



**รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2558**

**เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้าง MSM (โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ)**

**MSM (Metal-semiconductor-metal) Magnetic sensor**

**รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**30 กันยายน 2559**



T145329

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2558

เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้าง MSM (โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ)

MSM (Metal-semiconductor-metal) Magnetic sensor

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สนับสนุนโดย สำนักบริหารโครงการวิจัยส่งเสริมการวิจัย  
ในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ  
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ในการเอื้อเฟื้อเครื่องมือวิจัยและห้องปฏิบัติการ ขอขอบคุณนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมดุขุภัณฑ์และนักศึกษาระดับมหาบัณฑิตหลักสูตรไมโครอิเล็กทรอนิกส์การวิจัย และการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งในการสนับสนุน ส่งเสริมและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยที่สามารถได้ทำการวิจัยในครั้งนี้



รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้าง MSM (โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ)  
แหล่งเงิน สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ  
ประจำปีงบประมาณ ..... 2558 ..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 400,000 บาท  
ระยะเวลาทำการวิจัย ..... 2 ..... ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2559  
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการวิจัยสร้างอุปกรณ์เซนเซอร์ที่มีโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่สามารถตรวจจับแสงและสนามแม่เหล็กภายในตัวเดียวกัน โดยการออกแบบอย่างพิเศษทำให้อุปกรณ์ยังคงสามารถตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตามปกติแต่จะมีคุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติมที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ โดยโครงสร้างรอยต่อข้อต่อด้านหนึ่งจะถูกออกแบบให้มีคอนแทคแยกกันเพื่อที่จะทำให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ อุปกรณ์นี้ทำงานด้วยกระแสอิมิต์วย้อนกลับและผลตอบสนองของสนามแม่เหล็กจะได้จากความแตกต่างของกระแสระหว่างคอนแทคอีกทีหนึ่งซึ่งถูกฉีดมาจากโลหะอีกด้านหนึ่งที่ถูกรงกระทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของกระแสไปยังโลหะอีกด้านหนึ่ง จากการศึกษาที่ได้อุปกรณ์สามารถที่จะแสดงความแตกต่างของกระแสเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้ และมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น อุปกรณ์ที่ทำการวิจัยนี้ถือเป็นอุปกรณ์มัลติเซนเซอร์ที่ตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะเป็นตัวแรก

คำสำคัญ : เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก, เซนเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, MSM, มัลติเซนเซอร์, อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

**Research Title: MSM (Metal-semiconductor-metal) Magnetic sensor**

**Researcher: Associate Professor Dr. TOEMPONG PHETCHAKUL**

**Faculty: Faculty of Engineering.....Department: Electronics Department**

## **ABSTRACT**

This research presents the MSM structure magnetic detector device that normally detects the electromagnetic wave. The device is special design for magnetic field detector and still detects the electromagnetic wave as normal function. The schottky diode with the split contacts structure allows us to reach this target. The device operates with the saturation current and the magnetic response is the current difference between two contacts which is injected from one metal and deflected in semiconductor toward to another metal. From the study result, the device shows the current difference between the two contacts from the magnetic field that relates linearly. This device is the first MSM multi-sensor for magnetic and electromagnetic wave detector.

**Keywords : Magnetic sensor, Electromagnetic sensor, MSM, Micro sensor, Semiconductor device**

## สารบัญ

|                                                                      | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                 | I    |
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                 | II   |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                              | III  |
| สารบัญ.....                                                          | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                                     | VII  |
| สารบัญภาพ.....                                                       | VIII |
| สัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย.....                               | XI   |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                    | 1    |
| 1.1 พื้นฐานแนวคิด.....                                               | 1    |
| 1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา แนวทางความคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย..... | 2    |
| 1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย(Objective).....                    | 3    |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย (Materials & Method).....                     | 4    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                   | 5    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                           | 6    |
| 2.1 รอยสัมผัส肖ตกี (Schottky Junction).....                           | 6    |
| 2.1.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัส肖ตกี.....                                  | 6    |
| 2.1.2 กลไกการเกิด肖ตกี.....                                           | 7    |
| 2.1.3 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง.....                                | 9    |
| 2.1.4 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....                           | 10   |
| 2.1.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกี.....                  | 11   |
| 2.1.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกี.....            | 12   |
| 2.2 โฟโตไดโอดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM Photodiode).....            | 13   |
| 2.2.1 โครงสร้าง และหลักการทำงาน.....                                 | 14   |
| 2.2.2 โฟโตไดโอด MSM ขณะสมดุล.....                                    | 16   |
| 2.2.3 โฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....                        | 16   |
| 2.2.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัส.....            | 17   |
| 2.2.5 MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ.....                                   | 17   |
| 2.2.6 สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM.....                        | 20   |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.6.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด (Dark current: $I_{dark}$ )                                  | 20 |
| 2.2.6.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด (Photo current: $I_{photo}$ )                                | 20 |
| 2.2.6.3 สมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM                                          | 21 |
| 2.3 แมกนีโตไดโอด                                                                          | 23 |
| 2.3.1 โครงสร้างและการใช้งานอุปกรณ์                                                        | 23 |
| 2.3.1.1 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่ (Structure of Dual Cathodes Magnetodiode) | 23 |
| 2.3.1.2 วิธีการไบอัสแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่                                           | 24 |
| 2.3.2 หลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่                                          | 26 |
| 2.3.3 การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่                                      | 27 |
| 2.3.4 โครงสร้างของซีดกึ่งแมกนีโตไดโอด (Structure of Schottky Magnetodiode)                | 30 |
| 2.3.5 วิธีการไบอัสซีดกึ่งแมกนีโตไดโอด                                                     | 31 |
| 2.3.6 หลักการทำงานของซีดกึ่งแมกนีโตไดโอด                                                  | 31 |
| 2.3.7 การเบี่ยงเบนพาหะซีดกึ่งแมกนีโตไดโอด                                                 | 33 |
| 2.4 กระบวนการสร้างซีดกึ่งแมกนีโตไดโอด (Magnetotransistor fabrication process)             | 37 |
| 2.4.1 การออกแบบกระจกต้นแบบ (Mask Design)                                                  | 37 |
| 2.4.2 กระบวนการสร้างซีดกึ่งแมกนีโตไดโอด                                                   | 40 |
| 2.4.2.1 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxide)                                                | 40 |
| 2.4.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วแคโทด (Cathode Information)                              | 41 |
| 2.4.2.3 ขั้วโลหะ (Contact information)                                                    | 42 |
| 2.4.2.4 ขั้วโลหะเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก (Pad)                                         | 44 |
| บทที่ 3 การจำลองแบบและกระบวนการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์                                   | 47 |
| 3.1 บทนำ TCAD                                                                             | 47 |
| 3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)                                      | 47 |
| 3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)                    | 48 |
| 3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD                                                               | 49 |
| 3.2.1 Sentaurus Workbench (SWB)                                                           | 50 |
| 3.2.2 Sentaurus Process (sprocess)                                                        | 51 |
| 3.2.3 Sentaurus Structure Editor                                                          | 51 |
| 3.2.4 Sentaurus Device                                                                    | 55 |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                    | หน้า      |
|----------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.4.1 File.....                                  | 56        |
| 3.2.4.2 Electrode.....                             | 57        |
| 3.2.4.3 Physics.....                               | 58        |
| 3.2.4.4 Plot.....                                  | 58        |
| 3.2.4.5 Solve.....                                 | 59        |
| 3.2.5 Sentaurs Visual.....                         | 60        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....</b> | <b>61</b> |
| 4.1 หลักการออกแบบ.....                             | 61        |
| 4.2 การจำลองแบบและผลการจำลองแบบ.....               | 63        |
| 4.3 กลไกการทำงาน.....                              | 67        |
| 4.4 การสร้างอุปกรณ์.....                           | 68        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>    | <b>69</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....                            | 69        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                                | 69        |
| <b>รายงานสรุปการเงิน ประจำปีงบประมาณ 2558.....</b> | <b>70</b> |
| <b>เอกสารอ้างอิง.....</b>                          | <b>71</b> |
| <b>ภาคผนวก.....</b>                                | <b>73</b> |
| ภาคผนวก ก.....                                     | 74        |
| ภาคผนวก ข.....                                     | 79        |
| ภาคผนวก ค.....                                     | 80        |
| <b>ประวัตินักวิจัย.....</b>                        | <b>81</b> |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่                              | หน้า |
|---------------------------------------|------|
| 1 ระยะเวลาขั้นตอนการดำเนินวิจัย ..... | 4    |

## สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า                                                                                                                   |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1    | แถบพลังงานของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดเป็นรอยสัมผัสช็อคกี..... 7                                    |
| 2.2    | แถบพลังงานรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดเป็นรอยสัมผัสช็อคกี..... 8                                       |
| 2.3    | แถบพลังงานของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง..... 9                                              |
| 2.4    | แถบพลังงานของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ..... 11                                        |
| 2.5    | ลักษณะสมมติกระแส-แรงดันของช็อคกีไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น..... 11                                                  |
| 2.6    | ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี..... 12                                                               |
| 2.7    | ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีในเทอม $1/C^2$ ..... 13                                                |
| 2.8    | โฟโตไดโอด MSM..... 14                                                                                                  |
| 2.9    | โฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต..... 14                                                                    |
| 2.10   | ภาพตัดขวางของ MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิต..... 14                                                                |
| 2.11   | สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด MSM..... 15                                                                                      |
| 2.12   | สนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วของโฟโตไดโอด MSM..... 15                                                                            |
| 2.13   | แถบพลังงานโฟโตไดโอด MSM สภาวะสมดุลความร้อน..... 16                                                                     |
| 2.14   | โฟโตไดโอด MSM ขณะ ได้รับแรงดัน ไบอัส..... 14                                                                           |
| 2.15   | การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลเงื่อนไขให้<br>แสดงตกกระทบกรณีระยะห่างระหว่างขั้วกว้าง..... 19 |
| 2.16   | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ..... 21                                                 |
| 2.17   | ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM..... 21                                                                                    |
| 2.18   | ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM..... 22                                                                          |
| 2.19   | แสดงโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่แบบรอยต่อพี-เอ็น..... 24                                                    |
| 2.20   | การไบอัสแมกนีโตไดโอดระหว่างแอโนด (A) กับแคโทด 1 และแคโทด 2 (K1, K2)..... 25                                            |
| 2.21   | การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) เนื่องจากแรงลอเรนซ์..... 26                                                                  |
| 2.22   | พื้นที่การเบี่ยงเบนพาหะ(โฮล)..... 27                                                                                   |
| 2.23   | โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อช็อคกี..... 30                                                                        |
| 2.24   | การไบอัสช็อคกีแมกนีโตไดโอด..... 31                                                                                     |
| 2.25   | การเบี่ยงเบนของพาหะ(อิเล็กตรอน) เนื่องจากแรงลอเรนซ์..... 32                                                            |
| 2.26   | พื้นที่การเบี่ยงเบนพาหะ (อิเล็กตรอน)..... 33                                                                           |
| 2.27   | การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็ก..... 35                                                                     |
| 2.28   | การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว L ของอุปกรณ์ฮอลล์..... 36                                                             |

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                       | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 2.29 การลดลงของความยาว L ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า.....                                                     | 36   |
| 2.30 ลวดลายมาร์คคั่นแบบสำหรับใช้โน้กระบวนกรสร้างข้อตักแมกนีโตไดโอด.....                                                      | 39   |
| 2.31 กระจกคั่นแบบ.....                                                                                                       | 39   |
| 2.32 (ก) - (ข) แสดงขั้นตอนกรบวนกรสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....                                                              | 40   |
| 2.33 (ก) - (จ) แสดงขั้นตอนกรบวนกรสร้างขั้วแคโทด.....                                                                         | 41   |
| 2.34 (ก) - (จ) แสดงขั้นตอนกรบวนกรสร้างขั้วโลหะ.....                                                                          | 43   |
| 2.35 (ก) - (ง) แสดงขั้นตอนกรบวนกรสร้างขั้วโลหะ (ต่อ).....                                                                    | 44   |
| 2.36 (ก) - (ง) แสดงขั้นตอนกรบวนกรสร้างชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก.....                                              | 45   |
| 2.37 ข้อตักแมกนีโตไดโอดในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่นที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....                                                   | 46   |
| 2.38 การเชื่อมต่อโลหะสำหรับต่อใช้งานกับอุปกรณ์ภายนอก.....                                                                    | 46   |
| 3.1 การจำลองแบบกรบวนกรสร้าง.....                                                                                             | 48   |
| 3.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD.....                                                                   | 48   |
| 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....                                                       | 49   |
| 3.4 ภาพรวมของการจำลองโดย TCAD.....                                                                                           | 50   |
| 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Sentaurus Workbench.....                                                                             | 51   |
| 3.6 การยิงฝั่งประจุใน Sentaurus Process.....                                                                                 | 52   |
| 3.7 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor.....                                                                            | 53   |
| 3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor.....                                                                          | 54   |
| 3.9 หน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน.....                                                                      | 54   |
| 3.10 การจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างเมส.....                                                                               | 55   |
| 3.11 แผนผังไฟลีนพทุและเอาท์พุทใน Sentaurus Device.....                                                                       | 57   |
| 3.12 หน้าต่างของ Sentaurus visual.....                                                                                       | 60   |
| 4.1 แผนภาพด้านบนของอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก<br>โครงสร้างMSM.....                              | 62   |
| 4.2 แผนภาพโมเดลการจำลองแบบอุปกรณ์เซนเซอร์.....                                                                               | 63   |
| 4.3 แผนภาพแถบพลังงานและทิศทางการกระแสแสงอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นขณะที่ไบแอส<br>โครงสร้าง MSM ระหว่างขั้วแอนโนดและคาโทด..... | 63   |
| 4.4 แสดงวงจรวัดในการศึกษาคุณสมบัติตรวจจับสนามแม่เหล็ก.....                                                                   | 64   |
| 4.5 การกระจายความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์ขณะที่ให้สนามแม่เหล็ก.....                                                            | 65   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างกระแส $\Delta I_D$ กับความเข้มข้นแม่เหล็ก<br>และทิศทาง..... | 66   |
| 4.7 กลไกการทำงานของอุปกรณ์ซึ่งได้รับสนามแม่เหล็ก.....                                                 | 67   |
| 4.8 ตัวอย่างอุปกรณ์โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างซีมอส.....                             | 68   |

สัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

| สัญลักษณ์และคำย่อ | ความหมาย/คำอธิบาย      |
|-------------------|------------------------|
| $\phi$            | Work function          |
| $E$               | Energy                 |
| $\chi$            | Electron affinity      |
| $I$               | current                |
| $q$               | Electron charge        |
| $A$               | Area                   |
| $R$               | Richardson constant    |
| $k$               | Boltzman's constant    |
| $T$               | Temperature            |
| $W$               | Width                  |
| $C$               | Capacitance            |
| $V$               | Voltage                |
| $\epsilon$        | Permittivity           |
| $N$               | Doping concentration   |
| $L$               | Length                 |
| $d$               | Depth                  |
| $R$               | Resistance             |
| $J$               | Current density        |
| $B$               | Magnetic field density |
| $\mu$             | Mobility               |
| $\theta$          | Angle                  |
| $\Delta$          | Diffrence              |

# บทที่ 1

## บทนำ

อุปกรณ์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อระหว่างโลกที่แวดล้อมเรากับโลกแห่งอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์เซนเซอร์จึงมีหลายประเภทตามปริมาณแวดล้อมที่มีอยู่ ไม่ว่าจะเป็นเซนเซอร์ประเภทอะไรต่างมีความสำคัญเท่าเทียมกันทั้งหมด ถ้าหากขาดอุปกรณ์เซนเซอร์แล้ว แทบจะทำให้การประยุกต์ใช้งานในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกแขนงเกือบจะทำได้ หรือมีวงจำกัดอย่างมากและโลกเราคงจะไม่ก้าวหน้าอย่างที่เห็นทุกวันนี้ งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอุปกรณ์เซนเซอร์ประเภทหนึ่งที่สามารถที่จะตรวจจับปริมาณพลังงานได้สองประเภทคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานของเซนเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 1.1 พื้นฐานแนวคิด

แมกนีโตไดโอดเป็นเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดหนึ่งมีโครงสร้างเป็นไดโอดที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ ในช่วงแรก ๆ ของการวิจัยมีโครงสร้างเป็นฟิล์มบางเพื่อที่ทำให้พาหะ (อิเล็กตรอนและโฮล) เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้ามีการกระเจิง(scattering) ไปชนกับพื้นผิวฟิล์มบางทั้งด้านบนและพื้นผิวด้านล่างซึ่งมีอัตราการรวมตัวพาหะที่พื้นผิวที่แตกต่างกันมาก ในสภาพปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจะมีแรงดันตกคร่อมค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นแรงดันในช่วงการทำงานไปข้างหน้า แต่เมื่อได้รับสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับกระแส ทำให้พาหะทั้งสองถูกแรงผลักไปในพื้นผิวด้านใดด้านหนึ่งมากเป็นพิเศษ ทำให้มีผลต่อแรงดันตกคร่อมไดโอด ถ้าแรงผลักพาหะจากสนามแม่เหล็กผลักไปทางพื้นผิวที่มีการรวมตัวพาหะสูงจะทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่ามากขึ้นแปรตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ในทางตรงข้ามถ้าแรงผลักเนื่องจากสนามแม่เหล็กผลักไปที่ผิวที่มีการรวมตัวพาหะน้อย จะทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าน้อยลงแปรผันตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก แต่อย่างไรก็ตามแมกนีโตไดโอดไม่เป็นที่นิยมเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ฮอลล์ทั้งนี้เพราะว่าโครงสร้างสร้างยากโดยเฉพาะพื้นผิวการรวมตัวของพาหะที่ไวต่อกระบวนการสร้าง ทำให้เมื่อทำเป็นอุปกรณ์มีคุณสมบัติพื้นผิวการรวมตัวไม่คงที่เหมือนเดิมทุกครั้งและเป็นสาเหตุให้แมกนีโตไดโอดไม่เป็นที่นิยมจนถึงปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้นำเสนอแมกนีโตไดโอดแบบคู่ (Dual magnetodiode) เป็นการทำในโหมดกระแสอาศัยการเลี้ยวเบนของพาหะจากสนามแม่เหล็กและมีโครงสร้างแบบไดโอดที่ชักันปกติ ทำให้สามารถสร้างได้ง่ายทั้งวงจรรวมแบบไบโพลาร์และแบบมอสเฟต มีผลตอบสนองที่เป็นเชิงเส้น ราคาถูก โครงสร้างนี้ทำให้แมกนีโตไดโอดกลับมาเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจ

โครงสร้าง MSM (metal-semiconductor-metal) เริ่มต้นจากการนำมาสร้างเป็นโฟโตนิกดีเทคเตอร์ โดยมากใช้กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เป็นสารประกอบมีค่าความคล่องตัวของพาหะสูงสร้างบนแผ่นฐานที่เป็นฉนวน โครงสร้างประกอบด้วยขดกึ่งไดโอดจากโลหะและสารกึ่งตัวนำต่อหน้าหลังชนกัน การให้ไบแอสเป็นแบบไม่มีขั้วให้ทิศทางใดก็ได้ซึ่งสุดท้ายจะทำให้ไดโอดตัวหนึ่งได้รับไบแอสไปข้างหน้าและอีกตัวจะไบแอสแบบย้อนกลับ ข้อดีของโครงสร้างนี้คือสร้างง่าย สร้างกับเทคโนโลยีมอสเฟตและทุกเทคโนโลยีได้เป็นอย่างดี กินพลังงานต่ำและมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ในกรณีที่ใช้ตรวจจับแสงทำให้มีการตอบสนองที่เร็ว แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้ยังใช้อยู่กับโฟโตนิกดีเทคเตอร์เป็นส่วนมากหรือเกือบทั้งหมด

