ่งจะมีสองรอยต่อที่สมมาตรกันดังรูปที่ 4.11
- **มาสก์ที่ 2:** Diode Mask โดยการเปิดช่องออกไซด์ และแพะอะตอมสารเจือโบรอน ( $P^+$ ) ที่ใช้สำหรับสร้างรอยต่อ P-N เป็นขั้วแอโนด ดังรูปที่ 4.12
- **มาสก์ที่ 3:** Contact Windows Mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้ ด้วยการเปิดช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า หรือจุดเชื่อมต่อในวงจรรวม แสดงดังรูปที่ 4.13
- **มาสก์ที่ 4:** Aluminum Mask เป็นต้นแบบสำหรับกระบวนการเมทัลไลเซชัน เพื่อสกัดชั้นอะลูมิเนียมเฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้างดังรูปที่ 4.14

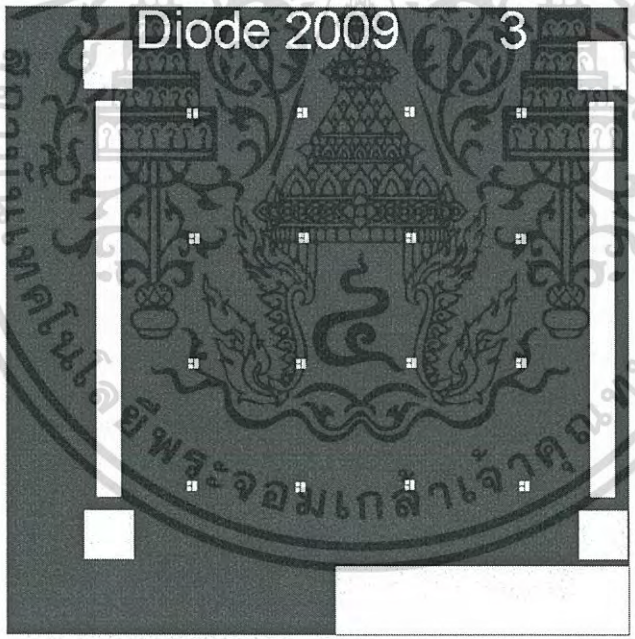


รูปที่ 4.11 มาสก์ที่ 1 ( แคโทด Mask )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

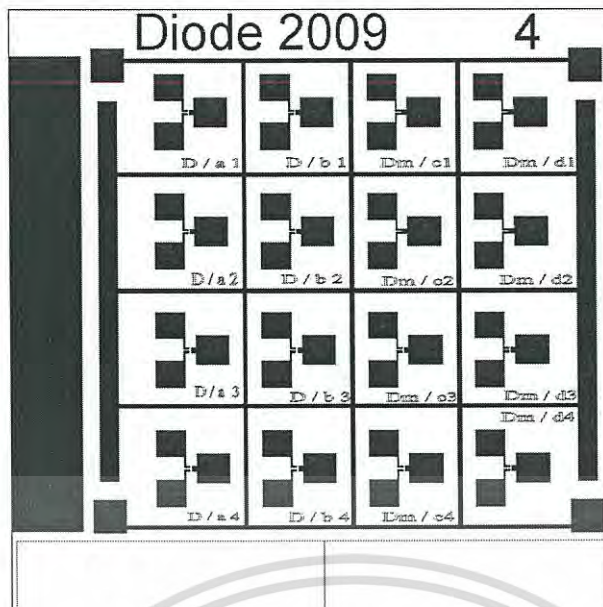


รูปที่ 4.12 มาส์คที่ 2: (แอนโนด Mask)



รูปที่ 4.13 มาส์คที่ 3: Contact Windows

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 มาส์คที่ 4: Aluminum Mask

#### 4.7.2 กระบวนการสร้างแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

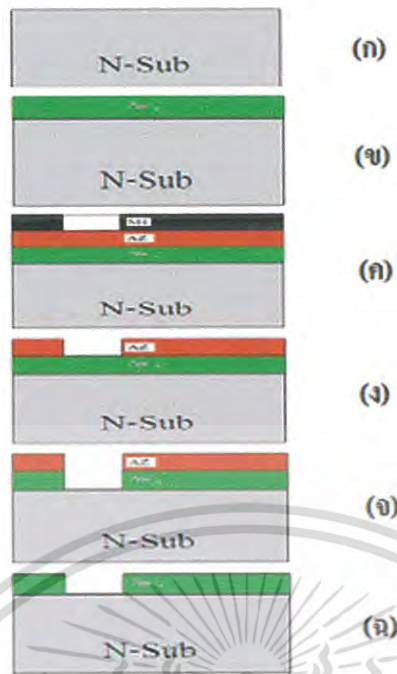
ขั้นตอนกระบวนการสร้างแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ด้วยกันดังต่อไปนี้คือ 1. ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์ 2. ขั้นตอนการสร้างขั้วแคโทด 3. ขั้นตอนการสร้างขั้วแอโนด และ 4. ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะสำหรับการใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยขั้นตอนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 4.7.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์

ขั้นตอนกระบวนการผลิตส่วนแรกสำหรับการสร้างแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ คือขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังป้องกันการรั่วไหลของกระแสพาหะ และบังคับให้พาหะไหลได้เฉพาะบริเวณที่เป็นช่องเปิดนั้น สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการผลิตต่างๆอย่างละเอียดดังนี้

1. การสร้างแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่า Resistivity ความหนา ได้ 19-25  $\Omega$ -cm ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ 400  $\mu$ m เริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนโดยการต้มใน Piranya ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ ) 10 นาที และทำการล้างในน้ำ DI (ให้น้ำไหลผ่าน) 5 นาที ต่อจากนั้นต้มใน Tricholoethylenc 5 นาที Ultrasonic ใน Acetone 2 นาที แล้วทำการล้างในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง ประมาณ 4 วินาทีและล้างในน้ำ DI แก้วที่สองประมาณ 4 วินาทีจบด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน  $\text{N}_2$  จะได้โครงสร้างดังรูปที่ 4.15 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 (ก)-(ด) ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์และเปิดช่องออกไซด์

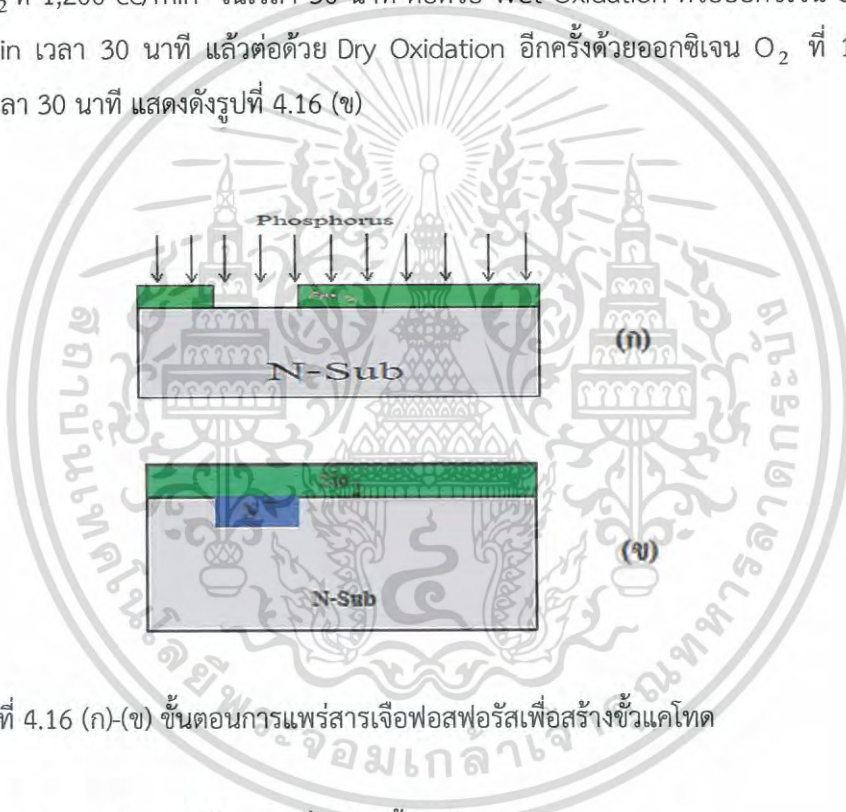
2. จากนั้นเป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จากกระบวนการออกซิเดชันทำการ dry oxidation ที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  1 ชั่วโมง 30 นาที ต่อด้วย wet oxidation ที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  1 ชั่วโมง 30 นาทีจากนั้นก็กลับมาทำ dry oxidation ที่อุณหภูมิ  $1,100^{\circ}\text{C}$  1 ชั่วโมง 30 นาที แสดงโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.15 (ข)
3. ใช้กระบวนการสร้างลวดลาย (Photolithography) ของมาสก์ที่ 1 เพื่อสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์ โดยทำการถ่ายมาสก์ที่ 1 ไปยังผิวน้ำของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับซ้อนมาสก์ (Alignment M 1) และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้ก็จะต้องด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน  $\text{N}_2$  และอบฟิล์มที่  $95^{\circ}\text{C}$  20 นาที แสดงดังรูปที่ 4.15 (ค) และ (ง)
4. กระบวนการกัดชั้นซิลิคอน ด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 (จ) และ (ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.4 ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นแคโทด

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชั้นแคโทด จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้เป็นสารชนิดเอ็นแบบเข้มข้น โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการเปิดช่องออกไซด์เป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะต่อยด้วยกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส Diffusion ไนโตรเจน  $N_2$  ที่ 800 cc/min ใช้เวลา 25 นาที ตามด้วยออกซิเจน  $O_2$  1200 cc/min เป็นเวลา 10 นาทีต่อจากนั้นทำการจุ่มในสารละลาย HF 5 % และล้างออกด้วยน้ำ DI ทั้งสองแก้วตามด้วยเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน  $N_2$  แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก)
2. หลังจากนั้นทำกระบวนการ drive in ทำอยู่ที่อุณหภูมิที่  $1100^{\circ}C$  โดยการ Dry Oxidation ด้วยออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที ต่อยด้วย Wet Oxidation ด้วยออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1,200 cc/min เวลา 30 นาที แล้วต่อยด้วย Dry Oxidation อีกครั้งด้วยออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.16 (ข)



รูปที่ 4.16 (ก)-(ข) ขั้นตอนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นแคโทด

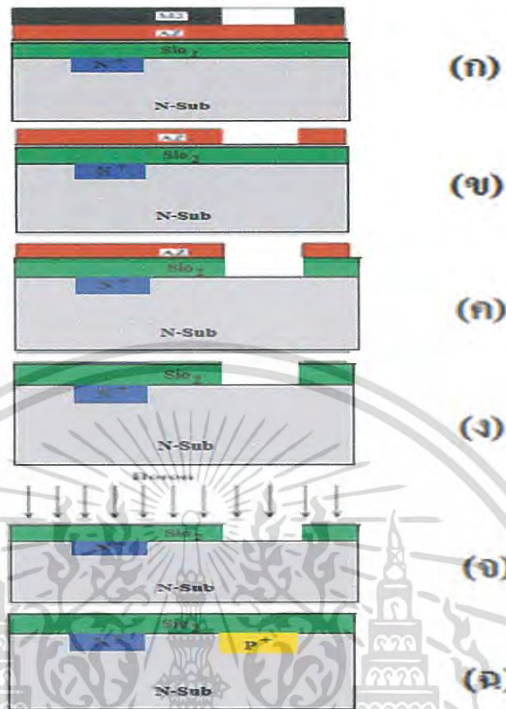
#### 4.7.5 ขั้นตอนการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นแอนโนด

ขั้นตอนนี้เป็นการเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารโบรอนที่จะให้ได้เป็นสารชนิดพีแบบเข้มข้น โดยขั้นตอนรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาร์สค์ที่ 2 เพื่อสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์โดยทำการถ่าย มาร์สค์ที่ 2 ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $95^{\circ}C$  ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับซ้อนมาร์สค์ (Alignment M2) และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้ก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน  $N_2$  และอบฟิล์มที่  $95^{\circ}C$  20 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 (ก)-(ข)



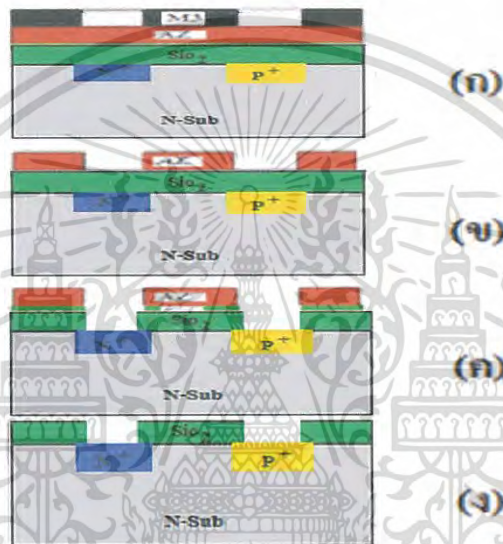
รูปที่ 4.17 (ก)-(ฉ) ขั้นตอนการสร้างซิลิโคน

2. กระบวนการกัดชั้นซิลิโคนด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 (ค)-(ง)
3. เมื่อทำการเปิดช่องออกไซด์เป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะต่อด้วยกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนด้วยวิธี Activate แผ่น  $B_2O_3$  กับออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1200 cc/min เป็นเวลา 25 นาที ตามด้วยออกซิเจน  $O_2$  1200 cc/min อีก 10 นาทีต่อจากนั้นทำการจุ่มในสารละลาย HF 5 % และล้างออกด้วยน้ำ DI ทั้งสองแก้ว ตามด้วยเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน  $N_2$  แสดงดังรูปที่ 4.17 (จ)
4. หลังจากนั้นทำกระบวนการ drive in ทำอยู่ที่อุณหภูมิที่  $1100^{\circ}C$  โดยการ Dry Oxidation ด้วยออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที ต่อด้วย Wet Oxidation ด้วยออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1,200 cc/min เวลา 30 นาที แล้วต่อด้วย Dry Oxidation อีกครั้งด้วยออกซิเจน  $O_2$  ที่ 1,200 cc/min ในเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 4.17 (ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.6 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ

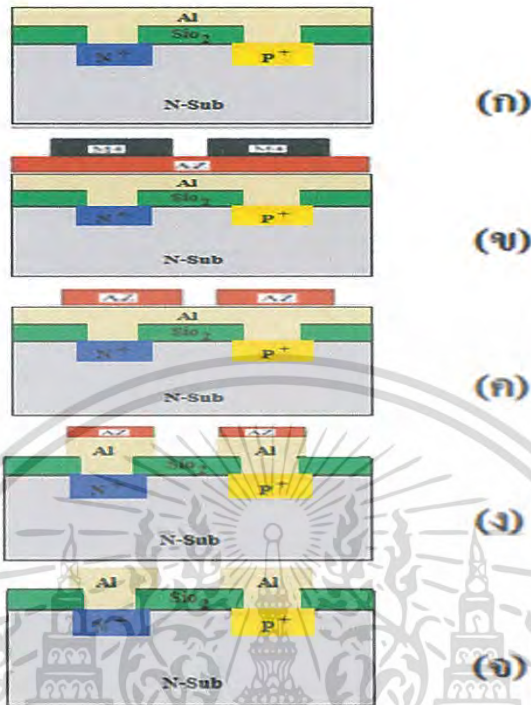
1. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 3 เพื่อสำหรับการเปิดชั้นออกไซด์โดยทำการถ่ายมาสก์ที่ 3 ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 °C ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับชั้นมาสก์ (Alignment M3) และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้ก็จะต้องด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน  $N_2$  และอบฟิล์มที่ 95 °C 20 นาที แสดงได้ดัง รูปที่ 4.18 (ก)-(ค)



รูปที่ 4.18 (ก)-(ง) ขั้นตอนการเปิดช่องสร้างขั้วโลหะ

2. กระบวนการกัดชั้นซิลิคอน ด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Buffer 5 นาที และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.18 (ง)
3. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporatorแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 (ก)
4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้มาสก์ที่ 4 (AL)เพื่อสำหรับการเปิดชั้นโลหะอลูมิเนียมโดยทำการถ่ายมาสก์ที่ 4 ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ชนิดบวก (AZ 1350) จากนั้นใส่เครื่อง Spin ด้วยความเร็วรอบที่ 3000 rpm และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 °C ประมาณ 20 นาที ต่อจากนั้นทำการปรับชั้นมาสก์ (Alignment M4) และฉายแสง (UV Expose) ที่ 20 วินาที เมื่อจบขั้นตอนนี้ก็จะต้องด้วยการทำ Development สองแก้ว ครั้งที่ 1

เป็นเวลา 15 วินาทีและ ครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาทีและล้างด้วยน้ำ DI อีกสองแก้ว ต่อด้วยการเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน  $N_2$  และอบฟิล์มที่  $95^\circ C$  20 นาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 (ข)-(ค)

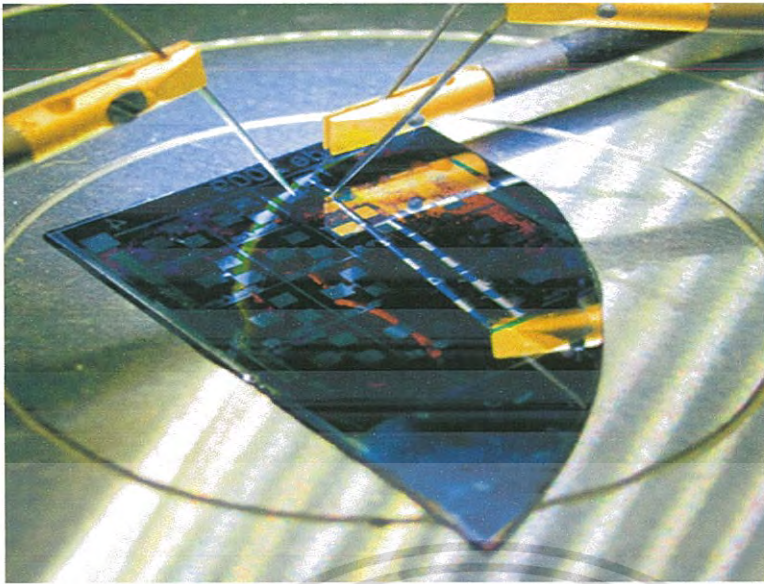


รูปที่ 4.19 กระบวนการสร้างชั้นโลหะ

5. กระบวนการกัดชั้นโลหะอลูมิเนียม ด้วยกระบวนการ Etching โดยการจุ่มในน้ำสารละลาย Phosphoric Aid และล้างน้ำยาไวแสงโดยจุ่มใน Acetone สองแก้ว ใช้เวลาแก้วละ 1 นาที จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายทำการขึ้นเตอร์ลิงค์ที่อุณหภูมิ  $450^\circ C$  ในเวลา 5 นาทีแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 (ง)-(จ)

จากรูปที่ 4.20 แสดงแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่น ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 16 ตัว ขณะที่ในรูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ขยายสักส่วนเพื่อแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ และรูปที่ 4.22 แสดงการเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งานและการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) โดยการเคลือบอุปกรณ์ด้วยเรซินเพื่อความสวยงามและป้องกันผลกระทบต่างๆจากสิ่งแวดล้อม ก่อนการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

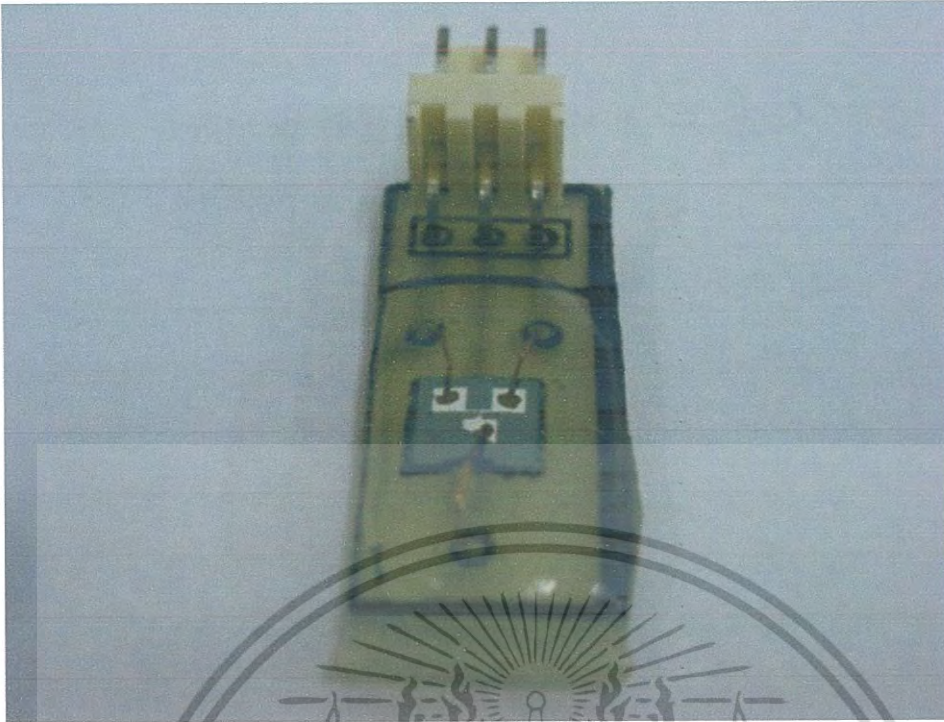


รูปที่ 4.20 แสดงแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยภายในแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 4.21 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของแมงนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ทำการขยายสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงการเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะแสดงการทดลองและผลการทดลองของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่และการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์และคุณสมบัติพื้นฐานในด้านต่างๆ รวมถึงจะเปรียบเทียบให้เห็นผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ชนิดที่ได้ออกแบบโครงสร้างที่ระยะ  $L=40 \mu\text{m}$   $W=40 \mu\text{m}$  กับแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ชนิดที่ได้ออกแบบโครงสร้างที่ระยะ  $L=80 \mu\text{m}$   $W=80 \mu\text{m}$  เพื่อแสดงให้เห็นผลการการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดทั้งสองแบบโครงสร้าง