วงจรรวมยุคใหม่มักกินพลังงานต่ำ มีความซับซ้อนสูงแต่อุปกรณ์มีขนาดเล็ก การกินพลังงานต่ำทำให้ใช้แรงดันไฟเลี้ยงที่ต่ำทำให้การประมวลสัญญาณอยู่ในรูปกระแสแทน เพราะวาระดับแรงดันต่ำถูกจำกัดและมีช่วงแคบ แต่การปริมาณกระแสไม่ได้ถูกจำกัดเหมือนแรงดันทำให้วงจรรวมประเภทนี้เป็นโหมดการทำงานแบบกระแส อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้องทำงานในโหมดกระแสหรือต้องใช้งานโหมดกระแส ในวงจรรวมมักต้องมีอุปกรณ์ภาครับสัญญาณจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่เป็นสัญญาณเชิงฟิสิกส์และเคมี อุปกรณ์ที่ตรวจจับสัญญาณได้แก่อุปกรณ์เซนเซอร์ ซึ่งเซนเซอร์สนามแม่เหล็กมักจะใช้อุปกรณ์ฮอลล์ที่ทำงานในโหมดแรงดัน โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีการทำงานในโหมดกระแส สามารถใช้ได้ทั้งรอยต่อพีเอ็นกับรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ นอกจากนั้นยังสามารถทำงานในการไบแอสทิศทางย้อนกลับ

การออกแบบอุปกรณ์เพื่อผสมผสานข้อดีของอุปกรณ์เข้าด้วยกันทำได้ก็ต่อเมื่อมีจุดร่วมที่มีความคล้ายกัน ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้าง วัสดุ กลไกการทำงาน งานวิจัยแมกนีโตไดโอดและโครงสร้าง MSM ต้องการทำให้อุปกรณ์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นโครงสร้างที่สร้างง่าย ทนทาน ใช้งานง่าย มีผลตอบสนองที่ดี สามารถใช้งานร่วมกับวงจรรวมและใช้แบบอุปกรณ์เดี่ยวได้ นอกจากนั้นโครงสร้างดังกล่าวยังไม่มีผู้เคยวิจัยมาก่อน เนื่องจากไม่มีโครงสร้างและกลไกการทำงานที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างที่ผู้วิจัยประดิษฐ์ขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สูง

## 1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา แนวความคิดที่นำมาใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบการวัดการตรวจจับ ระบบการควบคุมทุกชนิด เป็นตัวแปลงสัญญาณสภาพแวดล้อมรอบตัวที่เป็นปริมาณเชิงเคมีและฟิสิกส์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือปริมาณเชิงไฟฟ้าเช่นกระแส แรงดัน ค่าความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า เพื่อสะดวกที่จะนำไปประมวลต่อไปในการควบคุมต่างๆ อุปกรณ์เซนเซอร์จึงเป็นอุปกรณ์แรกๆที่ติดต่อกับสภาพแวดล้อมภายนอกทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับโลกภายนอกได้ เราสามารถแบ่งประเภทของอุปกรณ์เซนเซอร์ตามประเภทพลังงานที่ตรวจจับได้แก่ พลังงานความร้อน พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานเคมี พลังงานแม่เหล็ก ซึ่งอุปกรณ์เซนเซอร์ทุกประเภทจึงมี

ความสำคัญและมีการพัฒนาตลอดเวลา ในการพัฒนาสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ได้แก่ การพัฒนาตัวอุปกรณ์เช่นเซอริโดยตรง และการพัฒนาฟังก์ชันให้สามารถทำงานได้สะดวกมากขึ้นหรือให้เหมาะกับงานที่เฉพาะเจาะจง

เซอริแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ผู้วิจัยมีความสนใจและมีประสบการณ์ในการวิจัย ได้พัฒนาโครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่วัดสนามแม่เหล็กที่แตกต่างจากที่มีอยู่ ได้ประยุกต์ใช้ในการตรวจจับแม่เหล็ก 3 ทิศทางจากโครงสร้างทรานซิสเตอร์ ได้พัฒนาและออกแบบใหม่สำหรับแมกนีโตไดโอดซึ่งใช้หลักการที่ทำงานง่าย มีความแน่นอนและความคงทนเหมือนไดโอดปกติ ซึ่งโครงสร้างที่พัฒนาใช้งานง่ายกว่าหลักการทำงานแมกนีโตไดโอดแบบที่มีการวิจัยและนำเสนอเป็นอย่างมาก กระบวนการสร้างง่ายกว่าแบบดั้งเดิมมาก มีเสถียรภาพดีกว่ามากซึ่งแมกนีโตไดโอดแบบดั้งเดิมไม่มีความเสถียรและยากแก่การสร้างจึงไม่เป็นที่นิยมทำให้แมกนีโตไดโอดไม่มีการใช้แพร่หลายในท้องตลาดจนกระทั่งในปัจจุบัน ซึ่งการวัดสนามแม่เหล็กจึงนิยมใช้อุปกรณ์ฮอลล์จนถึงปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดแรงดัน สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีเมื่อใช้เป็นอุปกรณ์เซอริในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป แต่สำหรับอุปกรณ์กินพลังงานต่ำ แรงดันต่ำไม่สามารถที่จะใช้อุปกรณ์ในโหมดแรงดัน อุปกรณ์ที่เหมาะสมในการประมวลสัญญาณในวงจรถูกกินพลังงานต่ำและแรงดันต่ำต้องใช้อุปกรณ์ในโหมดกระแส

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือที่รู้จักกันทั่วไป MSM (metal-semiconductor-metal) เป็นโครงสร้างที่ใช้รอยต่อเรคตีไฟร์ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยต่อ การใช้งานโดยเริ่มต้นใช้กับเซอริแสงเพราะโครงสร้างง่าย การทำงานด้วยกระแสย้อนกลับอิ่มตัว (reverse saturation current) ทำให้กินพลังงานต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีผู้วิจัยและผลการวิจัยโครงสร้าง MSM มาใช้กับเซอริสนามแม่เหล็ก การใช้งานและการวิจัยยังจำกัดอยู่ในเซอริพลังงานแสงเป็นส่วนใหญ่ โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นทำงานในโหมดกระแส และได้พัฒนาประยุกต์เป็นโครงสร้างรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ สำหรับการกินพลังงานต่ำนั้นโครงสร้าง MSM ใช้กระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งโครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานในกระแสอิ่มตัวย้อนกลับได้และการให้พลังงานใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่แทนแหล่งจ่ายแรงดัน จากที่กล่าวข้างต้นว่า โครงสร้าง MSM ยังไม่มีนักวิจัยนำมาใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเพราะแมกนีโตไดโอดแบบดั้งเดิมทำงานในโหมดแรงดัน ดังนั้นความเป็นไปได้ที่โครงสร้างแมกนีโตไดโอดที่พัฒนาขึ้นจะสามารถตอบโจทย์วงจรรวมกินพลังงานต่ำแรงดันต่ำ โดยการประยุกต์กับโครงสร้าง MSM มีความเป็นไปได้สูงซึ่งสามารถใช้เป็นอุปกรณ์เดี่ยวและเป็นเซอริในวงจรรวมประมวลสัญญาณกระแสกินพลังงานต่ำแรงดันต่ำ

### 1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. สร้างนวัตกรรมเซอริตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
2. ต่อยอดงานวิจัยเดิม ประยุกต์และบูรณาการความรู้และศักยภาพภายในประเทศ
3. ผลิติดูบุคลากรในสาขาเซอริอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม



4. นำงานวิจัยเผยแพร่ในรูปแบบบทความและการประชุมวิชาการนานาชาติ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

1. รวบรวมศึกษาข้อมูลเพื่อนำไปสู่การออกแบบ
2. ตรวจสอบและเตรียมความพร้อมห้องปฏิบัติการ
3. ออกแบบและจำลองแบบเบื้องต้นและแก้ไข
4. นำแบบที่ได้ไปสร้างโฟโต้มาสต์
5. ทำการสร้างต้นแบบในห้องปฏิบัติการ
6. วัดและทดสอบอุปกรณ์ทางแสงและแม่เหล็ก
7. นำข้อมูลมาประมวลและสรุป
8. เผยแพร่ผลงานวิจัย
9. สรุปและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

ระยะเวลาทำการวิจัยภายในปีงบประมาณ( 1 ตุลาคม 2557- 30 กันยายน 2558) โดยขั้นตอนการวิจัยมีแผนการดำเนินการตามระยะเวลาดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 1 ระยะเวลาขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

| ขั้นตอนการดำเนินการ                      | งบประมาณปี 2558 |      |      |      |      |       |       |      |       |      |      |      |
|------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|
|                                          | ต.ค.            | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. |
| 1.รวบรวมศึกษาข้อมูลเพื่อนำไปสู่การออกแบบ | ←→              |      |      |      |      |       |       |      |       |      |      |      |
| 2.สำรวจและเตรียมความพร้อมห้องปฏิบัติการ  | ←→              |      |      |      |      |       |       |      |       |      |      |      |
| 3.ออกแบบและจำลองแบบเบื้องต้นและแก้ไข     |                 | ←→   |      |      |      |       |       |      |       |      |      |      |
| 4.นำแบบที่ได้ไปสร้างโฟโต้มาสต์           |                 |      |      |      | ←→   |       |       |      |       |      |      |      |
| 5.ทำการสร้างต้นแบบในห้องปฏิบัติการ       |                 |      |      |      |      | ←→    |       |      |       |      |      |      |



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เป็นพื้นฐานความคิดในงานวิจัยนี้โดยมีทฤษฎีหลักๆ ได้แก่ เซนเซอร์ แสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ และทฤษฎีแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อช็อตกี ซึ่งโครงสร้างทั้งสองเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการประดิษฐ์เซนเซอร์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

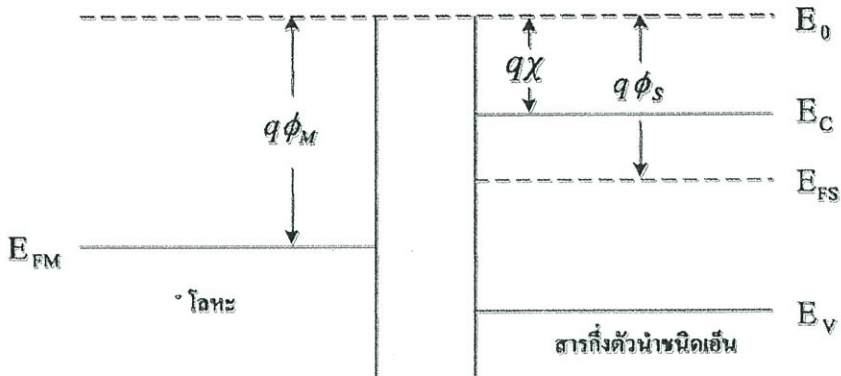
#### 2.1 รอยสัมผัสช็อตกี (Schottky Junction)

เนื่องจากแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคูลูมีโครงสร้างแบบรอยต่อช็อตกี อาศัยหลักการทำงาน พื้นฐานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานรอยต่อแบบช็อตกี เพื่อให้เข้าใจถึงการทำงานของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคูลูที่มีโครงสร้างแบบรอยต่อช็อตกีมากขึ้น

รอยสัมผัสที่เกิดจากโลหะกับสารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor Contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ รอยสัมผัสช็อตกี (Schottky Contact) หรือ เรคตีไฟร์ และรอยสัมผัสแบบโอห์มิก (Ohmic Contact) ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ภายใน และอุปกรณ์ภายนอกต่าง ๆ ซึ่งจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมาก ๆ โดยรอยสัมผัสโอห์มิกเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมระหว่างรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสช็อตกีเป็นรอยสัมผัสที่แสดงคุณสมบัติเรคตีไฟร์ซึ่งคล้ายกับไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียว ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นที่เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีเท่านั้น

##### 2.1.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสช็อตกี

แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังแสดงในรูปที่ 2.1 ระดับสุญญากาศ (Vacuum level :  $E_0$ ) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศที่ว่านี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดหนึ่งที่บริเวณภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะหรือสารของแข็งนั้นๆ



รูปที่ 2.1 แถบพลังงานของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นก่อนเกิดเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มี (Fermi level :  $E_{FM}$ ) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มีและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (Work function) ของโลหะเขียนแทนด้วยมีค่าดังสมการที่ 2.1 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมมติของสารแต่ละชนิดและมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง  $\phi_M$

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.1)$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ระดับเฟอร์มีจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ซึ่งฟังก์ชันของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย  $\phi_S$  มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มีดังสมการที่ 2.2

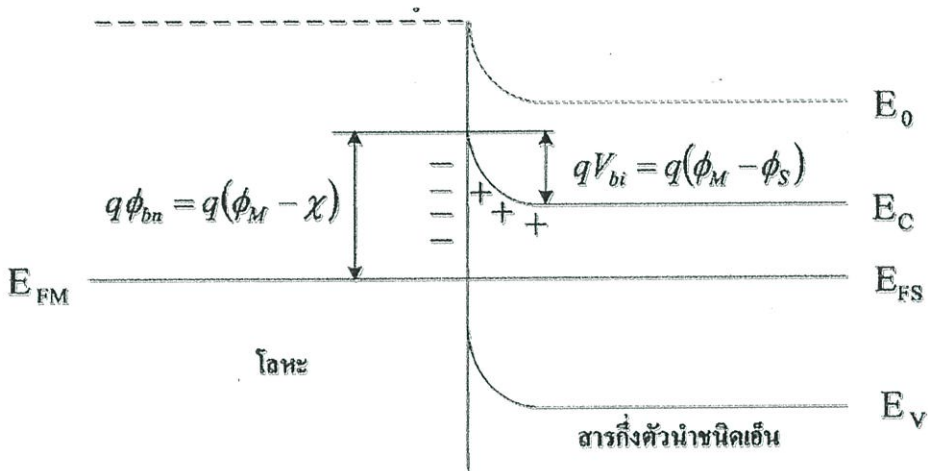
$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.2)$$

ส่วนความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity : ) เป็นสมมติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.05 V

### 2.1.2 กลไกการเกิดชนิดกึ่ง

การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $q\phi_M > q\phi_S$ ) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำจะอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มีของโลหะ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะอยู่บริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น

เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $\text{No}^+$ ) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านทานการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดเป็นรอยสัมผัสชนิดกึ่ง

ในภาวะสมดุลความร้อนระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (Potential barrier :  $V_{bi}$ ) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.3

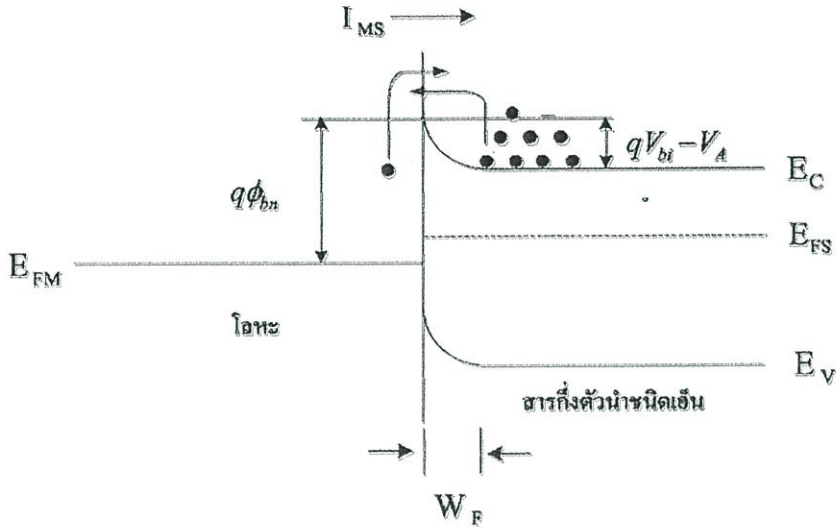
$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.3)$$

ส่วนความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะจะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ชนิดกึ่ง (Schottky barrier :  $\phi_m$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.4 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ กัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ชนิดกึ่งที่ต่างๆ กัน

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.4)$$

### 2.1.3 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส ( $V_A$ ) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่ง



รูปที่ 2.3 แถบพลังงานของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสตรง

ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น  $(V_{bi}-V_A)$  และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงข้อดักก็เข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงข้อดักมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรง ( $I_F$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.5

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส ( $\text{cm}^2$ )

R คือ ค่าคงตัวรีชาร์ดสัน (n-Si) มีค่า  $110 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$

$\phi_{bn}$  คือ ความสูงของกำแพงศักย์ข้อดัก

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$

$k$  คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K ,  $1.38 \times 10^{-23}$  (J/K)

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

#### 2.1.4 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.4 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi} + V_A)$  และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงข้อดักเข้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ (IR) มีค่าดังสมการที่ 2.6

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.6)$$

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width :  $W_d$ ) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ (2.7) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

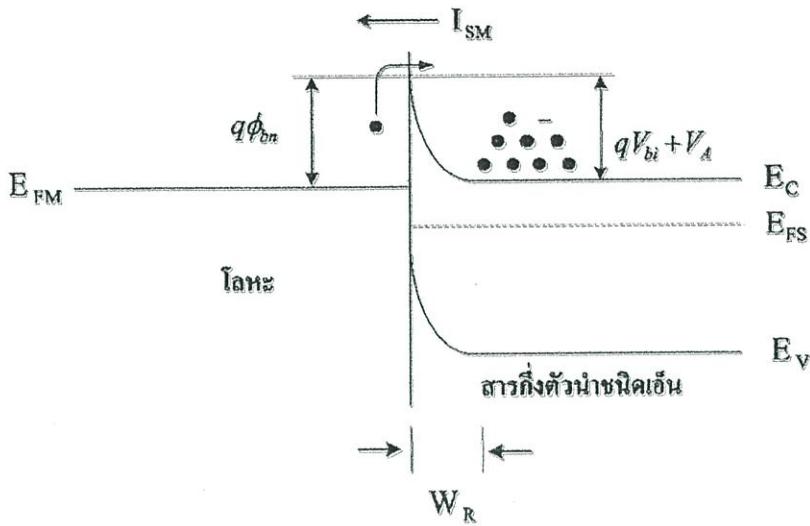
$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.7)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$N_D$  คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส

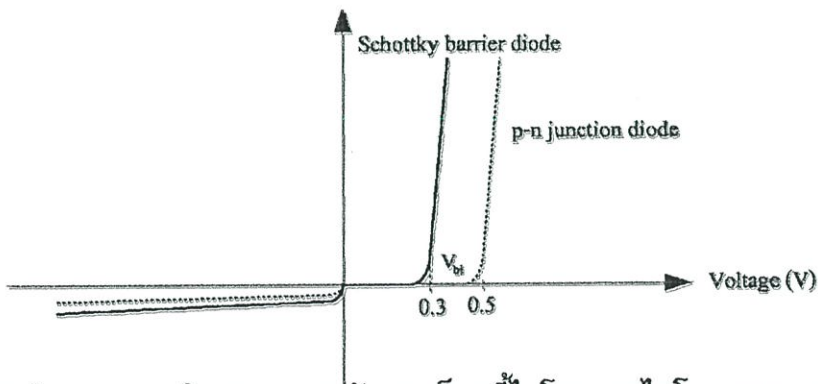


รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

### 2.1.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกี้

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดรอยต่อแบบพี-เอ็น คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.5

Current (A)



รูปที่ 2.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกี้ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

จากรูปพบว่าแรงดันภายในของช็อตกี้ไดโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่ว



ของซีดทีไดโอดมีค่าสูงกว่ารอยต่อแบบพี-เอ็น เป็นผลมาจากความไม่สมมาตรของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

### 2.1.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสซีดที

ค่าความจุไฟฟ้า (C) ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่แสดงดังรูปที่ 2.6 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส เห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ และมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.8

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W} = \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.8)$$

โดยที่  $N_D$  คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้

$W$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (CM)

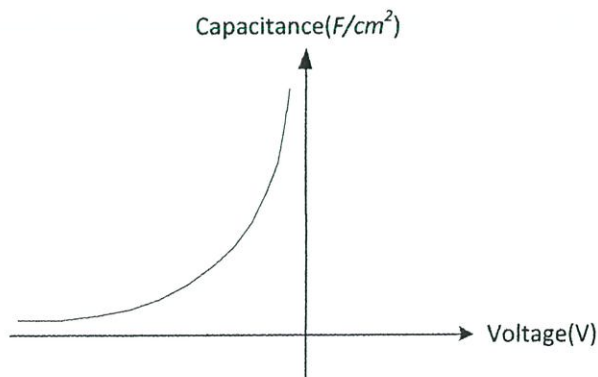
$A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัส ( $\text{cm}^2$ )

$\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$q$  คือ ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C