#### 5.1 วงจรวัดผลการทดลอง (Sensor interface circuit)

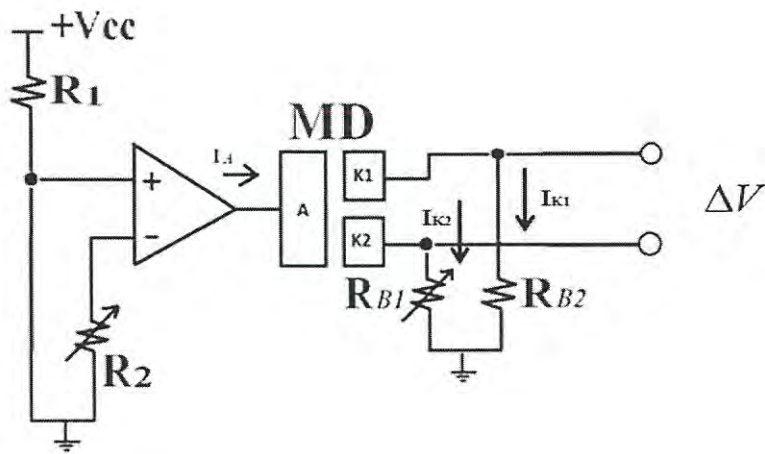
ในการวัดผลการทดลองหรือการวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อสิ่งแวดล้อมที่ทำการวัดนั้น จำเป็นต้องมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกมาต่อร่วมกับอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถวัดผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน, กระแสไฟฟ้า หรือ ความต้านทาน เป็นต้น

##### ■ วงจรการวัดทดลอง

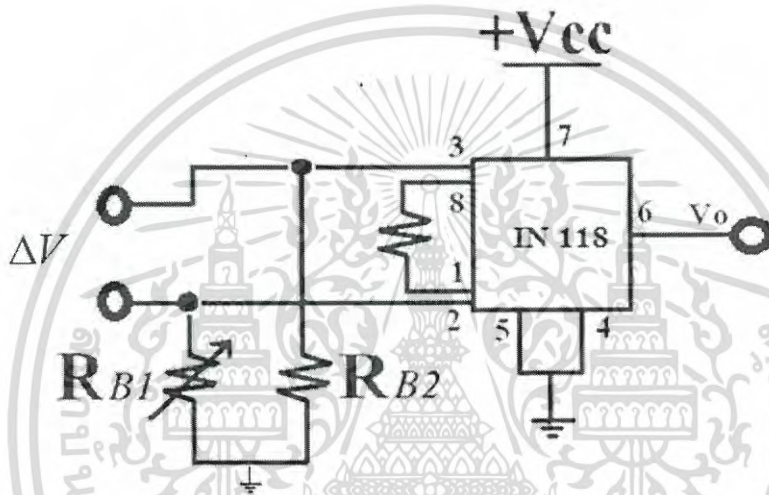
จากรูปที่ 5.1 แสดงวงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ สนามไฟฟ้าได้จากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V_{cc}$ ) กระแสการทำงาน  $I_a$  ใช้วงจรแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ขั้วแคโทด K1 และ K2 ต่อกับความต้านทานปรับค่าได้  $R_{B2}$  และ  $V_{R_{B1}}$  เอาท์พุทแสดงเป็นความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้า  $\Delta V$  เนื่องจากความแตกต่างระหว่างกระแสแคโทดทั้งสอง  $\Delta I_0$

##### การทำงานของวงจร

จากรูปที่ 5.1 เป็นวงจรที่ใช้วัดทดลองของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ เป็นการไบอัสกระแสให้แก่ขาอินพุท  $I_a$  โดยใช้อุปกรณ์แหล่งจ่ายกระแสคงที่และสามารถปรับกระแสไบอัสได้จาก  $R_2$  โดยที่ขาแคโทดทั้งสองเป็นเอาท์พุทต่อกับขั้วอินพุทของวงจรวัดขยายแรงดันออฟเซตสามารถเป็นศูนย์ได้โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_{B1}$  และ  $R_{B2}$  ซึ่งความแตกต่างระหว่างกระแสเอาโนดและแคโทดถูกวัดอยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า ( $V_o$ ) เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านจะทำให้กระแสที่ไหลเกิดความเปลี่ยนแปลง โดยที่ IC INA118 จะทำหน้าที่ขยายความแตกต่างแรงดันแคโทดทั้งสองเมื่อมีแรงดันเอาท์พุทออกมาที่แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่เข้าไปที่อินพุทของวงจรวัดขยายแรงดันดังรูปที่ 5.2 วงจรขยายแรงดัน



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

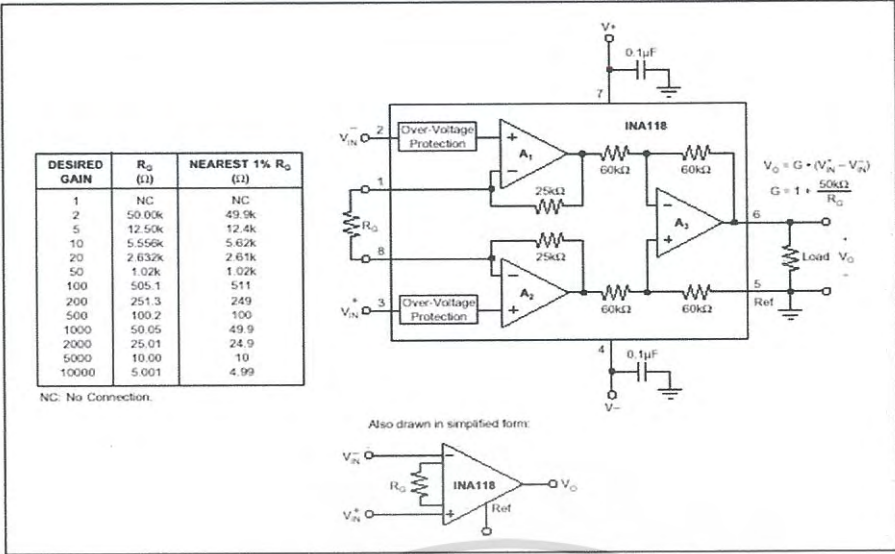


รูปที่ 5.2 วงจรขยายแรงดันเอาต์พุตแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

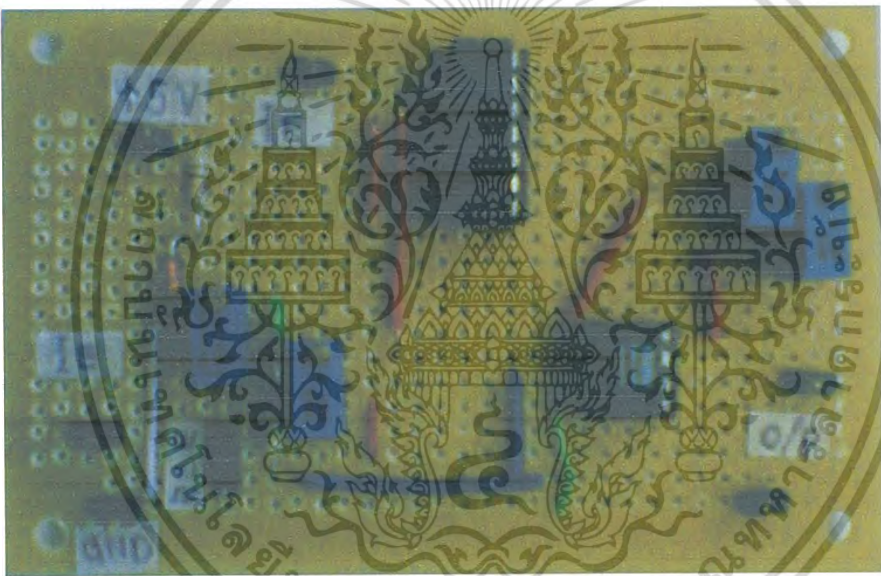
### วงจรรขยายผลต่าง (INSTRUMENTATION AMPLIFIER)

รูปที่ 5.3 โครงสร้างและการต่อใช้งาน โดย IC INA118 ทำหน้าที่ขยายความแตกต่างระหว่างกระแส  $I_{K1}$  และกระแส  $I_{K2}$  โดยต่อเข้ากับขา 3 และขา 2 ตามลำดับ และจะสามารถปรับค่าอัตราขยายของ IC ได้โดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่อคร่อมระหว่างขา 1 และขา 8 ได้ตามตาราง ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับอินพุตผลต่างของออปแอมป์มาตรฐาน แต่ต่างกันที่วงจรรขยายผลต่างมีการป้อนกลับทางลบเพื่อควบคุมอัตราขยายของวงจรถามต้องการเป็นรูปลักษณะโครงสร้างภายในของ INSTRUMENTATION AMPLIFIER เบอร์ INA118 ที่การปรับอัตราขยายโดยการปรับค่า  $R_G$  ระหว่างขาที่ 1 กับ ขาที่ 8 และมี  $V^+$  ที่ขา 3 ส่วน  $V^-$  อยู่ที่ขาที่ 2 ส่วนรูปที่ 5.4 เป็นวงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างและการต่อใช้งาน



รูปที่ 5.4 วงจรวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในแคโทด (Minority carrier) คือพาหะหลักที่มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยจะถูกฉีด (Injection) จากแอโนด ผ่านไปยังแคโทดทั้งสอง เกิดเป็นกระแสแคโทดหนึ่ง ( $I_{D1}$ ) และกระแสแคโทดสอง ( $I_{D2}$ ) ลำดับ โดยแสดงความสัมพันธ์ได้จากสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$I_D = I_{D1} + I_{D2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ จะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันเอาต์พุตหรือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาแคโทดทั้งสอง (V-output) โดยในสภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B = 0$ ) กระแสแคโทดหนึ่งกับกระแสแคโทดสองจะมีค่าคงที่ ทำให้แรงดันเอาต์พุต ที่วัดได้มีค่าคงที่ แต่เมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ ( $B \neq 0$ ) จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่ฉีดจากแอโนด ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนี้ จะทำให้กระแสแคโทดหนึ่งกับกระแสแคโทดสองเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ( $\Delta I_{k1} \neq 0$  และ  $\Delta I_{k2} \neq 0$ ) ซึ่งเมื่อวัดแรงดันเอาต์พุตระหว่างขาแคโทดทั้งสอง จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot W \cdot L \tan \theta$$

จากสมการข้างต้นเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสแคโทดทั้งสอง ซึ่งแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้นี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) ของอุปกรณ์ได้จากสมการที่ 3.7 ดังนี้

$$S_A = \frac{\Delta V_0}{\Delta B}$$

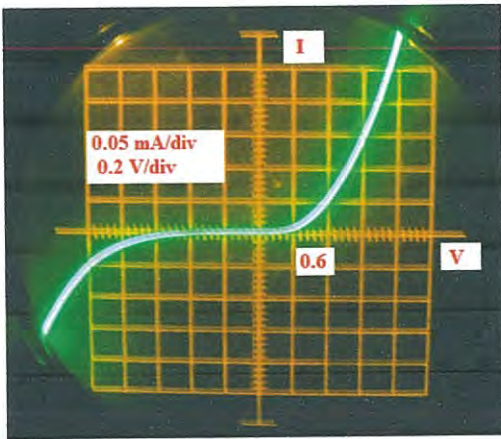
โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ การวัดผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ทั้งหมด จะพิจารณาจากค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งคำนวณได้จากแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จ่ายให้อุปกรณ์ ก่อนจะนำมาวิเคราะห์ผลในด้านต่างๆ ของอุปกรณ์

## 5.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล (Measurement and Discussion)

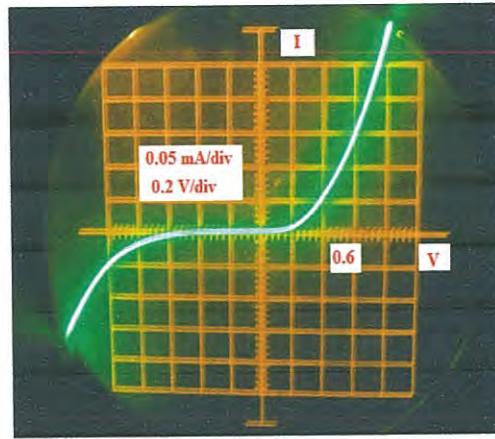
### 5.2.1 การวัดคุณสมบัติรอยต่อทางไฟฟ้า

- คุณสมบัติความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า

การวัดคุณสมบัติแมกนีโตไดโอดด้วยเครื่องวัด Curve Tracer ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V Characteristic) ของแมกนีโตไดโอด แสดงการวัดทุกรายต่อของแมกนีโตไดโอดสามขาโดยทำการไบอัสกระแสเบสที่สเกล 0.05 mA/div ได้ผลการวัดดังรูปที่ 5.5 (ก) และ (ข)



(ก) รอยต่อ A-K1



(ข) รอยต่อ A-K2

รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ

### 5.3 การวัดผลตอบสนองของสนามแม่เหล็กแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่

ในการวัดผลการทดลองหรือการวัดการตอบสนองของอุปกรณ์ต่อสิ่งแวดล้อมที่ทำการวัดนั้น จำเป็นต้องมีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกมาต่อร่วมกับอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถวัดผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดัน, กระแสไฟฟ้า หรือความต้านทาน

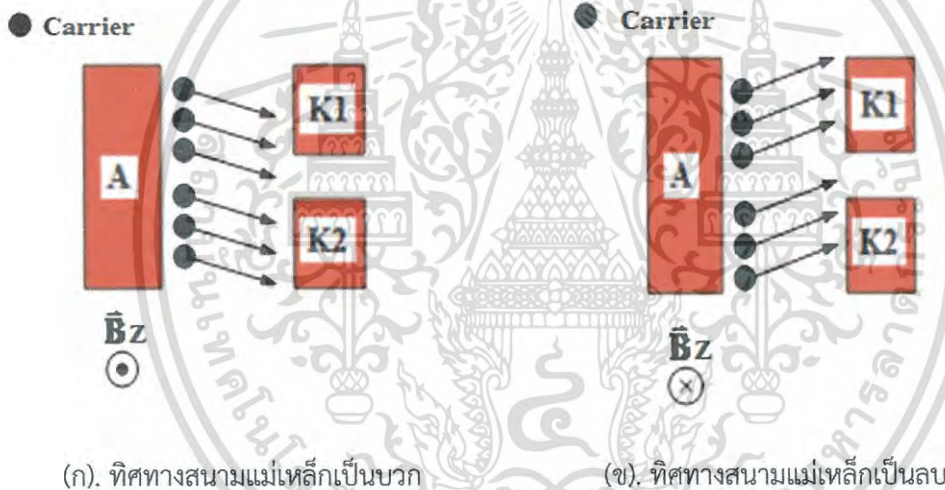
การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบคู่อาศัยกลไกจากหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์ทำให้เกิดแรงร่อนของพาหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะไปจากแนวเดิม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสแอมแปร์กับแคโทดทั้งสอง โดยสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ได้จากค่าแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมระหว่างขาทั้งสอง

#### 5.3.1 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง (Vertical magnetic field respons )

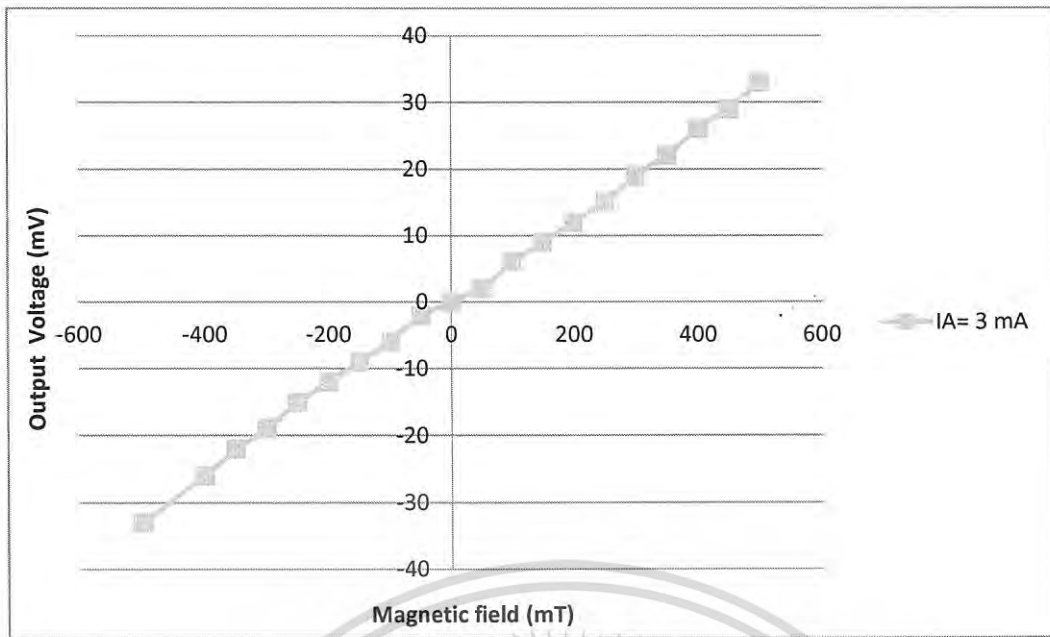
แมกนีโตไดโอดสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ในทิศทางแนวตั้ง (ทิศทาง Z) การตรวจจับสนามแม่เหล็กขึ้นกับการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) และกระแสการฉีดจากการมอดดูเลท (modulation current injection) การไบอัสแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ( $V_{cc}$ ) เพื่อให้เกิดผลความแตกต่างเนื่องจากกระแสการฉีดจากการมอดดูเลทได้ การใช้แหล่งจ่ายกระแสเพื่อกำหนดกระแสอินพุตให้คงที่โดยผลรวมกระแสแคโทดทั้งสองจะเท่ากับกระแสอินพุตแอมแปร์ การปรับแรงดันออฟเซตสามารถปรับเป็นศูนย์ได้โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $VR_{B1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.6 (ก) เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุต ( $V_{K1K2}$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับผิวของอุปกรณ์ระหว่าง -400 ถึง 400 mT โดยใช้กระแสไอแอส  $I_A = 3$  mA ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยในลักษณะเชิงเส้น โดยผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ 1. ช่วงที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวก (+B) และ 2. ช่วงที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ (-B) จากช่วงที่ 1 เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กในทิศทางบวกมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้แรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการเบี่ยงเบนของพาหะจะเกิดได้มากยิ่งขึ้น กระแสจะไหลเข้าไปยังขั้วแคโทด K2 เพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 5.6 (ข) ทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วแคโทด K1 กับแคโทด K2 มีค่าเพิ่มขึ้น (บวกมากขึ้น) สำหรับกรณีของช่วงที่ 2 จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ ดังนั้นการเบี่ยงเบนของพาหะจะมีทิศทางชี้ขึ้นบนซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีแรก ทำให้กระแสไหลเข้าไปยังขั้วแคโทด K2 เพิ่มมากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 5.6 (ค) ทำให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วแคโทด K1 กับแคโทด K2 ค่าเพิ่มขึ้น(ลบมากขึ้น)



สำหรับค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7 หรือก็คือค่าความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ โดยจากกราฟในรูปที่ 5.6 (ก) ช่วงที่สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 66.545 mV/T ในขณะที่เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นลบ ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 66.545 mV/T เราจะพบว่าค่าความไวในการตอบสนองของทิศทางบวกกับลบมีค่าเท่ากับ เนื่องจากแคโทดทั้งสองมีความสมมาตรกัน

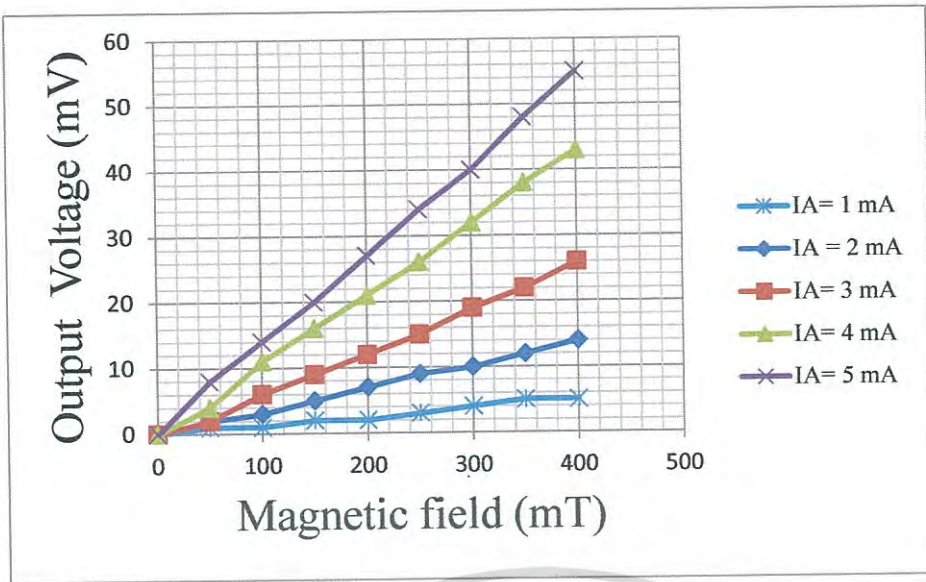


(ค) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันฮอลล์

รูปที่ 5.6 แสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด(ก). เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก (+B) (ข). เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ (-B)และ(ค). กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันฮอลล์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง -400 ถึง 400 mT