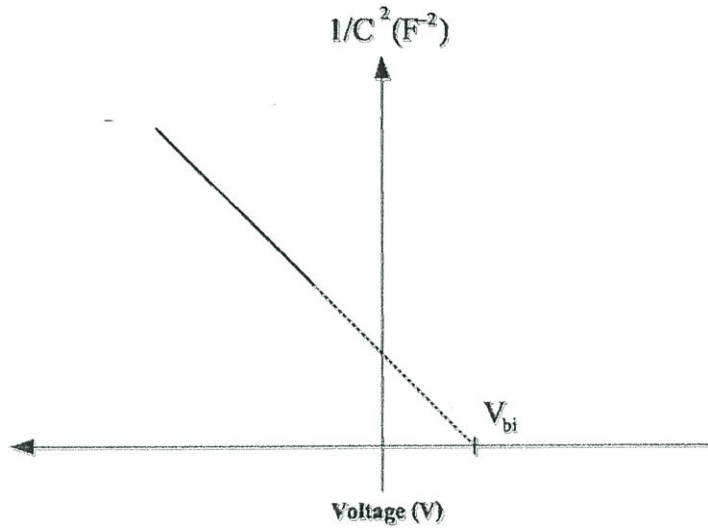
$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสซีดที

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2A(V_{bi} - V_A)}{q\epsilon_s N_D}$$



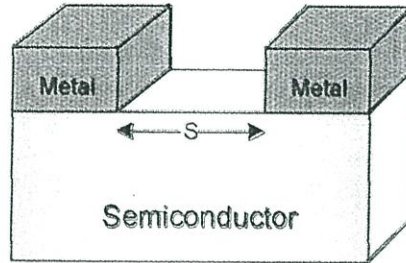
รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งในเทอม  $\frac{1}{C^2}$

ซึ่งลักษณะกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาตัวแปร ดังเช่นจากกราฟจะได้ค่าความชันมีค่าเท่ากับ  $\frac{2}{q\epsilon_s N_D}$  ทำให้สามารถหาค่าความเข้มข้นสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นได้และที่จุดตัดแกน X ของกราฟจะทราบค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสชนิดกึ่งจากความสัมพันธ์ของกราฟดังรูปที่ 2.7

## 2.2 โฟโตไดโอดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM Photodiode)

โฟโตไดโอด MSM ถูกนำเสนอโดย Slavman และ Figueroa และ Wei et al ในปี 1981 โฟโต ไดโอดชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่สร้างได้ง่าย การตอบสนองรวดเร็ว ความจุไฟฟ้าต่ำ และมีพื้นที่แอคทีฟขนาดใหญ่ โฟโต ไดโอด MSM เป็นที่รู้จักกันดี ในชื่อของ โฟโต ไดโอดโลหะ- สารกึ่งตัวนำ -โลหะ (Metal-semiconductor-Metal) ที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสำหรับรับแสงอยู่ระหว่างขั้วโลหะสองขั้ว ดังแสดงดังรูปที่ 2.8 รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรอยสัมผัสแบบชนิดกึ่ง ซึ่งรอยสัมผัสลักษณะนี้ จะป้องกันการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไม่ให้ไหลมายังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 2.1 ส่วนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะเกิดขึ้นขณะแสงตกกระทบ และไหลไปยังขั้วสัมผัส ของโลหะ ผลคือกระแสแสงเนื่องจากแสงตกกระทบ โฟโตไดโอด MSM มีข้อดีมากกว่าโฟโต ไดโอดทั่วไป เช่น มีความเร็วสูงและ

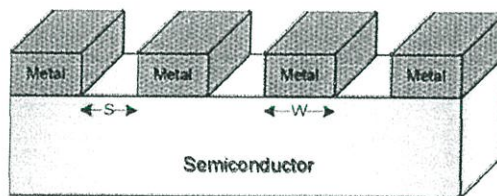
สามารถสร้างร่วมกับเทคโนโลยีของวงจรรวม FET และมี ลักษณะเป็นแบบฟลानาร์ ซึ่งง่ายต่อการสร้าง ให้ความจุไฟฟ้าต่ำและกระแสมีต่ำ (กระแสขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ)



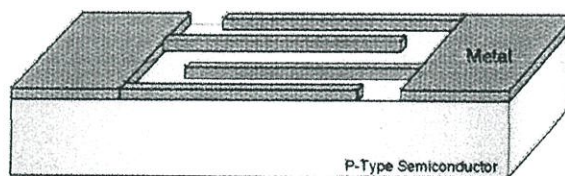
รูปที่ 2.8 โฟโตไดโอด MSM

### 2.2.1 โครงสร้าง และหลักการทำงาน

โฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิตัล แสดงดังรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยรอยสัมผัส ระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (s) หรือ ระยะห่างระหว่าง ขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยกรอยสัมผัสทั้งสอง โดยรูปที่ 2.10 แสดงภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิตัล โดยทั่วไปจะออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า มีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นซิลิกอน จะทำหน้าที่ เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สัญลักษณ์ ของโฟโตไดโอดชนิด MSM คล้ายกับซ็อดยีกียไดโอดสองตัวหันหลังชนกัน (Back to Back Diode) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 โฟโตไดโอด MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิตัล

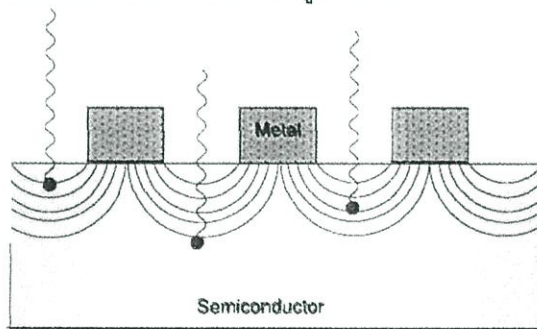


รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของ MSM โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิตัล



รูปที่ 2.11 สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด MSM

หลักการทำงานของโฟโตไดโอด MSM ส่วนพื้นที่รับแสงจะเป็นพื้นที่บริเวณสารกึ่งตัวนำโดย จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) [9] การสร้างรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะแบบชนิดกึ่งยวทั้งสอง รอยสัมผัสบนสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากการปรับระดับเฟอร์มิของสารกึ่ง ตัวนำ และโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แพร่เข้ามาทางด้านสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่รับแสง แสดง ดังรูปที่ 2.12

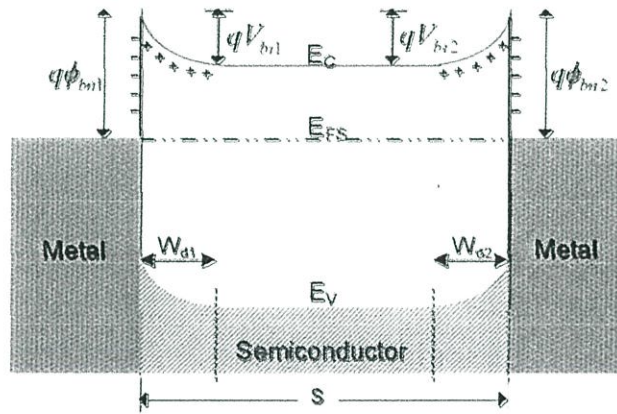


รูปที่ 2.12 สนามไฟฟ้าภายใต้ขั้วของโฟโตไดโอด MSM

เนื่องจากโลหะมีประจุพาหะเป็นจำนวนมาก สามารถพิจารณาได้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ด้านโลหะ กระบวนการโฟโตโวลตาอิก เกิดจากการที่พลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบบริเวณ พื้นที่ทางด้านสารกึ่งตัวนำ บริเวณสนามไฟฟ้า และบริเวณใกล้สนามไฟฟ้า พลังงานโฟตอนของ แสงนี้มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระ-โฮลอิสระ กล่าวคือ  $h\nu > E_g$  ที่บริเวณปลอด พาหะ และบริเวณพื้นที่ใกล้ๆ กับ บริเวณปลอดพาหะนี้ โดยสนามไฟฟ้านี้จะเป็นตัวพัดพาให้ อิเล็กตรอน และโฮลอิสระที่เกิดจากแสงให้ ออกไปสู่วงจรรภายนอกเกิดเป็นกระแสไหลผ่านตัวโฟโต ไดโอด โฟโตไดโอด MSM สามารถทำการไบอัส บวก และลบได้ทั้งสองทิศทางเนื่องจากทั้งสอง รอยสัมผัสมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน เมื่อทำการไบอัสโฟโต ไดโอดจะทำให้รอยต่อชนิดกึ่งยวด้านหนึ่ง เป็นไบอัสตรง และอีกด้านเป็นไบอัสกลับ เนื่องจากด้านไบอัส กลับมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูง และมีบริเวณปลอดพาหะกว้าง เมื่อแสงตกกระทบคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้า พัดพาให้มีผลต่อกระแสเอาท์พุทมากที่สุด

## 2.2.2 โฟโตไดโอด MSM ขณะสมดุล

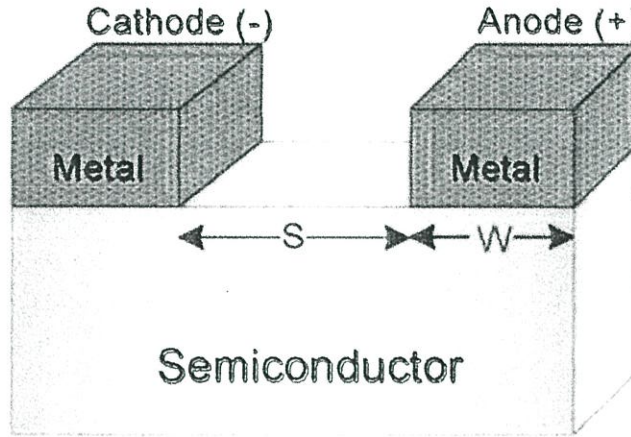
แถบพลังงานของโฟโตไดโอด MSM ในภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.13 จะเกิด บริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัส ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยกำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสทั้งสองมีค่าเท่ากันเนื่องจากโครงสร้าง เป็นแบบสมมาตร โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (Cathode) และรอยสัมผัส ด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมัก เป็นโลหะชนิดเดียวกันโดยกำแพงศักย์ ข้อดักของขั้วแคโทด ( $f_{bn1}$ ) และขั้วแอโนด ( $f_{bn2}$ ) มีขนาด เท่ากัน ( $f_{bn1} = f_{bn2} = f_{bn}$ ) และกำแพงศักย์ ภายในของขั้วแคโทด ( $V_{b11}$ ) และขั้วแอโนด ( $V_{b12}$ ) มีขนาด เท่ากันหรือ  $V_{b11} = V_{b12} = V_{bn}$  และความกว้าง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $\Lambda_1$ ) และด้านแอโนด ( $\Lambda_2$ ) มีขนาดเท่ากัน  $w_{d1} = w_{d2} = w_d$  ทำให้โครงสร้างนี้มี ลักษณะสมมาตร



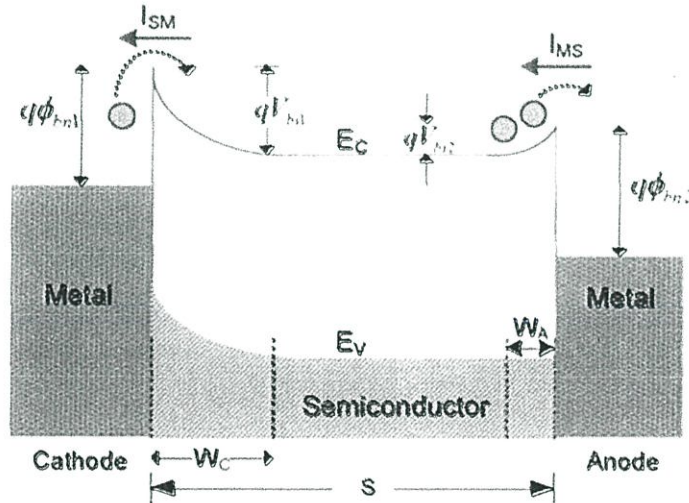
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานโฟโตไดโอด MSM ในภาวะสมดุลความร้อน

## 2.2.3 โฟโตไดโอด MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

โฟโต ไดโอด MSM เมื่อ เติร์บการ ๒ อัสตงแสดง ในรูปที่ 2.14(ก) โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมอ เป็น ขั้วแคโทดได้รับไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวาเป็นขั้วแอโนดได้รับไบอัสตรงจากรูปที่ 2.14(ข)บริเวณ ปลอดพาหะด้านแคโทด ( $w_d$ ) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัส ย้อนกลับและมีกำแพงศักย์ ภายในสูงขึ้นเป็น ( $V_{b1} + \phi_b$ ) อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่ สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยัง ด้านโลหะได้ จะมีเพียงแต่อิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงาน มากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพง ศักย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามี ทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ( $I_{SM}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอย สัมผัสข้อดัก



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.14 โฟโตไดโอด MSM ขณะ ได้รับแรงดัน ไบอัส

(ก) ภาพจำลองการตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด MSM ขณะให้แรงดันไบอัส

(ข) แถบพลังงานในขณะได้รับแรงดันไบอัส

ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด ( $w_d$ ) แคบมากขึ้น เนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ  $\{V_b - v_d\}$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามา ที่สารกึ่งตัวนำปริมาณน้อย

ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ไหลออกจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะด้าน แอนโอดก็น้อยด้วย (เนื่องจากความหนาแน่นประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน จึงมีการ ถ่ายเทอิเล็กตรอนออกไปโลหะด้าน Anode ด้วยการแพร่เกิดขึ้น) จึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยลงไป ด้วยซึ่งก็คือกระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current :  $I_{dark}$ ) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดที่เกิดขึ้นจะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น

#### 2.2.4 ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขณะได้รับแรงดันไบอัส

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม ( $W_T$ ) ของโฟโตไดโอด MSM เป็นผลรวมของบริเวณ ปลอดพาหะทางด้านแคโทด ( $W_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้าน แอนโอด ( $W_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงดังสมการที่ (2.9)

$$W_T = W_C + W_A \quad (2.9)$$

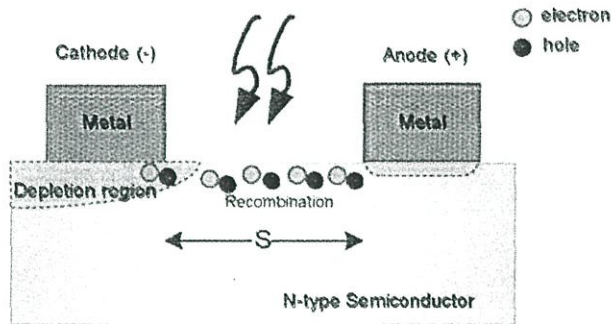
$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_B - V_A)}{qN_D}}$$

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_B + V_A)}{qN_D}}$$

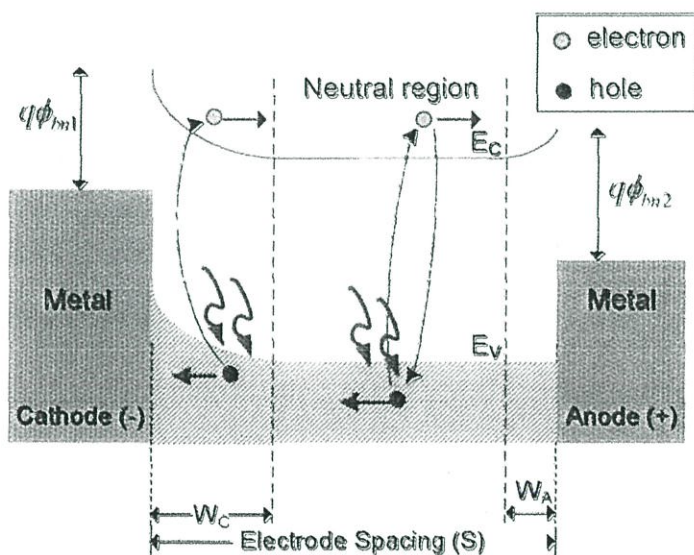
จากสมการที่ (2.11) พบว่าเมื่อแรงดันไบอัสกลับมากขึ้นส่งผลให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้นตามด้วย

#### 2.2.5 MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ

MSM ขณะได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM จะอยู่บริเวณ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองด้านดังรูปที่ 2.15 ภายใต้เงื่อนไขการให้แรงดันไบอัส เมื่อมี แสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสงกรณีระยะห่างระหว่างขั้วกว้างสามารถแบ่งพื้นที่ในการรับแสงเป็น 2 ส่วน คือพื้นที่ปลอดประจุพาหะ (Depletion) และพื้นที่เป็นกลาง (Neutral) พลังงานของโฟตอนที่มีมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ  $h\nu > E_g$  จะกระตุ้นให้เกิด คู่ อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Pair) ภายในพื้นที่ปลอดประจุพาหะ และพื้นที่เป็นกลาง ส่วนคู่ อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณนิวทรัลโฟตอนจะถูกดูดกลืน และเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล แสดงดังรูปที่ 2.180ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลเนื่องจากการให้แสงตกกระทบกรณีระยะห่างระหว่างขั้วกว้าง (ก) แบบจำลองการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

(ข) แถบพลังงานขณะได้รับแสงตกกระทบกรณีระยะห่างระหว่างขั้วกว้าง

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบ และมีการกระตุ้นให้เกิดโฮล ทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากัน ในแต่ละจุดทำให้เกิดการ

เคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดประจุพาหะและถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮล ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เป็น พาหะส่วนใหญ่ใน



ชั้นสาร ส่วนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในบริเวณนิวทรัลจะไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วย การแพร่ได้เนื่องจากเป็นพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำ ส่วนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณ ปลอดภัยพาหะ โฮลจะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลเคลื่อนที่ตาม ทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือเรียกว่ากระแสแสง (Photocurrent:  $I_{photo}$ ) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งต้องเคลื่อนที่ผ่าน บริเวณนิวทรัล แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกจากบริเวณปลอดภัยพาหะเป็นพาหะ ส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้

## 2.2.6 สมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM

### 2.2.6.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด (Dark current: $I_{dark}$ )

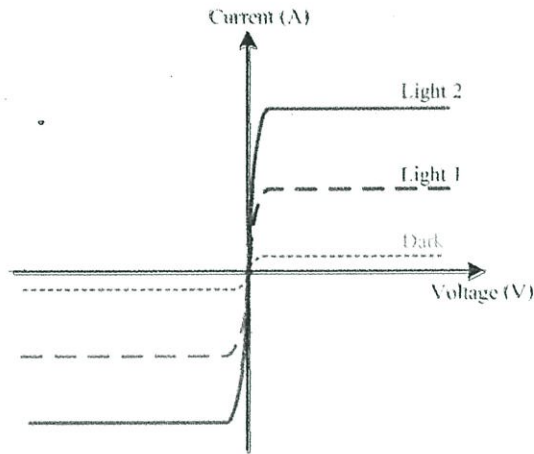
กระแสมืด คือ กระแสที่เกิดจากพาหะส่วนน้อย เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับใน ขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสงโดยปกติจะมีค่าน้อย กระแสมืดหรือกระแสรั่วจัดเป็นพารามิเตอร์ ที่สำคัญ ซึ่งต้องถูกควบคุมให้มีค่าต่ำสุด เพราะ ถือเป็นสัญญาณรบกวนแบบหนึ่งในโฟโตไดโอด

### 2.2.6.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด (Photo current: $I_{photo}$ )

กระแสแสงคือกระแสที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสง กระแสชนิดนี้เกิดจากการ ดูดกลืนโฟตอนในโฟโตไดโอดทำให้เกิดคู่วาหะอิเล็กตรอน-โฮล อิสระ สนามไฟฟ้าในไดโอดจะ ทำให้พาหะเหล่านี้เคลื่อนที่เข้าหาขั้วโลหะและกลายเป็นกระแสแสงไหลในวงจร กระแสแสงเป็น พารามิเตอร์ที่สำคัญและบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดแสง ปกติค่าของกระแสแสงที่ ได้ควรมีค่ามากพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืด โดยทั่วไปขนาดของกระแส แสงจะขึ้นกับความเข้มแสง พื้นที่รับแสงและประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอด และค่าของกระแสแสงของโฟโตไดโอดสามารถคำนวณหาค่าได้จากผลต่างของกระแสรวม และ กระแสมืด ดังสมการที่ (2.10) โฟโตไดโอดที่ดีจะต้องสามารถให้กระแสแสงได้สูง กระแสรวมที่ ไหลในวงจรขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแสง เป็นผลรวมของกระแสแสงและกระแสมืด

$$I_{photo} = I_{Total} - I_{Dark} \quad (2.10)$$

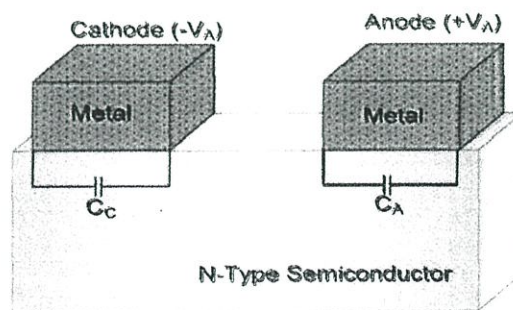
ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสแสง ( $i_{photo}$ ) กับแรงดันไบอัสสำหรับโฟโต ไดโอดชนิด MSM จากรูปที่ 2.16 พบว่ากระแส-แรงดัน มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ ได้รับ ไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับ โดยกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงตกกระทบมากขึ้น



รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

### 2.2.6.3 สมบัติความจุ-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM

ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดชนิด MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดย ความจุไฟฟ้ารวม ( $C_{\Sigma}$ ) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วย ความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด ( $C_c$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านแอโนด ( $C_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ (2.12)



รูปที่ 2.17 ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด MSM

$$C_r = \frac{C_c C_d}{C_c + C_d} \quad (2.12)$$

$C_d$  คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ 1 =  $\sqrt{(q\epsilon_s N_D / 2(V_b - V_{d1}))}$

$C_c$  คือ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ 2 =  $\sqrt{(q\epsilon_s N_D / 2(V_b + V_{d1}))}$

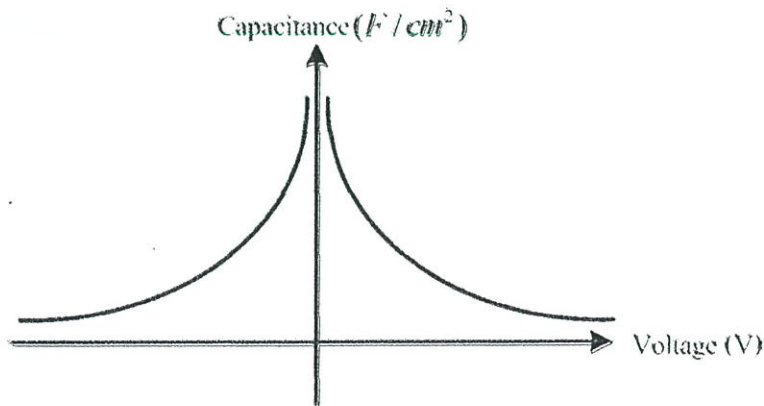
โครงสร้างของโฟโตไดโอดโชนแบบสมมาตรและถ้า  $V \ll V_b (=V_{b1} = V_{b2})$  ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะลดลงและเท่ากับ

$$C_r = \sqrt{\left( \left( \frac{q\epsilon_s N_D}{2} \right) \left[ \frac{1}{\sqrt{(V_b - V_{d1})} + \sqrt{(V_b + V_{d1})}} \right] \right)} \quad (2.13)$$

เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่แรงดันที่ไบอัสจะตกคร่อมอยู่ที่รอยสัมผัสที่ 1 และความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะเท่ากับ

$$C_r = \sqrt{\left( \left( \frac{q\epsilon_s N_D}{2} \right) \left[ \frac{1}{\sqrt{(V + V_b)} + \sqrt{(V_b)}} \right] \right)} \quad (2.14)$$

ในรูปที่ 2.18 แสดง ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสโดย ความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.18 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

## 2.3 แมกนีโตไดโอด

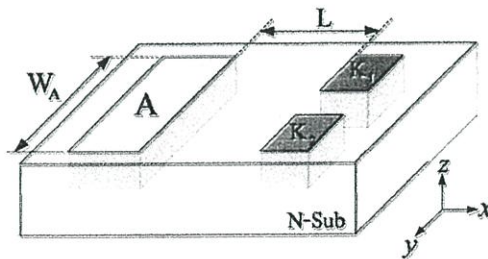
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดและ ซีดทีแมกนีโตไดโอด โดยแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ทั้งการจัดเรียงตำแหน่งขั้วอุปกรณ์, ระยะความกว้างของขั้วแคโทด, ระยะเบี่ยงเบนพาหะและบริเวณที่มีผลในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก รวมทั้งอธิบายหลักการทำงานในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กและวิธีการนำอุปกรณ์ไปใช้งานด้วย

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการพัฒนาและปรับปรุงแมกนีโตไดโอดขึ้นมาใหม่ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งได้พัฒนามาจากแมกนีโตไดโอดแบบเดิม โดยแมกนีโตไดโอดตัวใหม่นี้ให้ชื่อว่า " ซีดทีแมกนีโตไดโอด" ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ต่อไป

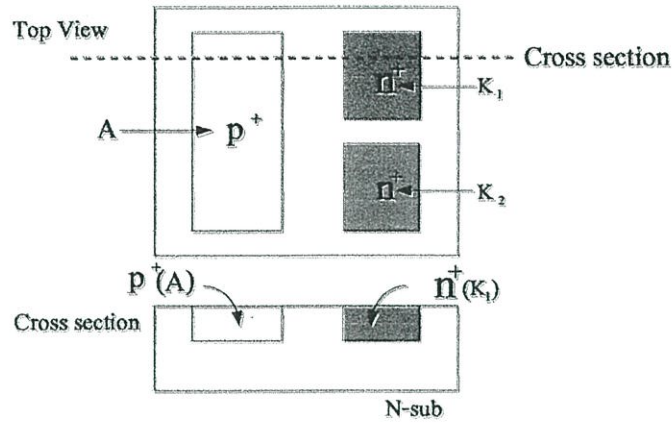
### 2.3.1 โครงสร้างและการใช้งานอุปกรณ์

#### 2.3.1.1 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่ (Structure of Dual Cathodes Magnetodiode)

แมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่ (Dual Cathodes Magnetodiode) เป็นไดโอดชนิดกระแสไหลตามแนวนอน ซึ่งใช้สำหรับตรวจวัดสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของอุปกรณ์ สามารถตรวจวัดสนามแม่เหล็กได้โดยอาศัยกลไกจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ซึ่งใช้แรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่เคลื่อนอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ โดยผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น โครงสร้างของตัวอุปกรณ์, ความหนาแน่นของพาหะที่เคลื่อนที่ และค่า Hall mobility ของพาหะ เป็นต้น



(ก)



(ก)

รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่แบบรอยต่อพี-เอ็น (ก) แสดงโครงสร้างแบบ 3 มิติ และ (ข) แสดงโครงสร้างแบบมองจากด้านบน (Top view)

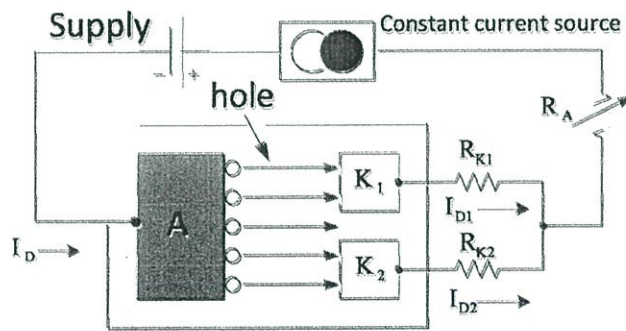
โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่เป็นรอยต่อชนิดพี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งประกอบด้วย แอนโนด ( $p^+$ ) มีลักษณะเป็นแมกนีโตไดโอดสองตัวซึ่งมีขาดต่อกันและแคโทด ( $n^+$ ) สองขาแยกจากกันแบบสมมาตร ทั้งหมดสร้างบนฐานรองของซิลิคอนชนิดเอ็น (n-substrate) เกิดเป็นคุณสมบัติของรอยต่อชนิดพี-เอ็น ที่ขั้วแอนโนด และรอยต่อแบบโอห์มิก (Ohmic Contact) ที่ขั้วแคโทด โดยมีระยะของพื้นที่การฉีดพาหะ (Anode Width) มีค่าเท่ากับ  $W$  และมีระยะการเบี่ยงเบนพาหะ (Deflection Length) มีค่าเท่ากับ  $L$  ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ก) และ 2.19(ข) และภาพตัดขวาง (Cross section)

### 2.3.1.2 วิธีการไบอัสแมกนีโตไดโอดชนิดคาโทดแบบคู่

จากโครงสร้างของแมกนีโตไดโอดชนิดขั้วแคโทดแบบคู่ นั้น การนำอุปกรณ์ไปใช้งานจะให้ไบอัสระหว่างขาแอนโนดกับขาแคโทด และแคโทด 2 ดังรูปที่ 2.20 โดยขั้วแอนโนดจะทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสพาหะซึ่งก็คือโฮล ผ่านไปยังฐานรองชนิดเอ็นแล้วไหลต่อไปยังขั้วแคโทด และแคโทด 2 เกิดเป็นกระแสไดโอด ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) ตามลำดับ ซึ่งจะไหลในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของพาหะ

จากหลักการปรากฏการณ์ของฮอลล์คือ การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องจากแรงลอเรนซ์ที่กระทำต่อพาหะเมื่อมีการตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสที่ถูกฉีดจากแอนโนดข้ามไปยังแคโทด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไดโอดทั้งสองขั้วขึ้น ดังนั้นการ

ตรวจจับสนามแม่เหล็ก สามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนค่าของกระแสไดโอดทั้งสองขั้ว ( $\Delta I_D$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กตัดผ่าน โดยสามารถวัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสไดโอด ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) โดยตรง หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาแคโทด และแคโทด2 หรือที่เรียกว่าแรงดันเอาต์พุต (Output voltage:  $V_O$ ) ซึ่งใช้วัดผลในงานวิจัยนี้ โดยความสามารถในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์จะวัดในรูปของ "ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity: S)" ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเอาต์พุต ( $\Delta V_O$ ) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก หรือคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเอาต์พุต ( $\Delta I_D$ ) ต่อกระแสอินพุตและการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ( $\Delta B_z$ )

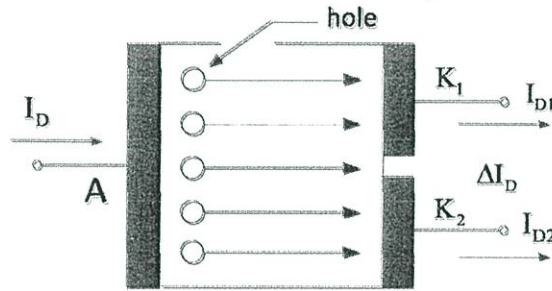


รูปที่ 2.20 การไบอัสแมกนีโตไดโอดระหว่างแอโนด (A) กับแคโทด1 และแคโทด2 ( $K_1$ ,  $K_2$ )

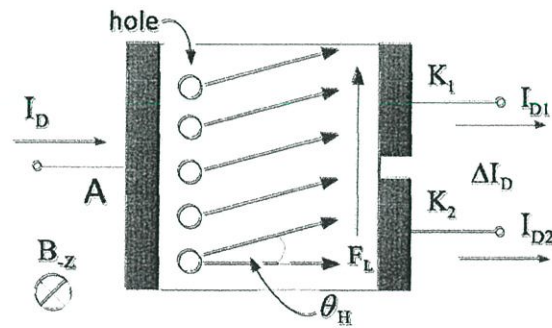
จากรูปที่ 2.20 แสดงวิธีการให้ไบอัสแมกนีโตไดโอดแบบสามขา โดยแอโนดจะต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ วงจรปรับกระแสคงที่ ทำหน้าที่ในการรักษาระดับกระแสที่ไหลให้คงที่ตลอดการวัดผล และความต้านทาน  $R_A$  ทำหน้าที่ในการปรับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านแอโนด ส่วนขาแคโทด1 และแคโทด2 ต่อเข้ากับความต้านทาน  $R_{K1}$  และ  $R_{K2}$  ตามลำดับ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับ Offset หรือว่าแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาแคโทด1 และแคโทด2 ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ( $AV_O \approx 0$ ) โดยในสภาวะเริ่มต้นซึ่งปราศจากสนามแม่เหล็ก โดยจากรูปภาพที่มีผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยส่วนมากคือโฮล ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ซึ่งถูกฉีดจากแอโนดผ่านฐานรองชนิดเอ็นไปยังขาแคโทด1 และแคโทด2 เกิดเป็นกระแสไดโอด ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) ขึ้น ตามลำดับ

### 2.3.2 หลักการทำงานของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่

แมกนีโตไดโอดอาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (Carrier Deflection) โดยเมื่อทำการให้ไบอัส แก่แมกนีโตไดโอด ดังในรูปที่ 2.21 ขั้วแอโนดจะทำหน้าที่ในการจ่ายพาหะซึ่งก็คือโฮล ผ่านไปยังขา แคโทด1 และแคโทด2 ( $K_1, K_2$ ) เกิดเป็นกระแสไดโอดทั้งสอง ( $I_{D1}, I_{D2}$ ) ตามลำดับ ซึ่งในสภาวะปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ( $B = 0$ ) กระแสไดโอดทั้งสองจะมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งคือ  $I_{D1}$  กับ  $I_{D2}$  ดังในรูปที่ 2.21(ก) ซึ่งมีปริมาณกระแส  $I_{D1}$  กับ  $I_{D2}$  เท่ากัน และเมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับระนาบผิวของอุปกรณ์ จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  (มุมของฮอลล์) ดังในรูปที่ 2.21(ข) เนื่องจากประจุพาหะส่วนมากคือโฮล ทำให้แรงลอเรนซ์มีทิศทางพุ่งขึ้นบน กระแสพาหะเกิดการ



(ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก



(ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

รูปที่ 2.21 การเบี่ยงเบนของพาหะ (โฮล) เนื่องจากแรงลอเรนซ์ (ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก และ (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

เบี่ยงเบนไปทางด้านขั้วแคโทด 1 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ไหลผ่านขั้วแคโทดทั้งสอง ( $\Delta I_D$ ) โดยที่กระแส  $I_{D1}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแส  $I_{D2}$  จะมีค่าลดลง ( $I_{D1} > I_{D2}$ ) ซึ่งกลไกการ

เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านและชนิดของพาหะ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

โดยกระแสไดโอด ( $I_D$ ) เป็นผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านขั้วแคโทด 1 ( $I_{D1}$ ) กับกระแสที่ไหลผ่านขั้วแคโทด 2 ( $I_{D2}$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.15 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ได้ดังสมการที่ 2.16

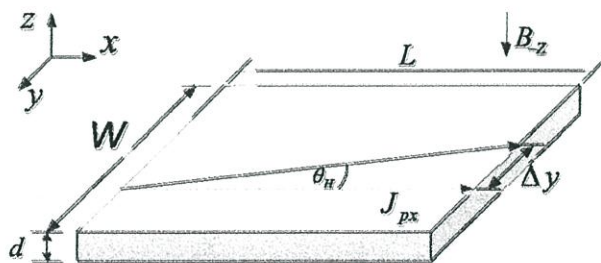
$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (2.15)$$

$$I_D = J_{PX} \cdot W \cdot d \quad (2.16)$$

เมื่อ  $J_{px}$  คือความหนาแน่นของกระแสพาหะ,  $W$  คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะจากแอโนด และ  $d$  คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)

### 2.3.3 การเบี่ยงเบนพาหะของแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่

รูปที่ 2.22 แสดงพื้นที่การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Response area) ซึ่งมีโฮลเป็นพาหะส่วนมากในการฉีดพาหะและมีปริมาณความหนาแน่นของกระแสขนาด  $J_{px}$  โดยมีพื้นที่การฉีดพาหะจากแอโนดเท่ากับ  $W$  และมีระยะเบี่ยงเบนเท่ากับ  $L$  เมื่อมีสนามแม่เหล็กขนาด  $B_z$  ตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับระนาบผิว ทำให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมเป็นมุมเท่ากับ  $\theta_H$



รูปที่ 2.22 พื้นที่การเบี่ยงเบนพาหะ(โฮล)



ในภาวะปกติที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก ( $B_z=0$ ) กระแสพาหะเคลื่อนที่ตามแนวเส้นประ แต่เมื่อมีการให้สนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นศูนย์ ( $B_z \neq 0$ ) ในทิศทางตั้งฉาก ส่งผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของกระแสพาหะเนื่องมาจากแรงลอเรนซ์ ไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  โดยมุมของการเบี่ยงเบนพาหะนี้มีความสัมพันธ์โดยแปรผันตามค่าสภาพคล่องของโฮล ( $\mu_p$ ) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ 2.17

$$\tan \theta_H = \mu_p \cdot B_z \quad (2.17)$$

$$\frac{\Delta y}{L} = \mu_p \cdot B_z \quad (2.18)$$

จะได้

$$B_z = \frac{\Delta y}{\mu_p \cdot L} \quad (2.19)$$

จากนิยามของสมการความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กคืออัตราส่วนระหว่างเอาท์พุทต่ออินพุทของอุปกรณ์ โดยความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของแมกนีโตไดโอดคืออัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของกระแสไดโอดทั้งสอง ( $\Delta I_D$ ) กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $\Delta B$ ) แสดงได้โดยสมการที่ (2.20)

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta B} \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.20 จะได้ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์โครงสร้างแสดงได้โดยสมการที่ (2.21)

$$S = \frac{\Delta I_D \cdot L \cdot \mu_p}{\Delta y} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.17 การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสไดโอดทั้งสอง ( $\Delta I_D$ ) โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของโครงสร้างได้ดังสมการที่ 2.22

$$\Delta I_D = J_{px} \cdot d \cdot \Delta y \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\Delta y$  มีค่าเท่ากับ

$$\Delta y = \mu_p \cdot L \cdot B_Z \quad (2.23)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ 2.23 ลงในสมการที่ 2.22 จะได้ว่า

$$I_D = J_{px} \cdot \mu_p \cdot d \cdot L \cdot B_Z \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าการเบี่ยงเบนของพาหะจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน ทั้ง ความหนาแน่นของกระแส, ค่าสภาพคล่องของพาหะ, ความลึกของรอยต่อ, ระยะการเบี่ยง และความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งการเบี่ยงเบนของพาหะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไดโอดทั้งสองนี้ จะส่งผลต่อค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ด้วย

โดยสมการแสดงค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก (Sensitivity) เขียนได้สองรูปแบบ คือ 1. ค่าความไวสัมพัทธ์ (Relative sensitivity,  $S_R$ ) เป็นค่าความไวที่คิดจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสไดโอดทั้งสอง ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ) ต่อกระแสไดโอด ( $I_D$ ) และการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.25 และ 2. ค่าความไวสัมบูรณ์ (Absolute sensitivity,  $S_A$ ) เป็นค่าความไวในการตอบสนองที่คิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างค่าของขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2 ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.26

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D \cdot \Delta B_Z} \quad (2.25)$$

$$S_A = \frac{\Delta V_o}{\Delta B_Z} \quad (2.26)$$

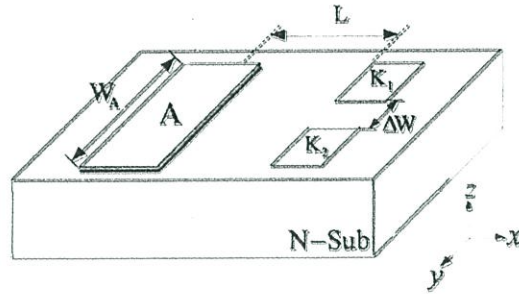
เมื่อ  $\Delta V_o$  คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วแคโทด 1 กับแคโทด 2 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.27

$$\Delta V_o = \Delta I_{D1} \cdot R_{K1} - \Delta I_{D2} \cdot R_{K2} \quad (2.27)$$