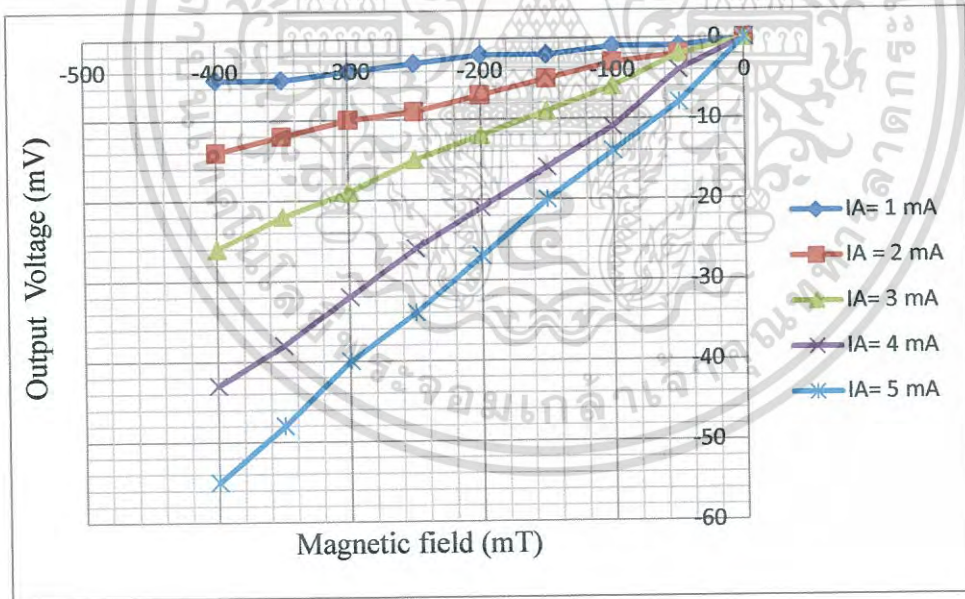
### 5.3.2 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่กระแสแอมแปร์ค่าต่างกัน

กราฟรูปที่ 5.7 เป็นกราฟแสดงผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดที่กระแสแอมแปร์ค่าแตกต่างกันคือ 1,2,3,4 และ 5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวกกับลบตามลำดับ โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีระยะเบี่ยงเบนพาหะ (L) เท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  และมีความกว้างของแคโทดทั้งสอง (W) เท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันฮอลล์ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง -400 ถึง 400 mT โดยกราฟในรูปที่ 5.7 (ก) เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก จะได้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 13.636, 35.636, 66.545, 110.182 และ 136.909 mV/T ที่กระแสแอมแปร์ที่ 1,2,3,4 และ 5 mA ตามลำดับ



(ก) กราฟแสดงผลมีทิศทางเป็นบวก

ขณะที่กราฟในรูปที่ 5.7 (ข) เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันฮอลล์พุตเมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ จะได้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 13.636, 35.636, 66.545, 110.182 และ 136.909 mV/T ที่กระแสแอโนดที่ 1,2,3,4 และ 5 mA ตามลำดับ



(ข) กราฟแสดงผลมีทิศทางเป็นลบ

รูปที่ 5.7 แสดงผลของกราฟที่ค่าความกว้างแอโนด (L)  $40 \mu\text{m}$  กับแคโทด (W)  $40 \mu\text{m}$

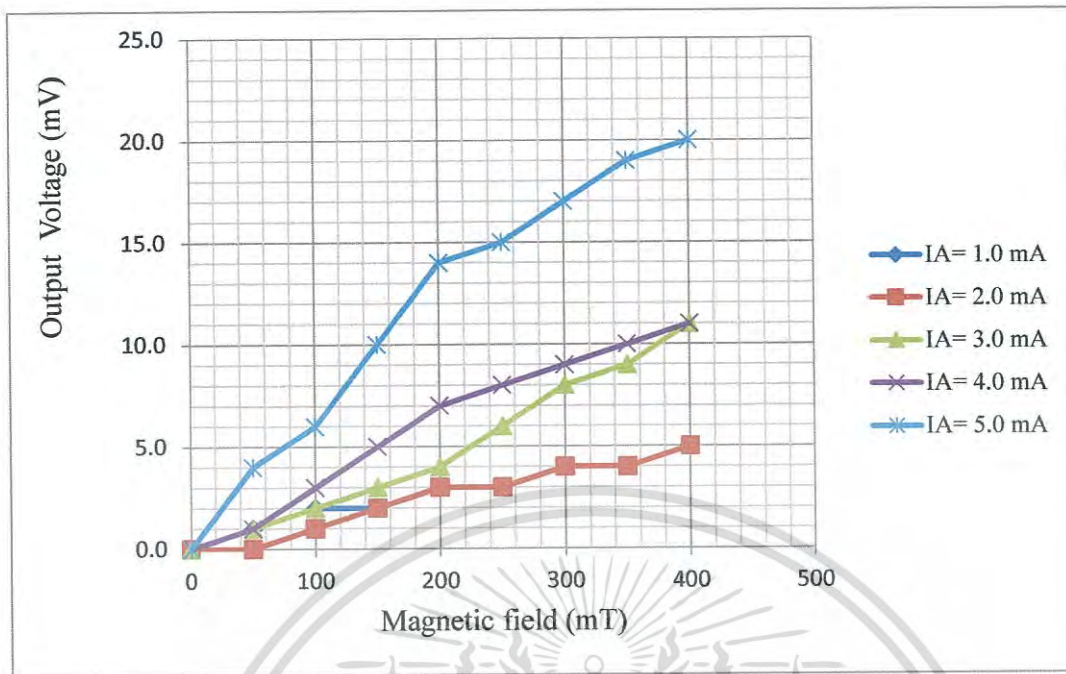
(ก) กราฟแสดงผลมีทิศทางเป็นบวก (ข) กราฟแสดงผลมีทิศทางเป็นลบ

จากกราฟสามารถสรุปค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ ที่ค่าความกว้างแอนโนด (L)  $40 \mu\text{m}$  กับแคโทด (W)  $40 \mu\text{m}$  กระแสแอนโนด 1,2,3,4 และ 5 mA ได้ดังตารางที่ 5.1 [11]-[15]

ตารางที่ 5.1 ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ค่าความกว้างแอนโนด (L)  $40 \mu\text{m}$  กับแคโทด (W)  $40 \mu\text{m}$  กระแสแอนโนดค่าแตกต่างกัน

| กระแสแอนโนด<br>(mA) | ค่าความไวในการตอบสนอง (mV/T) |         |
|---------------------|------------------------------|---------|
|                     | +B                           | -B      |
| 1                   | 13.636                       | 13.636  |
| 2                   | 35.636                       | 35.636  |
| 3                   | 66.545                       | 66.545  |
| 4                   | 110.182                      | 110.182 |
| 5                   | 136.909                      | 136.909 |

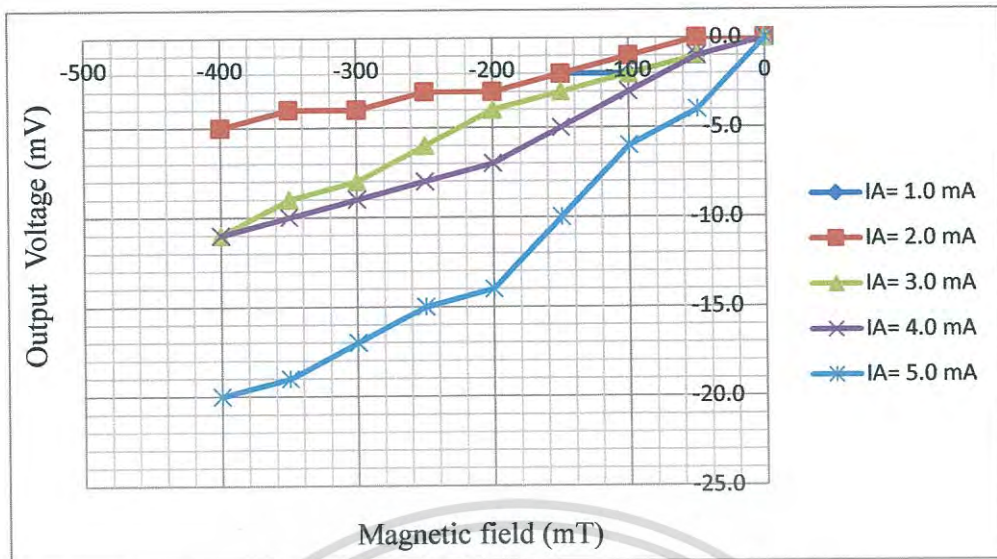
สำหรับกราฟรูปที่ 5.8 เป็นกราฟแสดงผลการผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดที่กระแสแอนโนดค่าแตกต่างกันคือ 1,2,3,4 และ 5 mA เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวกกับลบตามลำดับ โดยอุปกรณ์ที่ใช้มีระยะเบี่ยงเบนพาด (L) เท่ากับ  $80 \mu\text{m}$  และมีความกว้างของแคโทดทั้งสอง (W) เท่ากับ  $80 \mu\text{m}$  จากกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุตต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กระหว่าง  $-400$  ถึง  $400 \text{ mT}$  โดยกราฟในรูปที่ 5.8 (ก) เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นบวก จะได้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 11.333, 13.00, 27.667, 28.667 และ 50.667 mV/T ที่กระแสแอนโนดที่ 1,2,3,4 และ 5 mA ตามลำดับ ขณะที่กราฟในรูปที่ 5.8 (ข) เมื่อให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางเป็นลบ จะได้ค่าความไวในการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 11.333, 13.00, 27.667, 28.667 และ 50.667 mV/T ที่กระแสแอนโนดที่ 1,2,3,4 และ 5 mA ตามลำดับ



(ก) กราฟแสดงผลมีทิศทางเป็นบวก

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสแอนโนดหรือกระแสไบอัส จะทำให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งทิศทางของสนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบ เนื่องมาจากการเพิ่มกระแสไบอัสให้แก่อุปกรณ์นั้น จะมีผลให้ความหนาแน่นของกระแสพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อกระแสพาหะมีเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระแสแคโทดทั้งสองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สัดส่วนของการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะจะเพิ่มขึ้นตามลำดับส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่สนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านอุปกรณ์ยังคงเท่าเดิม ดังนั้นจะได้ว่าค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้กระแสแอนโนดเพิ่มขึ้น โดยสามารถสรุปค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดที่กระแสแอนโนด 1,2,3,4 และ 5 mA

ส่วนการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 400 mT จากผลการทดลองรูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ในแต่ละกระแสการทำงานจะมีความชันมากขึ้นแสดงถึงค่าแรงดันเอาต์พุต  $V_o$  เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก โพลกุกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทำให้เคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่กว้างขึ้นตามทิศทาง  $-Z$  หรือ  $Z$  แล้วแต่ทิศทางการไหลของสนามแม่เหล็กเนื่องจากโครงสร้างที่มีความลึกของรอยต่อที่ตื้นมากทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมเบี่ยงเบนของโพลเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงได้



(ข) กราฟแสดงผลมิติศทางเป็นลบ

รูปที่ 5.8 แสดงผลของกราฟที่ค่าความกว้างแอนด (L)  $80 \mu\text{m}$  กับแคโทด (W)  $80 \mu\text{m}$