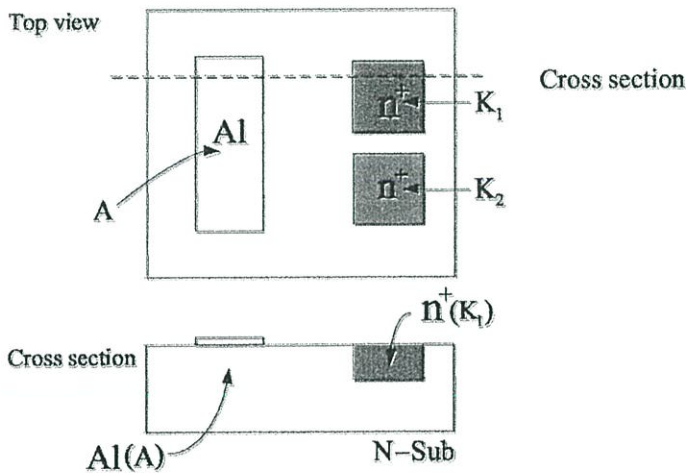
แต่ด้วยข้อเสียของแมกนีโตไดโอดแบบสามขาคือ กระแสพาหะ (hole) ที่ไหลจากแอโนดผ่านไปยังขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2 มีค่าสภาพคล่องของพาหะน้อยกว่าอิเล็กตรอน โดยส่งผลต่อมุมของการเบี่ยงเบนของพาหะที่น้อยกว่าอิเล็กตรอน ส่งผลให้ค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน

### 2.3.4 โครงสร้างของซีดกั๊กแมกนีโตไดโอด (Structure of Schottky Magnetodiode)

จากที่ได้กล่าวมาเกี่ยวกับข้อจำกัดของแมกนีโตไดโอด จึงเป็นที่มาของการพัฒนาแมกนีโตไดโอดตัวใหม่ขึ้น เพื่อที่จะทำให้แมกนีโตไดโอดมีความไวในการตอบสนองที่ดีขึ้น ซึ่งแมกนีโตไดโอดตัวใหม่นี้ให้ชื่อว่า "ซีดกั๊กแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่ (Dual Schottky Magnetodiode)" โดย



(ก)



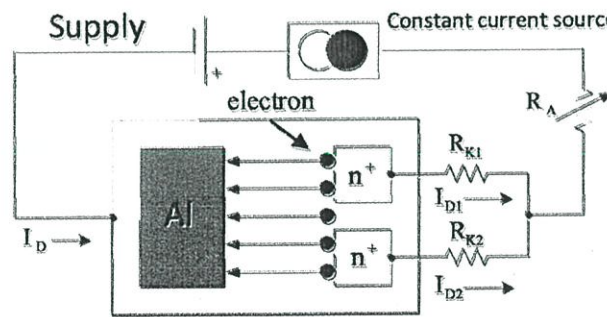
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของแมกนีโตไดโอดแบบรอยต่อซีดกั๊ก (ก) แสดงโครงสร้างแบบ 3 มิติ และ (ข) แสดงโครงสร้างแบบ มองจากด้านบน (Top view) และภาคตัดขวาง (Cross section)

ในการพัฒนาแมกนีโตไดโอดให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น คือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างขึ้นมาใหม่ โดยยังคงใช้โครงสร้างเป็นแบบไดโอด เนื่องจากพหุที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กคือ อิเล็กตรอนซึ่งมีค่าสภาพคล่องของพหุ (mobility) ที่มากกว่าโฮล ซึ่งสามารถเคลื่อนที่บนฐานรองได้ดีกว่า ดังนั้นเมื่อให้กระแสไบอัส แรงลอเรนซ์ที่กระทำและมุมของการเบี่ยงเบนภายใต้สนามแม่เหล็กค่าเดียวกันจะ

มีค่ามากกว่าพาหะที่เป็นโฮล ส่งผลให้ค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นโครงสร้างของขั้วตกที่แมกนีโตไดโอด จะประกอบขึ้นด้วย ขั้วแอโนดที่สร้างจากโลหะ (Al) และขั้วแคโทด ( $n^+$ ) แยกออกจากกันแบบสมมาตรบนฐานรองของซิลิคอนชนิดเอ็น (n-substrate) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.23(ก) และ 2.23(ข)

### 2.3.5 วิธีการไบอัสขั้วตกที่แมกนีโตไดโอด

ในการนำขั้วตกที่แมกนีโตไดโอดไปใช้งาน จะมีลักษณะแบบเดียวกับกับแมกนีโตไดโอดคือ ขั้วแอโนดจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟขั้วบวก วงจรปรับกระแสที่ ทำหน้าที่ในการรักษาระดับกระแสที่ไหลให้คงที่ตลอดการวัดผล ส่วนปลายด้านหนึ่งของความต้านทานทั้งสองจะนำไปต่อเข้ากับความต้านทาน  $R_A$  ซึ่งจะต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟและ  $R_A$  จะทำหน้าที่ในการปรับกระแสไบอัสให้แก่ อุปกรณ์ ขั้วแคโทดทั้งสอง ( $K_1, K_2$ ) จะต่อเข้ากับความต้านทาน  $R_{K1}$  และ  $R_{K2}$  ตามลำดับ ซึ่งความต้านทานทั้งสองทำหน้าที่ในการปรับค่าแรงดัน Offset ระหว่างขั้วแคโทดทั้งสอง โดยจากรูปพาหะที่มีผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กโดยส่วนมากคืออิเล็กตรอน ซึ่งจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะถูกฉีดจากขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2 ผ่านฐานรองชนิดเอ็นไปยังแอโนด เกิดเป็นกระแสไดโอด ( $I_{D1}, I_{D2}$ ) ขึ้น ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.24

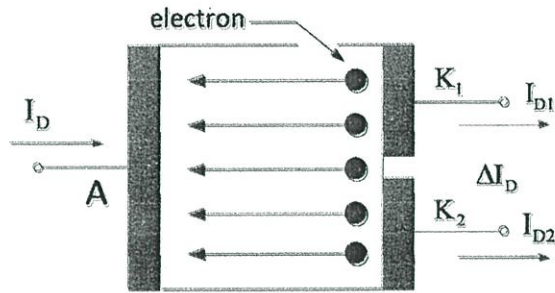


รูปที่ 2.24 การไบอัสขั้วตกที่แมกนีโตไดโอด

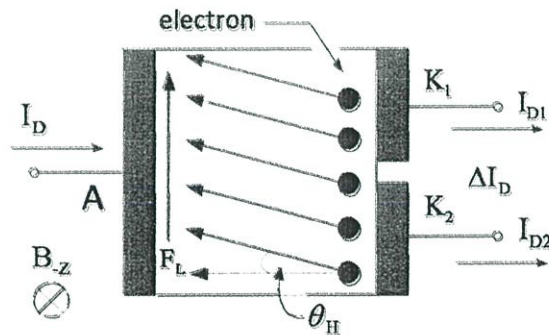
### 2.3.6 หลักการทำงานของขั้วตกที่แมกนีโตไดโอด

หลักการทำงานของขั้วตกที่แมกนีโตไดโอด อาศัยกลไกการเบี่ยงเบนพาหะ (Carrier Deflection) โดยเมื่อทำการให้ไบอัสแก่ขั้วตกที่แมกนีโตไดโอด ดังในรูปที่ 3.6 ขั้วแอโนดจะทำหน้าที่ใน

การจ่ายพาหะซึ่งก็คืออิเล็กตรอน ผ่านไปยังขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2 ( $K_1, K_2$ ) เกิดเป็นกระแสไดโอดทั้งสอง ( $I_{D1}, I_{D2}$ ) ตามลำดับ ซึ่งในสภาวะปกติที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ( $B = 0$ ) กระแสไดโอดทั้งสองจะมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งคือ  $I_{D1}$  กับ  $I_{D2}$  ดังในรูปที่ 2.25 (ก)



(ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก



(ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

รูปที่ 2.25 การเบี่ยงเบนของพาหะ(อิเล็กตรอน) เนื่องจากแรงลอเรนซ์ (ก) ปราศจากสนามแม่เหล็ก และ (ข) มีสนามแม่เหล็กตัดผ่าน

และเมื่อมีการจ่ายสนามแม่เหล็กตัดผ่านในแนวตั้งฉากกับระนาบผิวของอุปกรณ์ จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะตามหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ ส่งผลให้พาหะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิมเป็นมุม  $\theta_H$  (มุมของฮอลล์) ดังในรูปที่ 2.25(ข) เนื่องจากพาหะคืออิเล็กตรอน ดังนั้นแรงลอเรนซ์จะมีทิศทางพุ่งขึ้นบน ทำให้พาหะเบี่ยงเบนไปทางด้านขั้วแคโทด 1 เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไดโอด ( $\Delta I_D$ ) โดยที่กระแส  $I_{D1}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระแส  $I_{D2}$  จะมีค่าลดลง ( $I_{D1} > I_{D2}$ ) ซึ่งมี

ปริมาณการเปลี่ยนแปลงกระแสเหมือนกันกับแมกนีโตไดโอดโดยกระแสไดโอด ( $I_D$ ) เป็นผลรวมของกระแสไดโอด 1 ( $I_{D1}$ ) กับกระแสไดโอด 2 ( $I_{D2}$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.28 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นกระแสพาหะ (Carrier density) ได้ดังสมการที่ 2.29

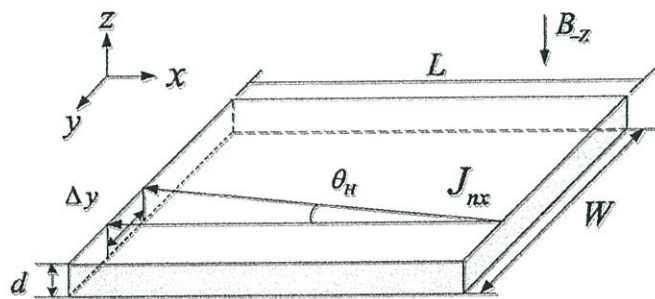
$$I_D = I_{D1} + I_{D2} \quad (2.28)$$

$$I_D = J_{nx} \cdot W \cdot d \quad (2.29)$$

เมื่อ  $J_{nx}$  คือความหนาแน่นของกระแสพาหะ,  $W$  คือความกว้างของพื้นที่การฉีดพาหะจากแอโนด และ  $d$  คือความลึกของรอยต่อ (Junction depth)

### 2.3.7 การเบี่ยงเบนพาหะข้อต่อกึ่งแมกนีโตไดโอด

ข้อต่อกึ่งแมกนีโตไดโอดสามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยอาศัยความแตกต่างระหว่างกระแสไดโอดทั้งสอง ( $\Delta I_D$ ) เหมือนกับแมกนีโตไดโอด กลไกที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระแสทั้งสองเนื่องจากการเบี่ยงเบนของพาหะ (carrier deflection) ในสภาวะที่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านอุปกรณ์แมกนีโตทรานซิสเตอร์ทำให้เกิดแรงลอเรนซ์กระทำกับพาหะที่เคลื่อนที่ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดในระยะความยาว  $L$  แรงลอเรนซ์จะกระทำกับพาหะทำให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนในมุม  $\theta$  ซึ่งระยะการเบี่ยงเบน  $W$  คือระยะระหว่างคอลเลคเตอร์ทั้งสอง รูปที่ 2.26 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนของพาหะขณะที่มีสนามแม่เหล็กแนวตั้งตัดผ่านในระยะความยาว  $L$  โดย  $\theta$  คือมุมเบี่ยงเบนของพาหะ และ  $A_y$  คือระยะการเบี่ยงเบนของพาหะ



รูปที่ 2.26 พื้นที่การเบี่ยงเบนพาหะ (อิเล็กตรอน)

จากทฤษฎีฮอลล์มุมการเบี่ยงเบนของพาหะมีความสัมพันธ์โดยแปรผันตามค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน ( $\mu_n$ ) กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแสดงได้โดย

$$\tan\theta_H = \mu_n \cdot B_Z \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.26 สามารถแสดงความสัมพันธ์ทางโครงสร้างได้ดังนี้

$$\frac{\Delta y}{L} = \mu_n \cdot B_Z \quad (2.31)$$

จะได้

$$B_Z = \frac{\Delta y}{\mu_n \cdot L} \quad (2.32)$$

จากนิยามของสมการความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กคืออัตราส่วนระหว่างเอาท์พุทและอินพุทของอุปกรณ์ โดยความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของซีดทีแมกนีโตไดโอดคืออัตราส่วนระหว่างความแตกต่างระหว่างกระแสไดโอดทั้งสอง ( $\Delta I_D$ ) กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ( $\Delta B$ ) แสดงได้โดยสมการที่ (2.33)

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta B} \quad (2.33)$$

แทนสมการที่ (2.32) ลงในสมการที่ (2.33) จะได้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์โครงสร้างแสดงได้โดยสมการที่ (2.34)

$$S = \frac{\Delta I_D \cdot L \cdot \mu_p}{\Delta y} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.30) การเบี่ยงเบนของกระแสพาหะที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสไดโอดทั้งสอง ( $\Delta I_D$ ) โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของโครงสร้างได้ดังสมการที่ 2.35

$$\Delta I_D = J_{nx} \cdot d \cdot \Delta y \quad (2.35)$$

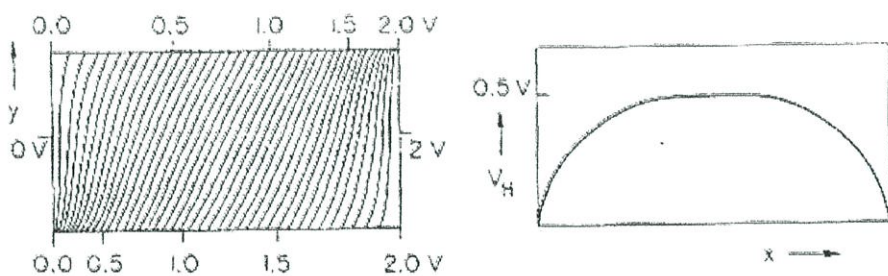
เมื่อ  $\Delta y$  มีค่าเท่ากับ

$$\Delta y = \mu_n \cdot L \cdot B_Z \quad (2.36)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.35) จะได้ว่า

$$I_D = J_{nx} \cdot \mu_p \cdot d \cdot L \cdot B_Z \quad (2.37)$$

จากสมการที่ 2.35 และ 2.34 สามารถอธิบายได้ว่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับระยะเบี่ยงเบนพาหะ (L) และระยะความกว้างของขั้วฉีดพาหะ (W) ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์ควรกำหนดให้ระยะ W ให้มีค่าน้อยและระยะ L ให้มีความยาวที่สามารถทำให้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กสูงขึ้นได้ โดยที่ความกว้าง  $\Delta y$  กำหนดเป็นระยะระหว่างขั้วแคโทด 1 และแคโทด 1 ในการพิจารณาการกำหนดระยะความยาว L สามารถศึกษาได้จากทฤษฎีฮอลล์โดยที่รูปที่ 2.27(ก) แสดงเส้นศักย์เท่ากัน (equipotential lines) ของอุปกรณ์ฮอลล์ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตัดผ่านทำให้พาหะเคลื่อนที่ในมุมเบี่ยงเบนที่คงที่



รูปที่ 2.27 การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

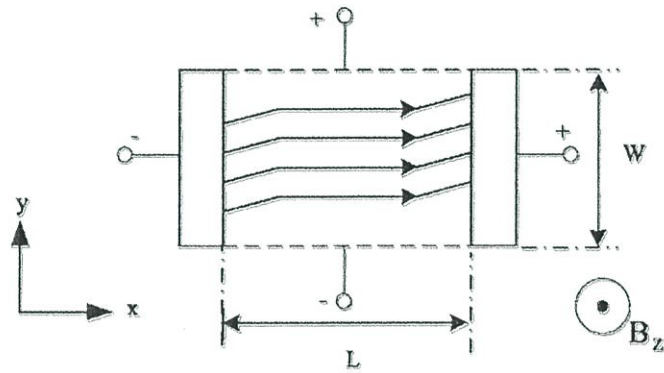
(ก) เส้นศักย์เท่ากันของอุปกรณ์ฮอลล์ และ (ข) แรงดันฮอลล์ในบริเวณต่าง ๆ

โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ได้สมบูรณ์ ซึ่งจะแตกต่างกับบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์โดยสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถมีค่าได้สูงสุด รูปที่ 2.27(ข) แสดงค่าแรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของอุปกรณ์ฮอลล์ แรงดันฮอลล์มีค่าสูงที่สุดในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์และบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีค่าแรงดันฮอลล์ที่น้อย เพราะฉะนั้นการออกแบบเพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้ววัดแรงดันฮอลล์โดยส่วนใหญ่แล้วจะออกแบบให้อยู่ตรงกลางของอุปกรณ์ฮอลล์



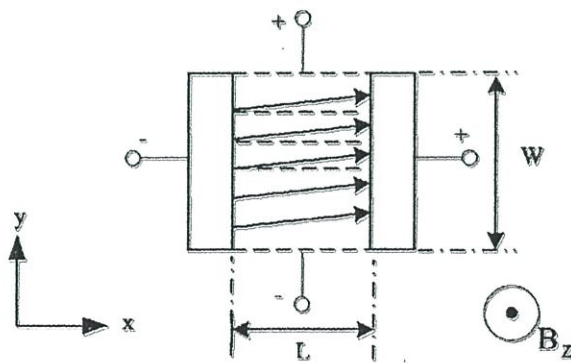
จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 2.27 สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบข้อตักแมกนีโตไดโอดได้โดยในการออกแบบจะกำหนดระยะความยาว  $L$  เป็นระยะระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2

ของข้อตักแมกนีโตไดโอด โดยอุปกรณ์ฮอลล์ที่มีความยาว  $L$  ดังรูปที่ 2.28 ซึ่งแสดงการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าเนื่องจากสนามแม่เหล็กได้สมบูรณ์ในบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์นั่นคือกระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่งทิศทางกระแสไฟฟ้าในบริเวณใกล้ขั้วของอุปกรณ์จะมีการเบี่ยงเบนเพราะสนามไฟฟ้าไม่สามารถเหนี่ยวนำได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.28 การเกิดแรงดันฮอลล์ที่ระยะความยาว  $L$  ของอุปกรณ์ฮอลล์

รูปที่ 2.29 แสดงการลดลงของความยาว  $L$  ซึ่งสามารถแสดงการเบี่ยงเบนได้ชัดเจนเนื่องจากสนามแม่เหล็กไม่สามารถเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าได้สมบูรณ์ทำให้กระแสเกิดการเบี่ยงเบนได้อย่างชัดเจน ( $\Delta I_D$ ) ซึ่งลักษณะของกระแสที่เบี่ยงเบนจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบข้อตักแมกนีโตไดโอดนั่นคือ



รูปที่ 2.29 การลดลงของความยาว  $L$  ที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า

แสดงให้เห็นว่าระยะความยาวระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทด 1 และแคโทด 2 ไม่สามารถที่จะออกแบบให้มีความยาวที่ยาวมากได้

## 2.4 กระบวนการสร้างขั้วตกแมกนีโตไดโอด (Magnetotransistor fabrication process)

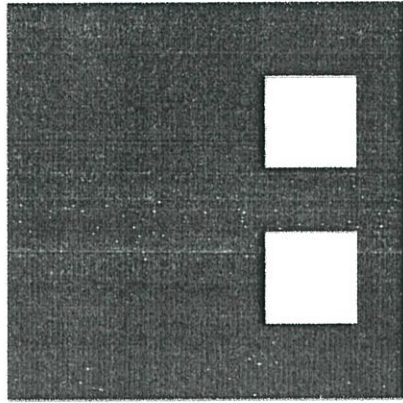
ในกระบวนการสร้างขั้วตกแมกนีโตไดโอด สามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลักๆ คือ 1. ขั้นตอนการออกแบบมาสก์ (Mask) เพื่อใช้เป็นแบบสำหรับขั้นตอนของการถ่ายแบบลงบนชิ้นงาน และ 2. ขั้นตอนกระบวนการสร้างอุปกรณ์ เป็นขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ด้วยกระบวนการผลิตต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยรายละเอียดของกระบวนการสร้างสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.4.1 การออกแบบกระจกต้นแบบ (Mask Design)

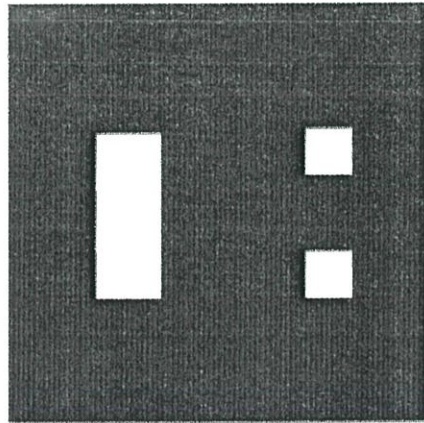
ในการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในขั้นตอนการถ่ายต้นแบบสำหรับกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี ในกระบวนการสร้างขั้วตกแมกนีโตไดโอด และใช้กระจกต้นแบบ 2 ชั้น ทั้งหมด 4 ชั้น ซึ่งออกแบบด้วยโปรแกรม L- edit ดังต่อไปนี้คือ