(ก) กราฟแสดงผลมิติศทางเป็นบวก (ข) กราฟแสดงผลมิติศทางเป็นลบ

จากกราฟสามารถสรุปค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ค่าความกว้างแอนด (L)  $80 \mu\text{m}$  กับแคโทด (W)  $80 \mu\text{m}$  กระแสแอนด 1,2,3,4 และ 5 mA ได้ดังตารางที่ 5.2 [11]-[15]

ตารางที่ 5.2 ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่ค่าความกว้างแอนด (L)  $80 \mu\text{m}$  กับแคโทด (W)  $80 \mu\text{m}$  กระแสแอนดค่าแตกต่างกัน

| กระแสแอนด<br>(mA) | ค่าความไวในการตอบสนอง (mV/T) |        |
|-------------------|------------------------------|--------|
|                   | +B                           | -B     |
| 1                 | 11.333                       | 11.333 |
| 2                 | 13.00                        | 13.00  |
| 3                 | 27.667                       | 27.667 |
| 4                 | 28.667                       | 28.667 |
| 5                 | 50.667                       | 50.667 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.3 ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก (sensitivity)

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งของแมกนีโตไดโอดสามขา ที่กระแสการทำงานแอโนด  $I_D = 1 \text{ mA}, 2 \text{ mA}, 3 \text{ mA}, 4 \text{ mA}$  และ  $5 \text{ mA}$  สามารถคำนวณค่าความไวตามสมการที่ (3.7)  $S_A = V_o / \Delta B$  จากผลการทดลองรูปที่ 5.7 และ 5.8 การเพิ่มขึ้นของกระแสการทำงานแอโนดสามารถทำให้ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นได้ แมกนีโตไดโอดสามขาสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งได้โดยอาศัยกลไกความแตกต่างเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ ( carrier deflection )

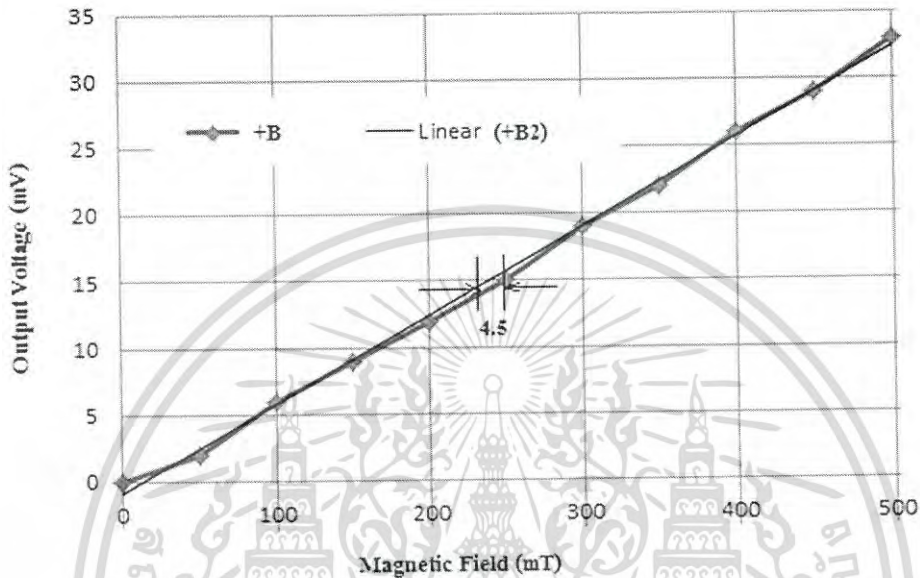
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอด ที่กระแสแอโนดค่าแตกต่างกัน

| Anode current<br>(mA) | Sensitivity (mV/T) $40 \mu\text{m}$ |         | Sensitivity (mV/T) $80 \mu\text{m}$ |        |
|-----------------------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|--------|
|                       | +B                                  | -B      | +B                                  | -B     |
| 1                     | 13.636                              | 13.636  | 11.333                              | 11.333 |
| 2                     | 35.636                              | 35.636  | 13.00                               | 13.00  |
| 3                     | 66.545                              | 66.545  | 27.667                              | 27.667 |
| 4                     | 110.182                             | 110.182 | 28.667                              | 28.667 |
| 5                     | 136.909                             | 136.909 | 50.667                              | 50.667 |

### 5.3.4 ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นของกราฟความเป็นจริงแล้วหมายถึง ความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) หรือคือค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจริงกับผลจากการประมาณค่าที่เป็นไปได้ โดยวิธีในการวัดความไม่เป็นเชิงเส้นของกราฟสามารถวัดได้หลายวิธี ซึ่งในการทดลองนี้จะวัดจากค่าความแตกต่างสูงสุดของค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างกราฟจากการประมาณค่ากับกราฟจากการทดลองจริง โดยจากเสนอเฉพาะกรณีที่ให้สนามแม่เหล็กเป็นบวกเท่านั้นดังรูปที่ 5.9

จากกราฟรูปที่ 5.9 เป็นกราฟแสดงผลการตอบสนองของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ เมื่อให้กระแสไบอัสเท่ากับ 3 mA และจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางบวก ซึ่งจากการทดลองจะได้ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นสูงสุดเท่ากับ 0.9 % แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์มีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในระดับที่สูงมาก สำหรับกรณีของกระแสไบอัสค่าอื่นๆ และสนามแม่เหล็กทิศทางเป็นลบ ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะที่คล้ายกัน



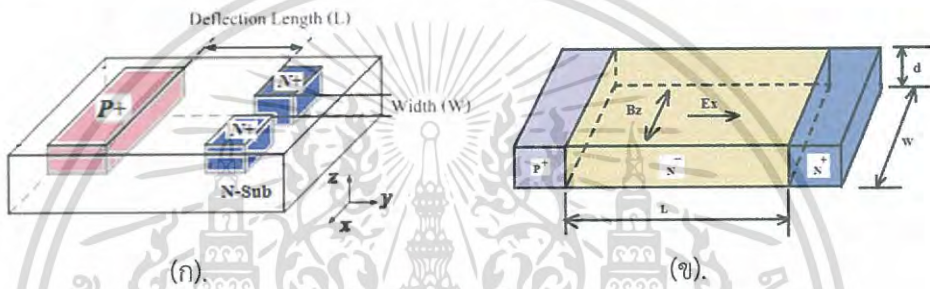
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบกราฟจากการทดลองจริงกับกราฟจากการประมาณค่า เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้นของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 3.0 mA เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวก

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทำงานและการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่เป็นการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง และจากการออกแบบของโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ โดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์นั้นสามารถสรุปเป็นได้ดังนี้

1. โครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่คือโครงสร้างไดโอดสองตัวมาขนานกันมีสามขั้วโดยมีขั้วแอโนด ( $p^+$ ) ต่อร่วมกันหนึ่งขั้ว และมีขั้วแคโทด ( $n^+$ ) สองขั้วที่มีความสมมาตรกันเพื่อที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยการอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสแคโทดทั้งสอง เนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านตัวอุปกรณ์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอด (ก)แมกนีโตไดโอดแบบแคโทดคู่ (ข)แมกนีโตไดโอดแบบเก๋า

กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดในระยะความยาว ( $L$ ) แรงลอเรนซ์ที่กระทำกับพาหะทำให้กระแสเบี่ยงเบนซึ่งระยะการเบี่ยงเบนซึ่งระยะการเบี่ยงเบนคือระยะอนดถึงแคโทดทั้งสอง ( $L$ ) ซึ่งมีความแตกต่างกับโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบเก๋า คือโครงสร้างจะมี  $p^+$  และ  $n^+$  มีส่วน intrinsic อยู่ตรงส่วนกลาง โดยที่การทำงานอาศัยความแตกต่างของการรวมตัวพาหะระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกันสองพื้นผิว และการฉีดพาหะแบบคู่ (double injection) ของพาหะ พาหะจะถูกแรงลอเรนซ์ผลักไปที่ผิวทั้งสองในด้านหนึ่ง ขึ้นอยู่กับทิศทางแรงลอเรนซ์ที่กระทำพาหะเนื่องจากขนาดและทิศทางสนามแม่เหล็กทำให้เกิด ระดับความเข้มข้นของพาหะ (gradient concentration) ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า จากรูปที่ 6.1 เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่กับแมกนีโตไดโอดแบบเก๋าซึ่งมีหลักการการทำงานที่ต่างกันโดยที่แมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถสร้างได้ง่ายกว่า แมกนีโตไดโอดแบบเก๋าซึ่งการสร้างในแต่ละครั้งต้องควบคุมคุณสมบัติให้เหมือนกันซึ่งทำได้ยาก

2. อุปกรณ์จะมีความเป็นเชิงเส้นที่ระยะการเบี่ยงเบนเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  ดังนั้นเมื่อให้กระแสค่าคงที่ค่าหนึ่งให้กับแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่ระยะการเบี่ยงเบนระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดทั้งสองเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่เป็นบวก (+B) จะมีค่าที่เท่ากันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เป็นลบ (-B) ทำให้ค่าที่ได้ออกมาเป็นแบบเชิงเส้นระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็กทำให้ได้ค่าความแตกต่างของกระแสไดโอด หรือกระแสเอาต์พุต ( $\Delta I_D$ ) ดังสมการดังนี้

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot W_A \cdot L \cdot \mu_p \cdot B_z$$

3. ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของแมกนีโตแบบแคโทดคู่ จะเพิ่มขึ้นได้ เมื่อให้กระแสแอโนด ( $I_a$ ) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกระแสจะเป็นการเพิ่มปริมาณการฉีดกระแสพาหะ ทำให้การเบี่ยงเบนของพาหะมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเพิ่ม ทำให้ความไวในการตอบสนองเพิ่มขึ้นตามอย่างเป็นเชิงเส้น
4. เมื่อพิจารณาที่ระยะความยาวของการเบี่ยงเบนพาหะ (L) ระหว่างแอโนดกับแคโทดทั้งสอง ค่าพารามิเตอร์  $L = 40 \mu\text{m}$ ,  $WK = 40 \mu\text{m}$  กับพารามิเตอร์  $L = 80 \mu\text{m}$ ,  $WK = 80 \mu\text{m}$  ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะมีค่าลดลง ขณะที่ความยาว (L) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะการเบี่ยงเบนเท่ากับ 80  $\mu\text{m}$  จะได้ค่าที่ไม่มีความเชิงเส้น เพราะระยะการเบี่ยงเบนมีค่าสูงเลยจุดวิกฤตจึงทำให้แรงดันฮอลล์ มีค่าสูงกว่าแรงลอเรนซ์ จึงทำให้เกิดการหักล้างแรงลอเรนซ์
5. อุปกรณ์มีความเป็นเชิงเส้นสูงที่ระยะการเบี่ยงเบนระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดทั้งสองเท่ากับ 40  $\mu\text{m}$  โดยที่มีค่าความผิดพลาดหรือความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์เท่ากับ 0.9 % ที่กระแสไบอัสเท่ากับ 3 mA เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทางเป็นบวก
6. เป็นโครงสร้างที่ง่ายในการสร้างของแมกนีโตไดโอด และสามารถพัฒนาเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เดี่ยวหรือใช้ในวงจรรวมได้ ตัวอุปกรณ์มีความเสถียรภาพและมีความทนทานเหมือนกับไดโอด เนื่องจากเป็นโครงสร้างรอยต่อ PN