- มาส์ค 1: ขั้วแคโทด (Layer # 1 Cathode) ดังรูปที่ 2.30(ก) เป็นกระจกต้นแบบชั้นที่ 1 สำหรับใช้ในการสร้างขั้วแคโทด ขึ้นจากระบวนการยิงฝั้่งประจุด้วยฟอสฟอรัส
- มาส์ค 2: มาส์คเปิดช่องเชื่อมต่อ (Layer #2 Window Contact) เป็นกระจกต้นแบบชั้นที่ 2 สำหรับใช้ในการเปิดช่องเพื่อทำการเชื่อมต่อกับชั้นโลหะ แสดงดังในรูปที่ 2.30 (ข)
- มาส์ค 3: โลหะมาส์ค (Layer # 3 Metal) โดยกระจกต้นแบบชั้นที่ 3 นี้ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ เช่น อะลูมิเนียม (Al), ทองแดง (Cu) หรือ นิกเกิล (Ni) เป็นต้น เพื่อใช้ทำเป็นขาของอุปกรณ์ สำหรับเป็นจุดเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าภายนอก ดังรูปที่ 2.30(ค)
- มาส์ค 4: แพด (Layer 4: Pad) ใช้สำหรับสร้างพื้นที่ที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยสามารถแสดงส่วนประกอบของโครงสร้างต่างๆ ทั้งหมดของขั้วตกแมกนีโตไดโอดชนิดแคโทดแบบคู่ได้ดังรูปที่ 2.30(ง)

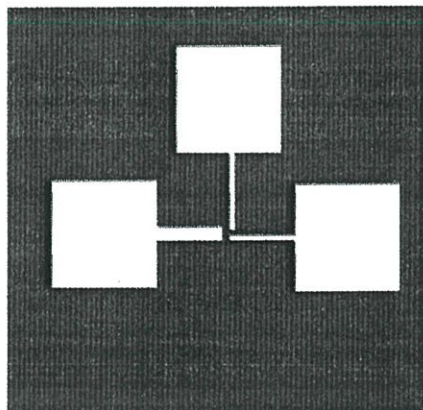
สำหรับ รูปที่ 2.31 แสดงกระจกต้นแบบชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างขั้วตกแมกนีโตไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.31(ก) และ 2.31(ข) ตามลำดับ



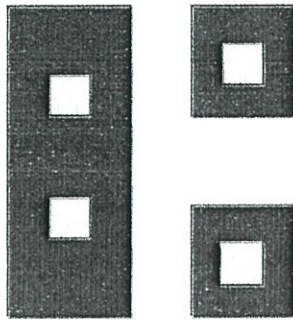
(ก) ชั้นที่ 1 (Layer#1 N - Select)



(ข) ชั้นที่ 2 (Layer#2 Window Contact)

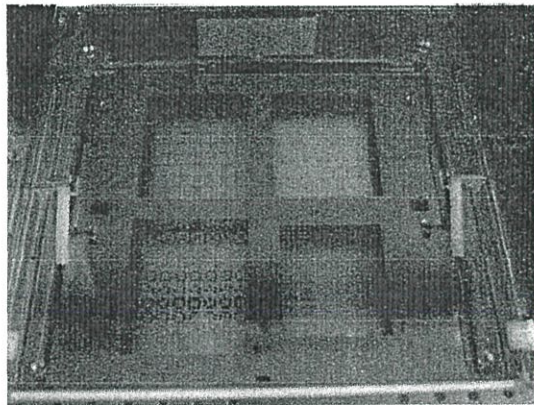


(ค) ชั้นที่ 3 (Layer#3 Metal)

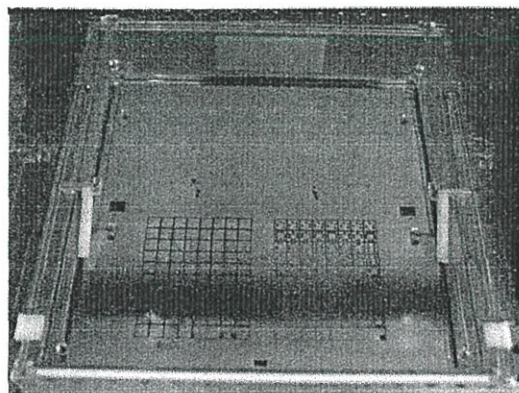


(ง) ชั้นที่ 4 (Layer#4 Pad)

รูปที่ 2.30 ลวดลายมาร์สค์คัตแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างซ็อดก็แมกนีโตไดโอด



(ก) กระจกคัตแบบชั้นที่ 1



(ข) กระจกคัตแบบชั้นที่ 2

รูปที่ 2.31 กระจกคัตแบบ

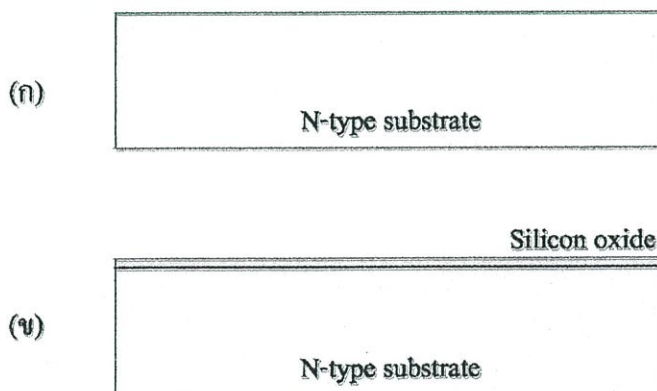
## 2.4.2 กระบวนการสร้างซ็อดกัแมกนีโตไดโอด

ขั้นตอนกระบวนการสร้างซ็อดกัแมกนีโตไดโอดสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักๆ ด้วยกันคือ 1. ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ 2. ขั้นตอนการสร้างชั้นแคโทด 3. ขั้นตอนการสร้างชั้นอลูมิเนียม และ 4. ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะสำหรับการใช้ในการเชื่อมอุปกรณ์กับขั้วไฟฟ้าภายนอก โดยขั้นตอนต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 2.4.2.1 ขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ (Oxide)

ขั้นตอนกระบวนการผลิตแรกสำหรับการสร้างซ็อดกัแมกนีโตไดโอด คือขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ สามารถแสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างต่างๆ ได้ดังนี้

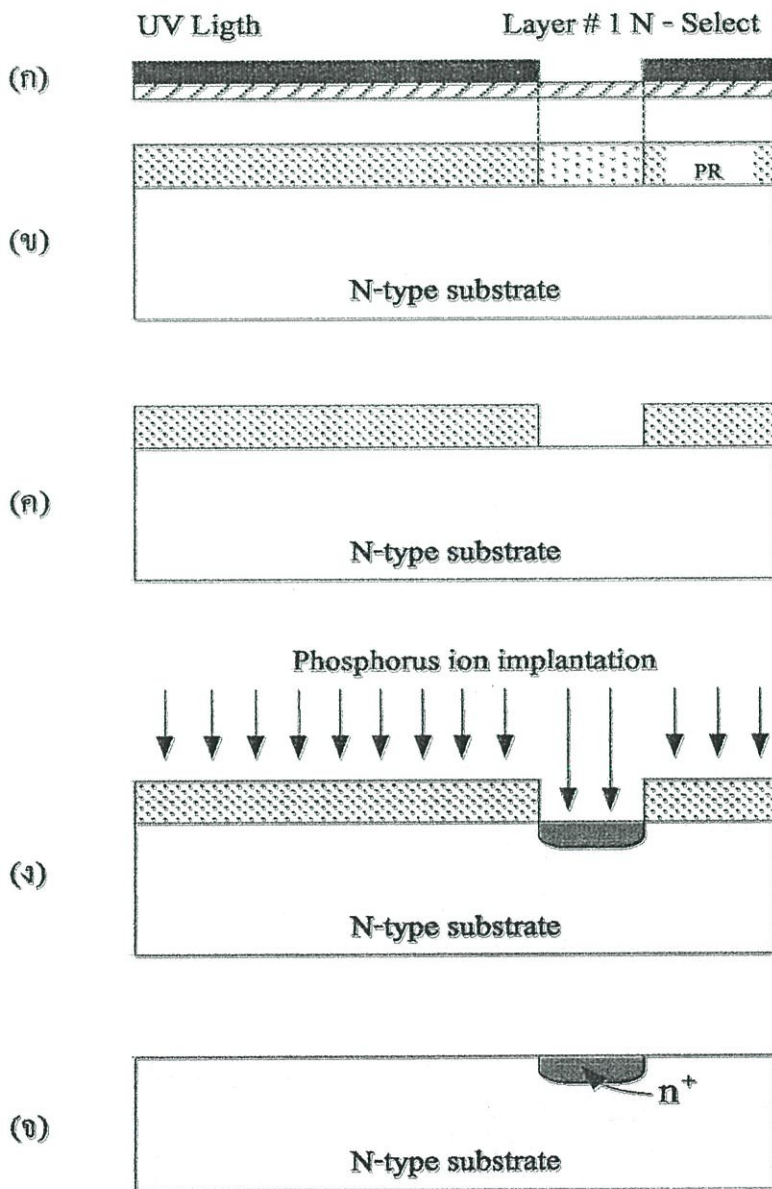
1. การสร้างซ็อดกัแมกนีโตไดโอด ใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ 100 ค่าความต้านทานแผ่น 20-30 โอห์ม-ซม. ความหนาของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นมีความหนาประมาณ 400  $\mu\text{m}$  เริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนโดยการต้มในกรด Piranha ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ ) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและออกไซด์ต่างๆ ออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 2.32 (ก)
2. จากนั้นเป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 15 nm. ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation) ด้วยเตาปลูกออกไซด์แบบแห้งที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  โดยมีความหนา 15 nm. ดังรูปที่ 2.32 (ข)



รูปที่ 2.32 (ก) - (ข) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

#### 2.4.2.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วแคโทด (Cathode Information)

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างขั้วแคโทด จากกระบวนการยิงฝั้่งประจุด้วยฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้เป็นสารชนิดเอ็นแบบเข้มข้น โดยขั้นตอนนี้รายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.33 (ก) - (ง) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วแคโทด

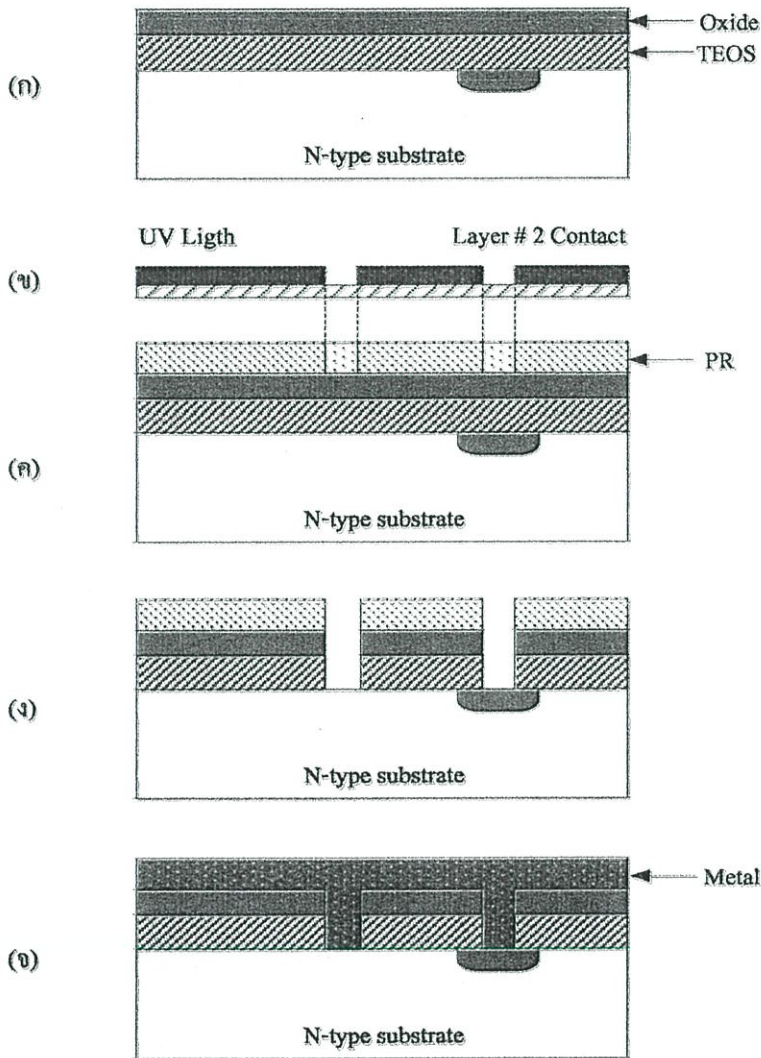
- 1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนก่อนกระบวนการสร้างลวดลายสำหรับการสร้างขั้วแคโทด
- 2 สร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อทำการเปิดช่องสำหรับการยิงฝั้ประจุ เพื่อให้ได้เป็นขั้วแคโทด โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นที่ 1 (Layer # 1 N-Select) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 (ก) และ 2.33 (ข)
- 3 กระบวนการ Develop เกิดเป็นช่องเปิดสำหรับการยิงฝั้ประจุ ดังรูปที่ 2.33(ค)
- 4 กระบวนการยิงฝั้ประจุฟอสฟอรัสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ  $1e^{16}$  อะตอม/ลบ. ซม. ได้เป็นขั้วแคโทดที่แสดงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบเข้มข้น(  $n^+$  ) ที่ความลึกของรอยต่อประมาณ 1 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.33(ง)
- 5 กระบวนการล้างน้ำยาไวแสงและกระบวนการแอนนีลที่อุณหภูมิ 900 °C ในเวลา 15 นาที ได้เป็นขั้วแคโทดดังรูปที่ 2.33 (จ) ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ (Contact information)
- 6 ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ เพื่อใช้เป็นขั้วทางเดินกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 2.4.2.3 ขั้วโลหะ (Contact information)

ขั้นตอนการสร้างขั้วโลหะ เพื่อใช้เป็นขั้วทางเดินกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- 1) กระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม TEOS ด้วยกระบวนการ LPCVD ได้ความหนา 500 nm. จากนั้นสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการ PECVD ได้ชั้นออกไซด์ที่มีความหนา 500 nm. ดังรูปที่ 2.34 (ก)
- 2) กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเพื่อเปิดช่อง สำหรับการใช้ในการสร้างขั้วโลหะ โดยใช้ชั้นที่ 2 (Layer # 2 Contact) ซึ่งเป็นลวดลายสำหรับการสร้างขั้วโลหะ ดังรูปที่ 2.34 (ข) และ 2.34 (ค)
- 3) กระบวนการ Develop ต่อมาล้างน้ำยาไวแสงส่วนที่ทำปฏิกิริยากับแสงออกไป
- 4) กระบวนการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุมผิวของแผ่นซิลิคอนออกไป ด้วยการกัดโดยสารละลาย HF 5 %

5.กระบวนการกัดชั้นฟิล์ม TEOS และ PEOXIDE ด้วยกระบวนการ Dry Etching ได้ช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 2.34 (ง)



รูปที่ 2.34 (ก) - (จ) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะ

6. ลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออกไป

7. กระบวนการสร้างชั้นโลหะ Metal ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ได้ความหนาชั้นโลหะ 1000 nm. ดังรูปที่ 2.34 (จ)

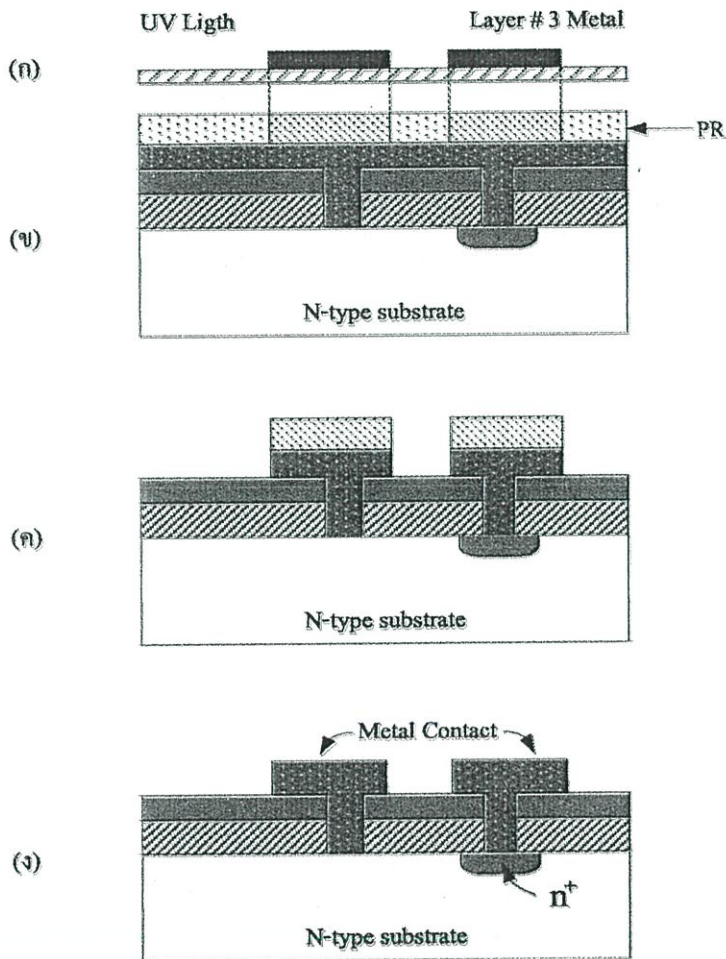
8. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับกระบวนการกัดชั้นโลหะ โดยใช้กระจกต้นแบบชั้นที่ 3 (Layer # 3 Metal) ดังรูปที่ 2.35 (ก) และ 2.35 (ข)



9.กระบวนการ Develop ล้างน้ำยาไวแสงส่วนที่ทาปฏิกิริยากับแสงออกไป

10.กระบวนการกัดชั้นโลหะ ( Metal Etching) ส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ดังรูปที่ 2.35 (ค)

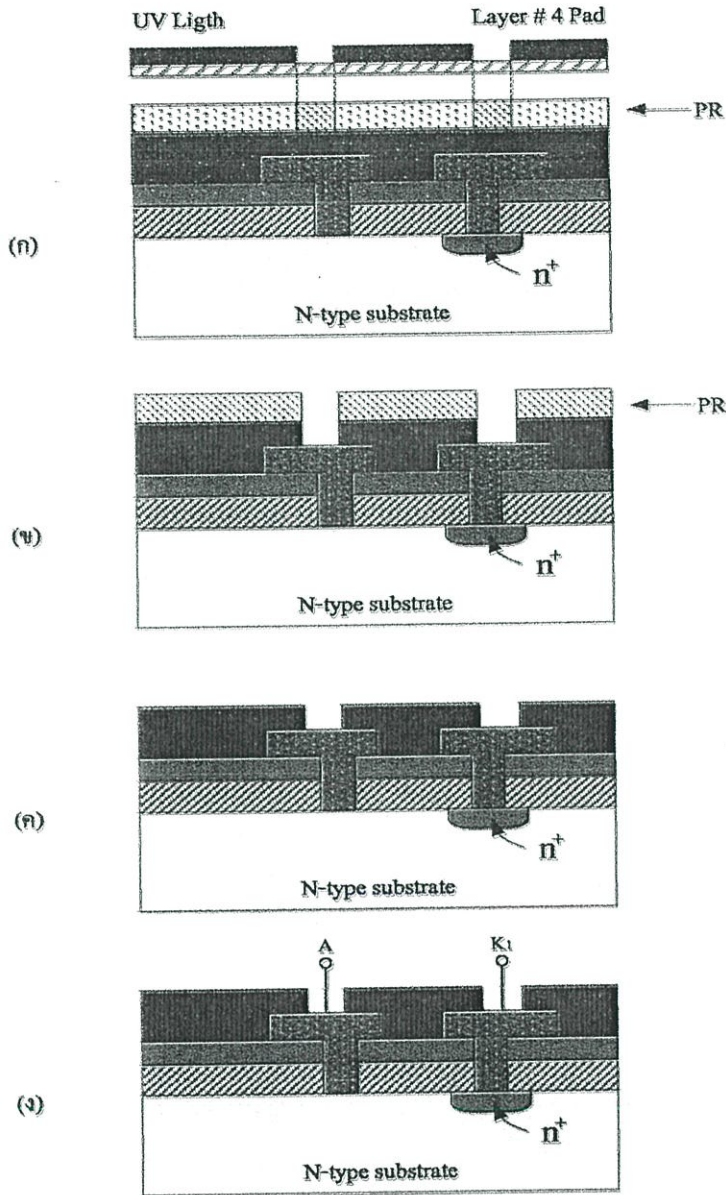
11.การลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือ โดยอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.35 (ง)