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Pflaiederer, "Magnetodiode model, "Solid-State Electron., vol.15 p. 335, 1972.
- [2] Henry p. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trans. Electron Device, vol.74, pp.315-317, no8, 1986.
- [3] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals."Sensors and ActuatorsA,58(1997)137-140.
- [4] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device." IEEE Electron Devices Lett, vol. EDL- 5,pp,357-358.1984.
- [5] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [6] H.P. Baltes, R.S. Popovic, Integrated semiconductor magnetic field sensors, Proc, IEEE 74 (8) (1986) 1107-1132.
- [7] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, ' 2-D integrated magnetic Field sensor in CMOS technology,' Circuit Syst (1989) 701-704.
- [8] O.S. Lutes, P.S. Nussbaum, and O.S. Aadland, "Sensitivity limit in SOS magnetodiodes," IEEE Trans, Electron Devices, vol. Ed-27, p.68, 1979.
- [9] A. Mohaghaegh, S. Crjstoloveanu, and J. De Poncharra, "Double-injection phenomena under magnetic field in SOS films: A new generation of magnetosensitive microdevices," IEEE Trans. Electron Devices., vol. ED-28. p. 237,1981.
- [10] Hong Xiao, "Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology", Pearson Prentice Hall, 2001.
- [11] ปัญญากร โสตทิพย์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, ชนะ สิภัทรพงศ์พันธ์ และคณะ, "ผลของระยะเบี่ยงเบนและความกว้างการฉีดพาหะต่อความไวของแมกนีโตทรานซิสเตอร์", NECTEC-ACE2010 Special Edition, September 2010, pp.212-217
- [12] ผศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, "อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ", แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์” แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [14] ชนะ สีกัทรพงศ์พันธ์, วีระเพ็ญจันทร์, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “แมกนีโตทรานซิสเตอร์โหมดการทำงานสามขั้ว”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เดือน พฤศจิกายน ปี 2547, หน้า 273-276
- [15] ชนะ สีกัทรพงศ์พันธ์, โสภณ พรหมชัย, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้ง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26, เดือน พฤศจิกายน ปี 2546, หน้า 1419-1424
- [16] สุเมธ จันทร์แกมแก้ว, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล, “แมกนีโตไดโอดแบบคู่”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32, เดือน ตุลาคม ปี 2552, หน้า 407-410



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32  
 32<sup>nd</sup> Electrical Engineering Conference  
 29-30 ตุลาคม 2552 ณ โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท ปราจีนบุรี

*EE for Better Life 1* โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Logo: EECON XXXII

Logo: Faculty of Engineering, Mahachulalongkornrajavidyalaya University, Prachinburi Campus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# แมกนีโตไดโอดแบบคู่

## Dual Magnetodiode

สุเมธ จันทร์แกมแก้ว และ เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร.02-739-0643 02-739-2384 E-mail:junkamkaw@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแมกนีโตไดโอดแบบใหม่มีโครงสร้างเป็นไดโอดสองตัวที่ปลายด้านหนึ่งต่อร่วมกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งแยกจากกันแบบสมมาตร การทำงานอาศัยหลักการหนีคพาหะจากปลายที่ต่อร่วมกันไปยังขั้วที่แยกจากกันภายใต้การไบแอสไปข้างหน้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กให้ทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าอุปกรณ์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของพาหะทำให้เกิดความแตกต่างของกระแสที่ขั้วที่แยกจากกัน ซึ่งแปรผันตรงอย่างเชิงเส้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก แมกนีโตไดโอดชนิดนี้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ทั้งขนาดและทิศทาง ความไวอุปกรณ์แปรตามกระแสไดโอด แมกนีโตไดโอดชนิดนี้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้าง

คำสำคัญ: แมกนีโตไดโอด, รอยต่อพีเอ็น, ปรากฏการณ์ฮอลล์, เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก

### Abstract

This paper presents a new magnetodiode which the structure composes of two coupled diodes. One type terminal is common and the another one is symmetrical separated. We have designed and fabricated devices and measured the magnetic response. The mechanisms are mainly carrier deflection of injected carrier from the common terminal by forward biasing toward to the separated terminal. When magnetic field is applied perpendicular to the device surface, the current difference caused by Hall effect and Lorentz's force is linearly changed with the magnetic field density at any applied current. It can detect both the direction and magnitude of magnetic field.

Keywords: magnetodiode, pn junction, Hall effect, magnetic sensor

### 1. คำนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิด เช่น ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต และ ไดโอด [1-9] โดยทั่วไปอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก [1-9]

บทความนี้ศึกษาถึงโครงสร้างแมกนีโตไดโอดสองตัวแบบสามขั้ว ซึ่งมีขาอินตร่วมกันและมีขาแคโทดสองขา ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยที่อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนของพาหะให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสของขั้วแคโทดทั้งสอง ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสนามแม่เหล็กกับความแตกต่างของกระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสอง โดยการเปลี่ยนแปลงระยะความกว้างของแคโทดทั้งสอง (W) และระยะระหว่างขั้วอินตร่วมกับแคโทด (L) เพื่อดูผลของเอาท์พุทและความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก

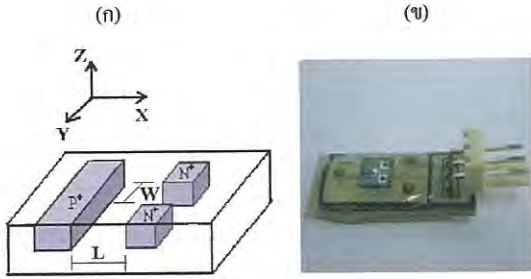
### 2. โครงสร้างและกระบวนการสร้าง

#### 2.1 โครงสร้าง

แมกนีโตไดโอดแบบคู่แสดงรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 1 (ก) เป็นโครงสร้างแมกนีโตไดโอดสองตัวแบบสามขาซึ่งมีขาอินตร่วมกัน โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดสามขา ซึ่งนำมาตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับกระแสไหลตามแนวนอน โดยที่ขาแคโทดสองขามีขนาดสมมาตรกันและ แยกออกจากกันซึ่งสร้างจากสารชนิดเอ็น ( $N^+$ ) มีจุดประสงค์ทำให้เกิดรอยต่อแบบอิมิตคอนแทก ส่วนขาอินตร่วมสร้างจากสารชนิดพี ( $P^+$ ) จุดประสงค์ให้เกิดรอยต่อ พีเอ็น ทั้งหมดสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น

ความสัมพันธ์ทางโครงสร้างอัตราส่วนออกแบบระหว่างระยะความกว้างของแคโทด (W) คือ  $50 \mu m$  และ  $60 \mu m$  และระยะของขั้วแคโทดกับอินตร่วม (L) คือ  $50 \mu m$  และ  $60 \mu m$  เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเอาท์พุท ( $\Delta I_D$ ) ของทั้งสอง มีผลต่อความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กส่วนรูปที่ 1 (ข) เป็นแมกนีโตไดโอดแบบคู่ที่สร้างและบรรจุเรียบร้อยแล้ว

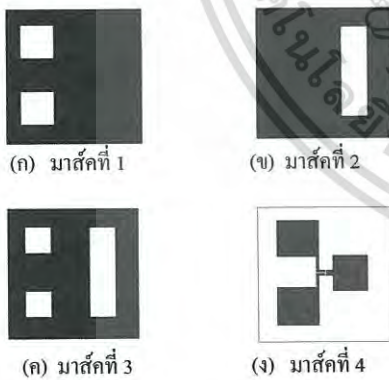
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 โครงสร้างเมมโมรีไดโอดแบบคู่

2.2 กระบวนการสร้าง

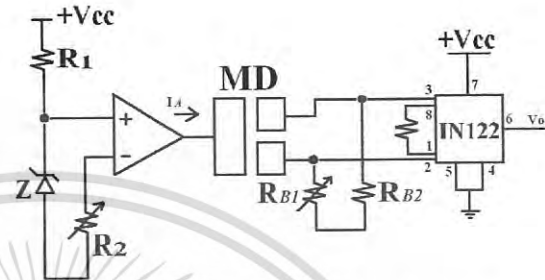
จุดประสงค์สำหรับกระบวนการสร้างเมมโมรีไดโอดแบบคู่ แสดงได้ดังรูปที่ 2 เริ่มต้นจากฐานรองใช้แผ่นฟิล์มซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ค่าสภาพความต้านทาน 19-25 Ω-cm ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น มีความหนาประมาณ 400 μm ใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีและทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสทำให้เกิดบริเวณเอ็น มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือ  $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  โดยใช้มาสก์ที่ 1 ทำการเปิดช่องออกไซด์และ แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส เพื่อสร้างรอยต่อโอมิก ( $n^+$ ) ให้กับขั้วแคโทดซึ่งจะมีสองรอยต่อที่สมมาตรกัน ต่อจากนั้นใช้มาสก์ที่ 2 ทำการเปิดช่องออกไซด์ที่ใช้สำหรับสร้างรอยต่อ พีเอ็น โดยการแพร่สารเจือโบรอน ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ  $N_A = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ได้ส่วนแอนโนด ( $p^+$ ) ส่วนมาสก์ที่ 3 คือมาสก์คอนแทก เป็นลวดลายค้นแบบที่ใช้ในการเปิด ช่องบริเวณที่จะสร้างขั้วสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม กับสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสุดท้ายมาสก์ที่ 4 ใช้สำหรับกระบวนการโลหะ เพื่อสกัดชั้นอะลูมิเนียม เฉพาะส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2 จุดประสงค์ใช้สำหรับกระบวนการสร้างเมมโมรีไดโอดแบบคู่

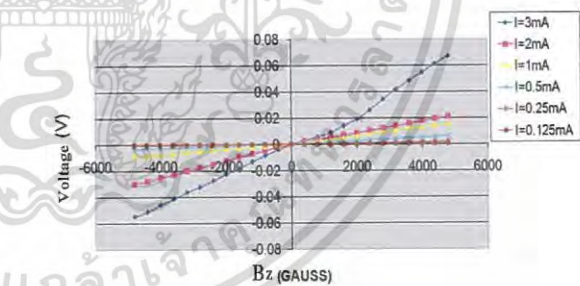
3. การทดลองและผลการทดลอง

วงจรที่ใช้วัดทดลองของเมมโมรีไดโอดแสดงดังรูปที่ 3 เป็นการไบอัสกระแสให้แก่อานโนด  $I_A$  โดยใช้วงจรแหล่งจ่ายกระแสแสดงที่โดยที่ขาแคโทดทั้งสองต่อกับขั้วอินพุทของวงจรวัดขยายแรงดัน แรงดันออปเซ็คตสามารถเป็นศูนย์ได้โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน  $R_{B1}$  และ  $R_{B2}$  ซึ่งความแตกต่างระหว่างกระแสอานโนดและแคโทดถูกวัดอยู่ในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า ( $V_o$ )