รูปที่ 2.35 (ก) - (ง) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างขั้วโลหะ (ต่อ)

#### 2.4.2.4 ขั้วโลหะเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก (Pad)

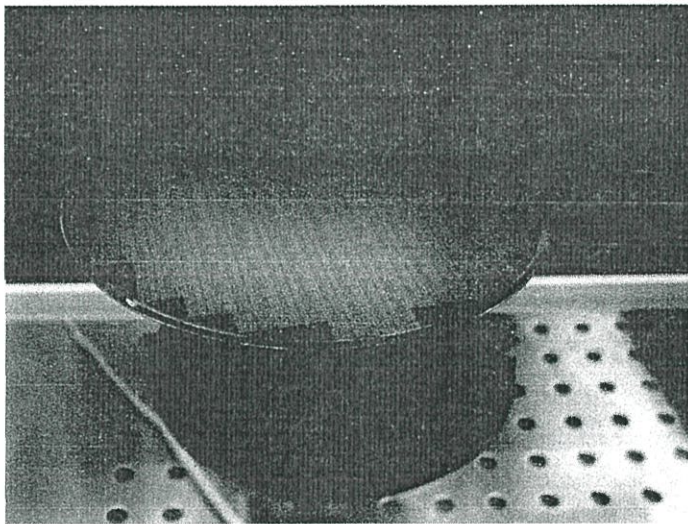
ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างขั้วคือแมกนีโตไดโอดคือ การสร้างขั้วโลหะสำหรับใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยรายละเอียดของกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.36 (ก) - (ง) แสดงขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้นโลหะสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก

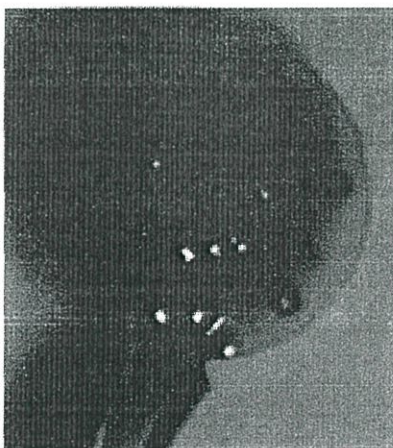
- 1 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ ด้วยกระบวนการ CVD ได้ความหนา 150 nm ดังรูปที่
- 2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อเปิดช่อง สำหรับการสร้างขั้วโลหะ โดยใช้กระจก  
 ดันแบบชั้นที่ 4 (Layer # 4 Pad) ซึ่งเป็นลวดลายสำหรับการสร้างแถบโลหะ ดังรูปที่ 2.36(ก) และ  
 2.36(ข)

- 3 กระบวนการ Develop ต่อมาล้างน้ำยาไวแสงส่วนที่ทาปฏิกิริยากับแสงออกไป
- 4 กระบวนการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์ (Nitride etch) ด้วยกระบวนการ Dry Etching แสดงดังรูปที่ 2.36 (ค)
- 5 กระบวนการสุดท้าย Sintering ด้วยเตาสร้างพันธะโลหะ โดยอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.36 (ง)



รูปที่ 2.37 ซ็อตก็แมกนีโตไดโอดในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่นที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 2.37 แสดงซ็อตก็แมกนีโตไดโอดที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วภายในแผ่นซิลิคอน 1 แผ่น ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 3600 ตัว เพื่อแสดงให้เห็นส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ และรูปที่ 2.38 แสดงการเชื่อมลวดโลหะสำหรับต่อใช้งานและการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ก่อนการนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.38 การเชื่อมต่อโลหะสำหรับต่อใช้งานกับอุปกรณ์ภายนอก

## บทที่ 3

### การจำลองแบบและกระบวนการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการจำลองแบบในการศึกษาออกแบบ และกระบวนการสร้างทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะใช้ในการสร้างอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ โดยกระบวนการสร้าง MSM จะเป็นการสร้างรอยต่อข้อตึกซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการสร้างข้อตึกไดโอดโดยมีการปรับเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย

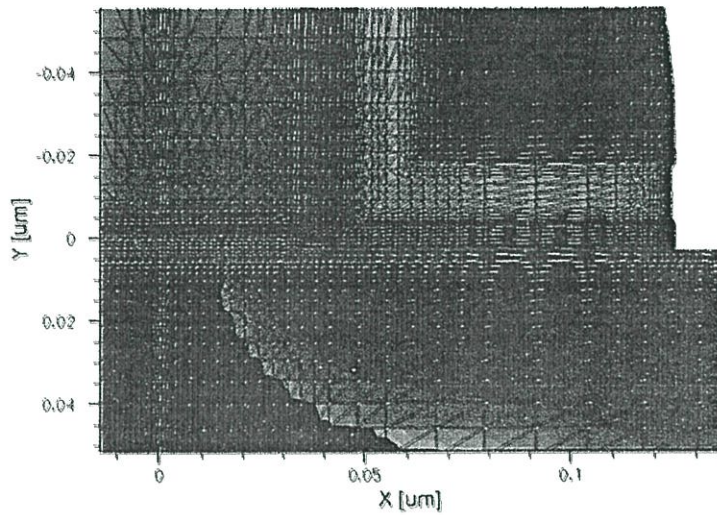
#### 3.1 บทนำ TCAD

Technology Computer-Aided Design (TCAD) คือการใช้คอมพิวเตอร์จำลองเพื่อพัฒนา และเพิ่มประสิทธิภาพของเทคโนโลยีกระบวนการสร้างและอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำ

การจำลองการทำงาน TCAD ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ (semiconductor Industry) ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความซับซ้อนมาก จึงได้มีการใช้ TCAD เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความเร็วในการค้นคว้าวิจัยหรือพัฒนาขั้นตอนกระบวนการสร้างที่เกี่ยวข้องผู้ผลิตตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device) ใช้ TCAD ดูผลการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ โดย TCAD แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ เช่น โครงสร้าง, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า, การฉีดพาหะ และการเบี่ยงเบนของพาหะเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก TCAD ประกอบด้วยส่วนหลักๆอยู่ 2 ส่วนได้แก่ การจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง (process simulation) และการจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

##### 3.1.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (process simulation)

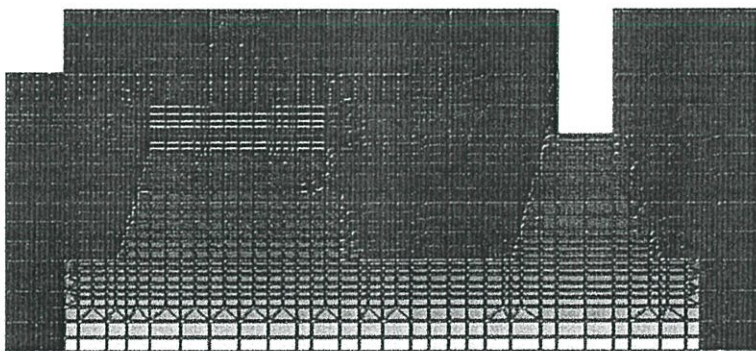
ในการจำลองแบบกระบวนการสร้างประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งเป็นการจำลองแบบที่อยู่บนพื้นฐานของสมการทางฟิสิกส์ ในส่วนของการจำลองแบบกระบวนการสร้างจะอยู่บนแผ่นฐานรอง เช่น ซิลิคอน จากนั้นส่วนของการจำลองแบบจะถูกเมส (mesh) หรือกริด (grid) และถูกแทนที่ด้วย finite-element structure เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป ซึ่งในส่วนการจำลองแบบกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การจำลองแบบกระบวนการสร้าง

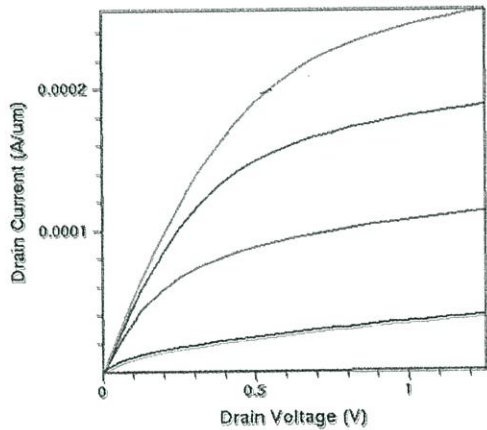
### 3.1.2 การจำลองแบบการทำงานของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (device simulation)

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



รูปที่ 3.2 การจำลองแบบตัวอุปกรณ์โดยการจำลองการทำงานด้วย TCAD

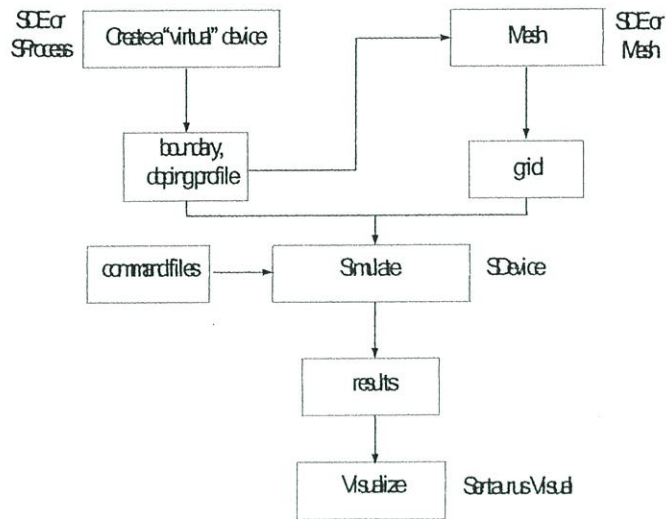
ในการจำลองแบบตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำขั้วไฟฟ้าจะถูกสร้างขึ้นและกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นต้น การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ใน TCAD จะแก้ปัญหาสมการต่าง ๆ มากมายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบ เช่น สมการปัวซอง (Poisson equation), สมการความต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) และสมการอื่นๆ หลังจากการแก้สมการเหล่านี้ ผลของกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปแบบที่ 3.3



รูปที่ 3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการจำลองแบบการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

### 3.2 โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD

กระบวนการจำลองโดยทั่วไปจะเริ่มจากการสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่ง อาจจะมาจากการจำลองด้วย sprocess หรือ SDE ก็ได้ตามด้วยการสร้าง mesh ด้วย SDE หลังจากนั้นจึง นำโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ผ่านการ mesh แล้วไปจำลองหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงได้โดย Sentaurus visual โปรแกรมส่วนใหญ่จะถูกสั่งงานจาก command file (นามสกุล .cmd) ซึ่งเป็น text file ปกติที่สามารถสร้างและแก้ไขได้ด้วย text editor ทั่วไป แต่ชุดคำสั่งที่ใช้จะต่างออกไปในแต่ละโปรแกรมโดยรูปที่ 3.4 แสดงภาพรวมของการจำลองโดย TCAD



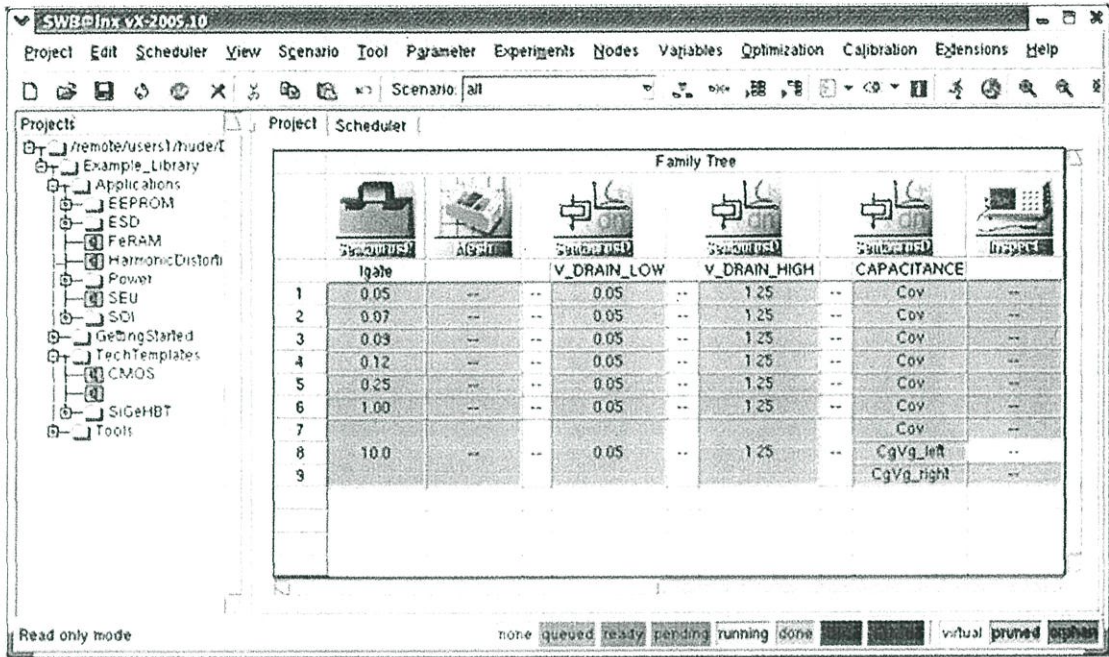
รูปที่ 3.4 ภาพรวมของการจำลองโดย TCAD

โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD มีส่วนประกอบ 6 ส่วนดังนี้

- 3.2.1 Sentaurus Workbench
- 3.2.2 Sentaurus Process
- 3.2.3 Sentaurus Structure Editor
- 3.2.4 Sentaurus Device
- 3.2.5 Sentaurus Visual

### 3.2.1 Sentaurus Workbench (SWB)

เป็น graphic user interface ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางรวมของโปรแกรมต่างๆของ TCAD การสั่งงาน tool ต่างๆและการกำหนด Tool flow ก็จะทำผ่านโปรแกรมนี้อีกเช่น การจำลองแบบกระบวนการสร้าง (Sentaurus Process) [23], การจำลองแบบตัวอุปกรณ์ (Sentaurus Device) [24] และเครื่องมือในการวิเคราะห์ (Inspect) เป็นต้น โดยโปรแกรม Sentaurus Workbench สามารถให้ผู้ใช้กำหนดและเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามที่ต้องการได้เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการจำลองการทำงาน โดย TCAD ในส่วนของ Sentaurus Workbench แสดงดังรูปที่ 3.5



รูป  
ที่

### 3.5 หน้าต่างการทำงานของ Sentaurus Workbench

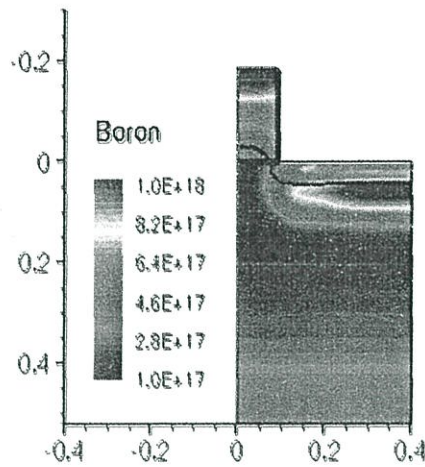
#### 3.2.2 Sentaurus Process (sprocess)

Sentaurus Process เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองการทำงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนกระบวนการสร้าง เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing and oxidation ซึ่งใน Sentaurus Process จะใช้คำสั่งในการจำลองแบบการทำงานซึ่งจะประกอบไปด้วยคำสั่งต่างๆ เช่น การกำหนดชนิดและตำแหน่งฐานรอง, กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) หรือกระบวนการยิงฝังประจุ (implantation) เป็นต้น โดยรูปที่ 3.6 แสดงกระบวนการจำลองแบบการยิงฝังประจุ

#### 3.2.3 Sentaurus Structure Editor

เป็นโปรแกรมสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์โดยการเลียนแบบโครงสร้างจริงด้วยรูปทรงเรขาคณิตและยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางเรียกโปรแกรมสำหรับสร้าง mesh เพื่อใช้ในการจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป Sentaurus Structure Editor [25] เป็นส่วนของการออกแบบรูปร่างตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยสามารถที่จะทำการจำลองแบบรูปร่างและขนาดของตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ โดยขั้นตอนแรกของการจำลองการทำงานทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เราจะทำการสร้างรูปร่างของตัวอุปกรณ์เช่น สีเหลี่ยมมุมฉาก





รูปที่ 3.6 การยิงฝังประจุใน Sentaurus Process

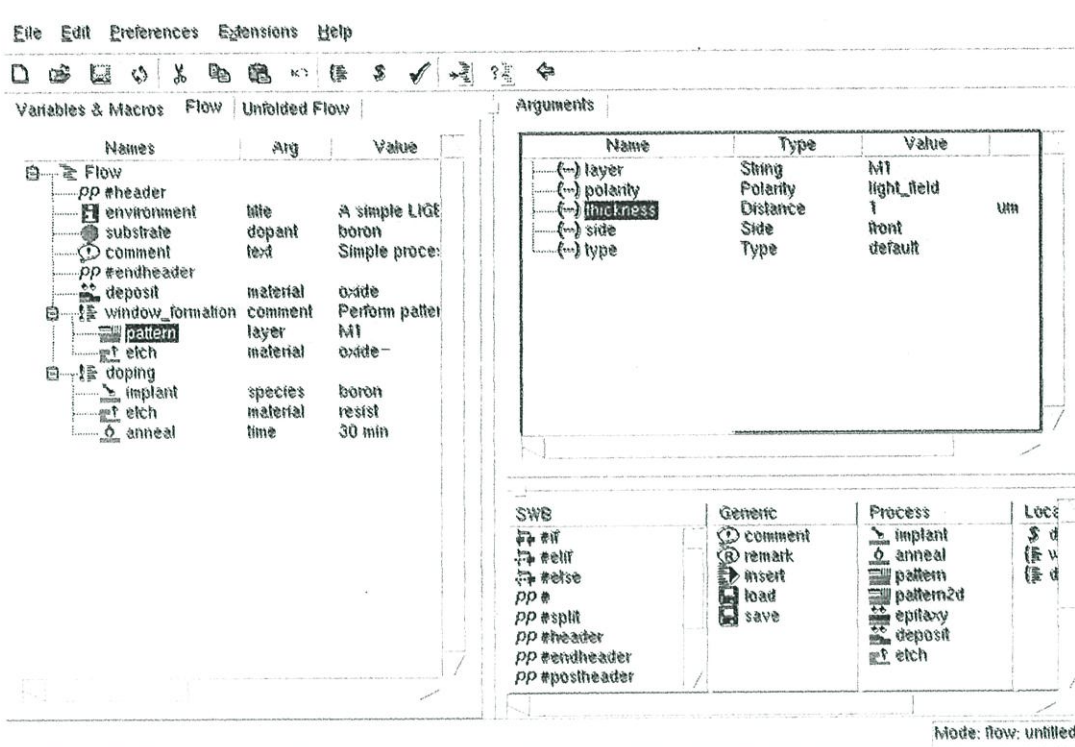
(rectangles), รูปหลายเหลี่ยม (polygons), ลูกบาศก์ (cuboids), รูปทรงกระบอก (cylinders), รูปทรงกลม (spheres) และรูปต่างๆ เป็นต้น ซึ่งรูปร่างและโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเกิดจากรูปร่างง่ายๆ เหล่านี้ ซึ่งจะออกแบบผ่านใน command file หรือออกแบบผ่าน Ligament ก็ได้โดยในที่นี้เลือกการออกแบบผ่าน Ligament

### 3.2.3.1 Ligament

Ligament คือหนึ่งในตัวช่วยในการออกแบบโครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยส่วนของ Ligament ประกอบไปด้วย 2 ส่วนดังนี้ Ligament Flow Editor และ Ligament Layout Editor โดยจะทำงานร่วมกันเพื่อให้ได้โครงสร้างของอุปกรณ์ตามที่ต้องการ