รูปที่ 3 วงจรการวัดทดลองของเมมโมรีไดโอด

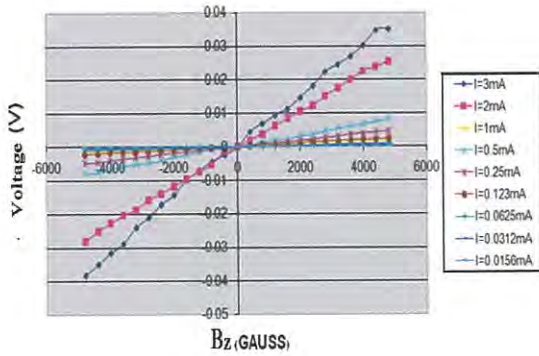
รูปที่ 4 แสดงผลการทดลองและการตอบสนองของสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ที่โครงสร้างแบบรอยต่อพีเอ็น ที่ระยะ  $L = 50 \mu\text{m}$  และ  $W = 50 \mu\text{m}$  ที่กระแสการทำงาน  $I_A = 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 3 \text{ mA}$  ที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้นกับสนามแม่เหล็กและเมื่อกระแสที่จ่ายให้กับอุปกรณ์มีการเพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่าความไว (Sensitivity) มากขึ้น จากรูปที่ 4



ค่าความไวมีค่า 140 mV/T ที่กระแส 3 mA

รูปที่ 4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก และแรงดันที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด

รูปที่ 5 แสดงผลการทดลองและ การตอบสนองสนามแม่เหล็ก  $B_z$  ที่โครงสร้างแบบรอยต่อพีเอ็น ที่ระยะ  $L = 60 \mu\text{m}$   $W = 60 \mu\text{m}$  เมื่อให้การกระแสเพิ่มขึ้นก็ยังคงทำให้ค่าความไวเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากรูปที่ 5 ค่าความไวมีค่า 70 mV/T ที่กระแส 3 mA

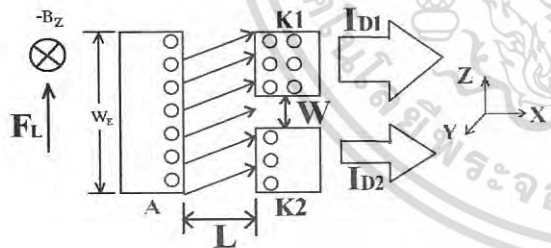


รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและแรงดันที่กระแสค่าต่างๆที่จ่ายให้กับวงจรวัด

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากวงจรอินเตอร์เฟสสำหรับการวัดแสดงในรูปที่ 3 กระแสคงที่ถูกต้องเข้ากับขั้วเอาโนดผ่านไปแคโทด ตัวต้านทาน  $R_{B1}$  และ  $R_{B2}$  เป็นตัวปรับค่ากระแสให้เกิดความสมดุลที่เอาพุท เพื่อให้มีค่าเป็นศูนย์ในขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก

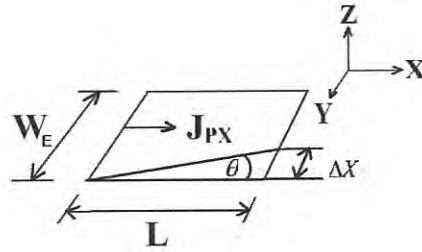
จากรูปที่ 6 เป็นการเบี่ยงเบนพาหะโดยแรงลอเรนซ์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศทาง  $-Z$  จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ เคลื่อนที่ในทิศทาง  $-Y$  กระแสที่ขั้วแคโทดทั้งสองนั้นจะเกิดความไม่สมดุลขึ้น ทำให้กระแส  $I_{D1}$  มีค่าความหนาแน่นมากกว่ากระแส  $I_{D2}$  ในทางกลับกันเมื่อมีสนามแม่เหล็กวิ่งผ่านในทิศ  $Z$  แรงลอเรนซ์ก็จะเคลื่อนที่ในทิศทาง  $Y$  เมื่อเกิดแรงลอเรนซ์จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส ความหนาแน่นของกระแส  $I_{D2}$  มีค่ามากกว่ากระแส  $I_{D1}$  เช่นกัน



รูปที่ 6 การเบี่ยงเบนพาหะ Hall โดย Lorentz force

กลไกการเบี่ยงเบนพาหะโฮลของเมกนีโตไดโอดแบบคู่สามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 7 กระแสไดโอดที่เพิ่มขึ้นกับค่าความไวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการฉีดพาหะโฮลที่มีมากขึ้นที่กระแสสูงขึ้นและเป็นสัดส่วนกับการเบี่ยงเบนพาหะโฮล แม้การฉีดพาหะจะมีทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสไปข้างหน้า แต่จะมีพาหะโฮลเท่านั้นที่มีผลต่อเอาพุท อัตราส่วนของอิเล็กตรอน และโฮลสามารถควบคุมได้จากความเข้มข้นของสารเจือชนิดพีและ ชนิดเอ็น พาหะโฮลที่ถูกฉีด

จาก เอาโนด ( $p^+$ ) ไปยังแคโทด ( $n$ ) มีค่าเบี่ยงเบนด้วยมุมหักเห  $\theta$  เนื่องจากแรงลอเรนซ์กับสนามแม่เหล็ก  $B_z$



รูปที่ 7 พื้นที่ของการเบี่ยงเบนพาหะ (Hole)

กระแสเอาโนด  $I_D$  คือ ผลรวมกันของกระแส  $I_{D1}$  และ  $I_{D2}$  สามารถแสดงในสมการที่ 1

$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \tag{1}$$

กระแสเอาโนด  $I_D$  สามารถแสดงอยู่ในเทอมของปริมาณความหนาแน่นของโฮลดังสมการที่ 2

$$I_D = J_{PX} W_E \cdot d \tag{2}$$

เมื่อ  $d$  คือ ความลึกรอยต่อเอาโนดของ  $p^+$ ,  $W_E$  คือ ความกว้างของอิมิเตอร์ มุมความแตกต่างสามารถเขียนสมการโดยใช้มุมฮอลล์

$$\tan \theta = \mu_p B_z \tag{3}$$

เมื่อ  $\mu_p$  คือ การเคลื่อนที่ของโฮล และ  $B_z$  คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก การขาด  $\Delta x$  สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\Delta x = L \cdot \mu_p \cdot B_z \tag{4}$$

เมื่อ  $L$  คือความยาวระหว่างแคโทดทั้งสอง กระแสเอาพุทคือความแตกต่างของกระแสไดโอด ( $\Delta I_D$ ) จากสมการ (3) และ (4) กระแสเอาพุทสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta I_D = J_{PX} W_E \cdot L \cdot \tan \theta \tag{5}$$

ความสัมพันธ์ของสมการความไวและความไวสัมบูรณ์สามารถเขียนแสดงได้ดังสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D B_z} \tag{6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_A = \frac{V_o}{\Delta B} \quad (7)$$

โดยที่  $V_o$  คือ ความแตกต่างแรงดันเอาพุตเนื่องจากค่าความแตกต่างของกระแส  $\Delta I_D$  ที่เกิดจากการเบี่ยงเบนพาหะโดยตรง

#### 4. สรุป

แมกนีโตไดโอดแบบใหม่ได้ถูกนำเสนอ โดยมีโครงสร้างเป็นไดโอดรอยต่อพีเอ็นสองตัวที่มีขั้วเอาโนดร่วมกันและขั้วแคโทดแยกกัน อุปกรณ์แมกนีโตไดโอดนี้เป็นอุปกรณ์สามขาทำงานโดยการไบอัสไปข้างหน้า อาศัยหลักการเบี่ยงเบนของพาหะที่เกิดจากแรงลอเรนซ์ที่เหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก แมกนีโตไดโอดนี้สามารถตรวจจับสนามไฟฟ้าในแนวตั้งหรือตั้งฉากกับพื้นผิวอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณการเบี่ยงเบนพาหะหรือกระแส และระยะทางการเบี่ยงเบน โครงสร้างไดโอดแบบนี้สามารถสร้างและใช้งานได้ง่ายเหมือนอุปกรณ์ไดโอดปกติทั่วไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนงานการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณวีระ เจริญจันทร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความแนะนำปรึกษา ขอขอบคุณ นายเมธา ศรีอยเกลียว นายชัชวฤทธิ์ ตั้งอมรฤทธิกุล นายอนุภาพ มาตรมุล นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มีส่วนช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lj. Ristic, M.T. Doan, M. Paranjape, ' 2-D integrated magnetic Field sensor in CMOS technology,' Circuit Syst (1989) 701-704.
- [2] Agnes Nagy, Hector Trujillo, "3D magnetic-field sensor using only a pair of terminals."Sensors and ActuatorsA,58(1997)137-140.
- [3] R.S. Popovic, "The Vertical Hall-Effect Device." IEEE Electron Devices Lett, vol. EDL-5,pp.357-358.1984.
- [4] Henry p. Baltes, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensor," IEEE Trans. Electron Device, vol.74, pp.315-317, no8, 1986.
- [5] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated Magnetic Sensor," Sensors and Actuators, vol.35, pp.21-23, 1990.
- [6] H.P. Baltes, R.S. Popovic, Integrated semiconductor magnetic field sensors, Proc, IEEE 74 (8) (1986) 1107-1132.
- [7] H. Pfeleiderer, "Magnetodiode model," Solid-State Electron., vol.15 p. 335, 1972.

- [8] O.S. Lutes, P.S. Nussbaum, and O.S. Aadland, "Sensitivity limit in SOS magnetodiodes," IEEE Trans, Electron Devices, vol. Ed-27, p.68, 1979.
- [9] A. Mohaghaegh, S. Crjstoloveanu, and J. De Poncharra, "Double-injection phenomena under magnetic field in SOS films: A new generation of magnetosensitive microdevices," IEEE Trans. Electron Devices., vol. ED-28, p. 237,1981.



#### ประวัติผู้เขียนบทความ

นายสุเมธ จันทร์แถมแก้ว ปริญญาตรี วศบ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิชาเขตกรรม ปัจจุบันกำลังศึกษา ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

|                  |  |
|------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล     | นาย สุเมธ จันทรแกมแก้ว   |
| วัน เดือน ปีเกิด | 6 พฤศจิกายน 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ  |
| ที่อยู่          | 3/10306 ถ.พหลโยธิน 30 แขวงจันทระเกษม เขตจตุจักร จังหวัด<br>กรุงเทพฯ 10900                        |
| ประวัติการศึกษา  | 2547 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยี<br>พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |

### ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. June 2005 to November 2009 working in Fuji Film (Thailand) Company Limited is position After Sales Service Engineer
2. October 2009 to April 2011 working in EDL Company Limited is position Process and Maintenance Engineer
3. April 2011 to Present working in Cleatpack (Thailand) Co.,Ltd company is position Service Engineer (in project Engineer)
4. สุเมธ จันทรแกมแก้ว, เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล “แมกนีโตไดโอดแบบคู่” ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 32 (EECON-32) 28-30 ตุลาคม 2552 PW102
5. Toempong Phetchakul, Sumet junkaemkaew “Dual Magnetodiode” IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems February 20-23, 2011,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้