#### - Ligament Flow Editor

เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ช่วยในการกำหนดกระบวนการสร้างต่างๆของตัวอุปกรณ์ทั้งหมดตามที่ได้ออกแบบไว้เช่น etching, deposition, ion implantation, thermal annealing และ oxidation โดยที่ในแต่ละกระบวนการผลิตเราสามารถที่จะกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของกระบวนการได้ เช่น การกำหนดระนาบ, ชนิด, ขนาดของแผ่นฐานรองซิลิคอน การกำหนดมุมของการยิงประจุ การกำหนดอุณหภูมิการแพรวร่วมถึงกำหนดความเข้มข้นอะตอมสารเจือและระยะความลึกของรอยต่อ เป็นต้น รูปที่ 3.7 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

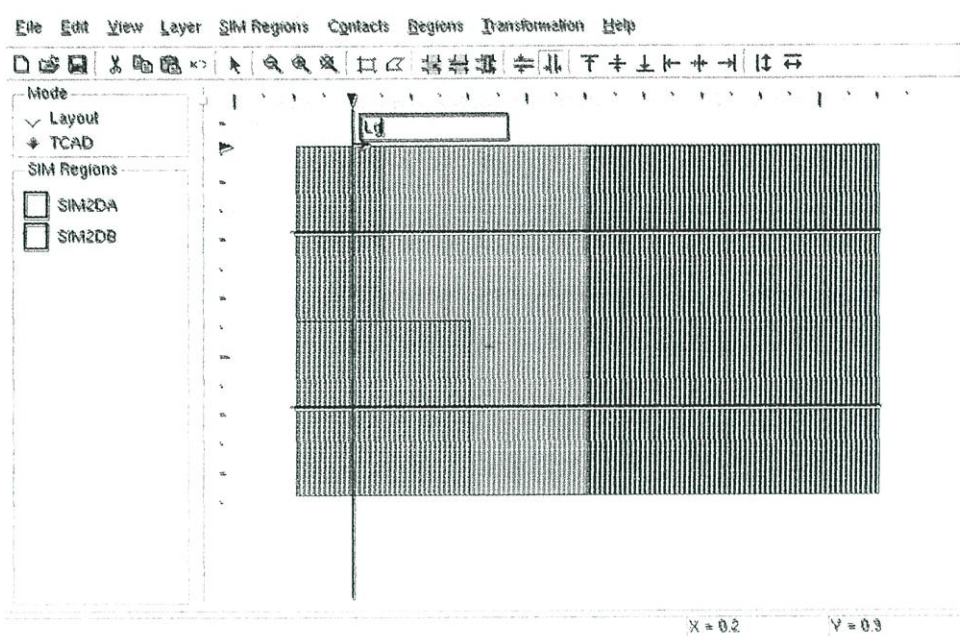


รูปที่ 3.7 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Flow Editor

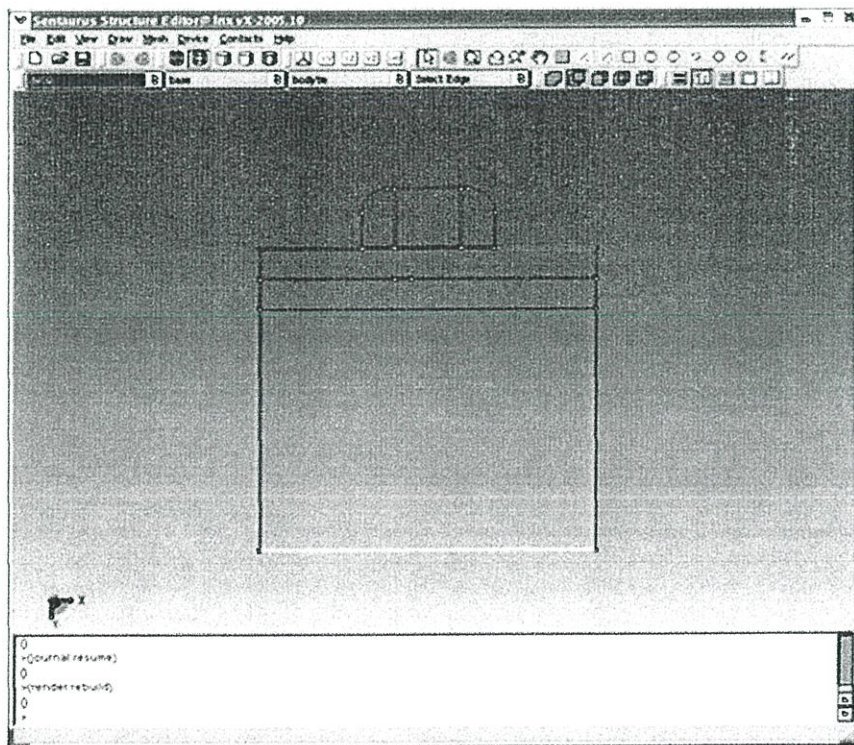
### - Ligament Layout Editor

เป็นเครื่องมือใน Ligament ที่ช่วยในการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของตัวอุปกรณ์เสมือนกับการออกแบบกระจกต้นแบบ โดยที่เราสามารถกำหนดขอบเขตของการจำลองได้ว่าจะจำลองแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ รวมถึงการเปลี่ยนรูปร่างของอุปกรณ์ สามารถทำได้โดยไม่ต้องออกแบบใหม่เพียงใช้เส้นพารามิเตอร์ตัดผ่านส่วนที่ต้องการ และกำหนดค่าในหน้า Sentaurus Workbench รูปร่างของอุปกรณ์จะเปลี่ยนไปตามที่เราออกแบบรูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor

ในส่วนการจำลองแบบทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ เราต้องกำหนดหน้าสัมผัสไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันจากภายนอกโดยหลังจากกำหนดหน้าสัมผัสแล้วจะแสดงหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งส่วนหน้าสัมผัสไฟฟ้าที่ถูกกำหนดจะแสดงเส้นสีเกิดขึ้นตามคุณสมบัติหน้าสัมผัสที่ตั้งไว้

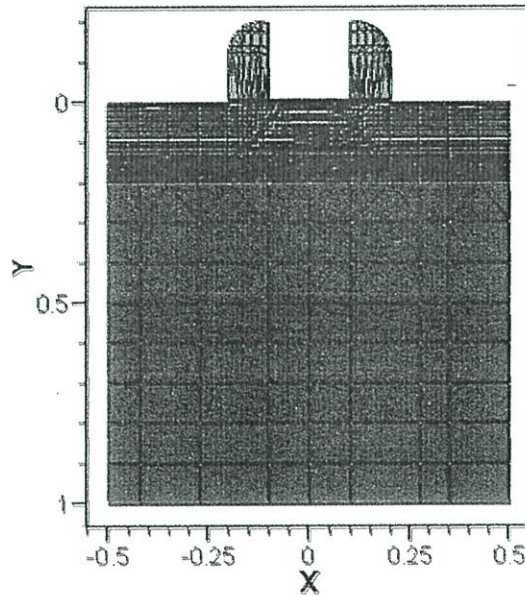


รูปที่ 3.8 หน้าต่างการทำงานของ Ligament Layout Editor



รูปที่ 3.9 หน้าสัมผัสไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ในการจำลองการทำงาน

จากนั้นจะเป็นการสร้างเมส (mesh) ให้กับตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการจำลองการทำงานสามารถที่จะแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ รูปที่ 3.10 แสดงการจำลองแบบตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างรูปร่างตัวอุปกรณ์และสร้างเมสเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.10 การจำลองตัวอุปกรณ์หลังจากการสร้างเมส

หลังจากสร้างเมสจากนั้นก็เข้าสู่ในส่วนของการกำหนดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ ซึ่งอยู่ในส่วนของ Sentaurus Device

#### 3.2.4 Sentaurus Device

Sentaurus Device เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่ใช้จำลองแบบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า (electrical), ความร้อน (thermal) หรือแสง (optical) ในตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งในคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆมากมายที่เราสามารถที่จะนำมาใช้กับตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหรือคุณสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสภาพเงื่อนไขในการจำลองแบบ Sentaurus Device จึงถูกใช้ในการประเมินตัวอุปกรณ์และเพื่อความเข้าใจในการทำงานของตัวอุปกรณ์เพื่อให้อุปกรณ์ภายใต้คุณสมบัติต่างๆทำงานได้ดีที่สุดในส่วน Sentaurus Device ประกอบด้วยคำสั่งต่างๆมากมาย เช่น

#### 3.2.4.1 File

#### 3.2.4.2 Electrode

#### 3.2.4.3 Physics

#### 3.2.4.4 Plot

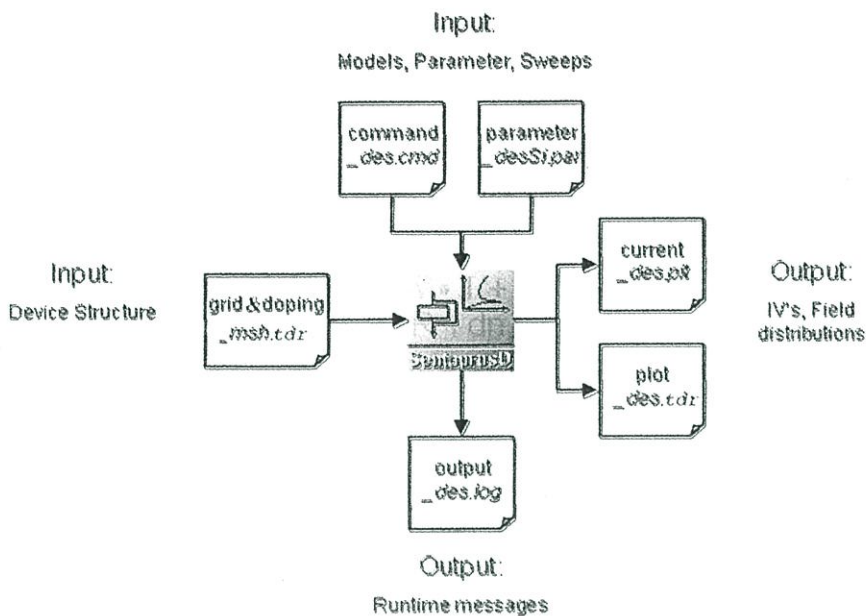
#### 3.2.4.5 Solve

### 3.2.4.1 File

ในส่วน file จะเป็นการกำหนดไฟล์อินพุต และเอาต์พุต ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เช่น

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

ในส่วนของ Input Files จะเป็นไฟล์ที่ได้หลังจากการสร้าง Sentaurus Structure Editor เสร็จแล้ว เช่น รูปร่างของตัวอุปกรณ์ก็จะประกอบไปด้วยขนาดและวัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวอุปกรณ์, ความเข้มข้นอะตอมสารเจือ, ลักษณะการโด๊ป, ตำแหน่งของหน้าสัมผัสไฟฟ้า และขนาดของการแบ่งกริด (grid) หรือเมส (mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ และในส่วน Output Files ก็จะประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆที่ต้องการหลังจาก Sentaurus Device ดำเนินการเสร็จแล้ว ซึ่งไฟล์เอาต์พุตเหล่านี้ก็จะประกอบด้วยโมเดลทางฟิสิกส์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณแล้ว เช่น ไฟล์ Current ก็ประกอบไปด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ส่วนไฟล์ \_des.log เราใช้สำหรับตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งไฟล์อินพุต เอาต์พุต ต่างๆแสดงดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนผังไฟล์อินพุตและเอาต์พุตใน Sentaurus Device

#### 3.2.4.2 Electrode

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

```
Electrode {
{ Name="source" Voltage=0.0 }
{ Name="drain" Voltage=0.0 Resistor=100}
{ Name="gate" Voltage=0.0 Barrier=-0.55}
{ Name="base" Voltage=0.0 Current=0 Barrier=-0.55}
{ Name="HEMTgate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=0.78}
}
```

### 3.2.4.3 Physics

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

```
Physics {  
    Mobility( DopingDep HighFieldSat )  
}
```

ซึ่ง DopingDep หมายถึง การลดลงของสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากความเข้มข้นอะตอมสารเจือ HighFieldSat หมายถึง ความเร็วอิ่มตัวของพาหะ (velocity saturation) เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง model ที่ใช้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของอุปกรณ์ (CMOS, Diode, BJT ฯลฯ) และส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของผลลัพธ์และเวลาที่ใช้ในการจำลอง

### 3.2.4.4 Plot

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

```
Plot {  
    eDensity hDensity eCurrent hCurrent  
    Potential SpaceCharge ElectricField  
    eMobility hMobility eVelocity hVelocity  
    Doping DonorConcentration AcceptorConcentration  
}
```

### 3.2.4.5 Solve

ส่วนนี้เป็นส่วนที่กำหนดขั้นตอน การวัด คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ต้องการจำลอง โดยสามารถกำหนดได้ในกรอบของคำสั่ง Solve {...} โดยจะทำการจำลองเรียงกันไปตามลำดับที่ปรากฏใน Solve {...} เช่น

```
Coupled (Iterations=100) { Poisson }
```

หาคำตอบเริ่มต้นโดยแก้สมการ Poisson เพียงอย่างเดียว

```
Coupled { Poisson Electron Hole }
```

หาคำตอบเริ่มต้นของสมการ Drift-Diffusion ของ Electron และ Hole โดยเริ่มจากคำตอบเริ่มต้นในขั้นที่แล้ว

```
Quasistationary (
```

```
Initialstep=1e-2 Increment=1.4
```

```
Maxstep=0.025 Minstep=1.e-6
```

```
Goal { Name="anode" Voltage=@vstop@ }
```

```
){ Coupled { Poisson Electron Hole } }
```

เป็นการจำลองแบบ Quasistationary (DC) โดยค่อยๆเปลี่ยน (sweep) ศักย์ไฟฟ้าปัจจุบันจนถึงค่าที่กำหนดใน Goal { ... } แล้วเก็บค่ากระแสในแต่ละขั้นใน output file

ตัวอย่างด้านบนกำหนดให้จ่ายศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว anode ไปจนถึง @vstop@ (เป็นชื่อ parameter ที่สามารถกำหนดค่าใน SWB ได้ ๐)

Step ของการ sweep ถูกกำหนดโดย Initialstep, Increment, Maxstep และ Minstep ค่า step ที่ใช้เพิ่ม ศักย์ไฟฟ้าสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\text{realstep} = \text{step} \times (\text{vstop} - \text{vnow})$$

vstop คือค่าที่กำหนดใน Goal { ... }

vnow คือค่าปัจจุบันก่อนที่จะถึง Quasistationary { ... }

ตัวอย่างเช่นถ้าขณะนี้ที่ขั้ว anode มีศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์และต้องการ sweep ถึง 5 โวลต์ค่า

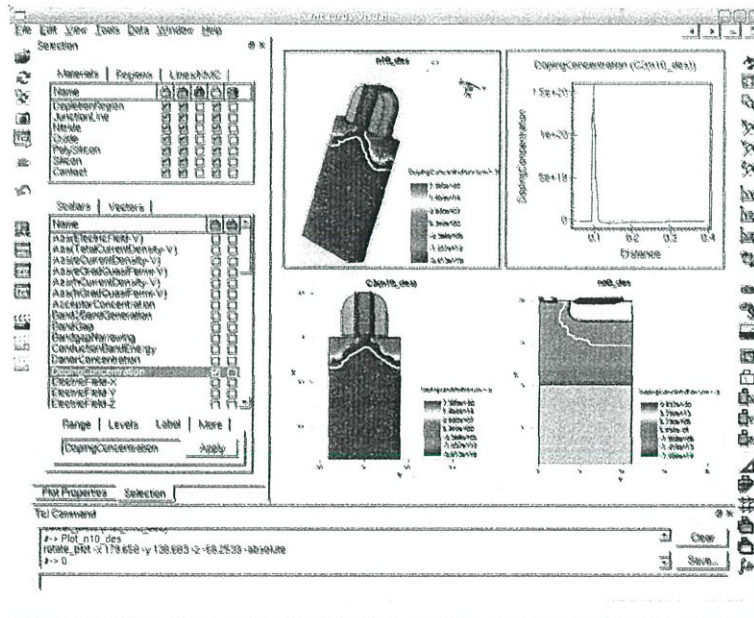
Initialstep, Maxstep และ Minstep ดังตัวอย่างด้านบนจะหมายถึง 0.05, 0.125 และ 5e-6 โวลต์



ตามลำดับส่วน Increment จะเป็นตัวคูณเพื่อเพิ่มค่า step ถ้า step ของ iteration รอบที่แล้วทำให้หาคำตอบของสมการได้ จุดประสงค์ของ Increment เพื่อลดระยะเวลาในการหาคำตอบในเงื่อนไขที่กำหนดใน Goal { ... }

### 3.2.5 Sentaurus Visual

Sentaurus visual เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ดูผลจากการจำลองแบบ โดยสามารถแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ ทั้งแบบสองและสามมิติได้ Sentaurus visual สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ เช่น ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอนหรือโฮล, ศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้า, โมบิลิตี, ความเร็วของพาหะหรือความเข้มข้นสารเจือ เป็นต้น ซึ่งหน้าต่างหลักของ Sentaurus visual แสดงดังรูปที่ 3.12 จากรูปจะเห็นได้ว่า Sentaurus visual นอกจากจะแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์แล้วยังสามารถแสดงผลการจำลองในรูปแบบของกราฟ XY ได้อีกด้วย เช่น การแสดงผล IdVd-curve, CV-curve, ปริมาณความหนาแน่นการแพร่, ปริมาณกระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.12 หน้าต่างของ Sentaurus visual

โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เราใช้โปรแกรมการจำลองแบบ TCAD ในส่วนของการจำลองแบบตัวอุปกรณ์ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อจำลองกลไกการทำงานของแมกนีโตทรานซิสเตอร์หลังจากนั้นจึงนำโครงสร้างไปพัฒนาเป็นแมกนีโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3 แกน

## บทที่ 4

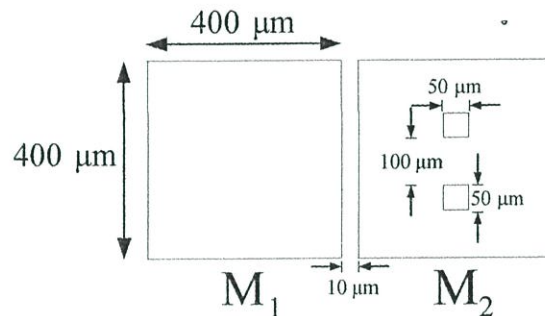
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ทำการศึกษานในงานวิจัยนี้ คืออุปกรณ์เซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับปริมาณพลังงานได้มากกว่าหนึ่งชนิด โดยในที่นี้ระบุเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยจะกล่าวถึงหลักการแนวความคิดการออกแบบ การทำงานและผลที่ได้ และการสร้างอุปกรณ์ด้วยกระบวนการสร้างทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะถือว่าโครงสร้าง MSM เป็นโครงสร้างหลักของการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่แล้ว เราจะทำการเน้นไปที่การออกแบบการตรวจจับสนามแม่เหล็กในโครงสร้างนี้โดยยังไม่มีผู้นำเสนอมาก่อน ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงจะไม่ทำการศึกษาแต่จะทำการศึกษาคูณสมบัติทางสนามแม่เหล็ก

#### 4.1 หลักการออกแบบ

ในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้ เริ่มต้นจากการพิจารณาความเป็นไปได้โดยผู้วิจัยได้ทำการวิจัยออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็กมาช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้ว โดยมากการทำงานจะอยู่ในโหมดกระแสเป็นหลัก เพราะว่าโครงสร้างโหมดแรงดันนั้นโครงสร้างแบบฮอลล์เพลต (Hall plate) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางและมีข้อดีหลายประการคือใช้งานง่าย ราคาถูก กระบวนการสร้างง่ายสามารถสร้างได้ในทุกกระบวนการสร้างวงจรรวมมาตรฐานทั่วไป แต่การใช้งานแบบโหมดกระแสมีการใช้งานกันน้อย เพราะจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้งานในรูปแบบตัวต้านทานแมกนีโตริซิสแตนซ์ (Magnetoresistance) แต่ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจะยังมีค่าน้อยจะต้องใช้กับวัสดุที่มีค่าโมบิลิตีที่สูงมาก ๆ จึงจะเห็นผลที่ชัดเจน ประกอบกับค่าแมกนีโตริซิสแตนซ์ที่ใช้วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกที่อาศัยหลักการหมุนอิเล็กตรอนผ่านเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำจะมีผลต่อความต้านทานกระแสที่มากกว่าปรากฏการณ์ที่ใช้หลักการฮอลล์โหมดกระแส จึงยังทำให้การทำงานโหมดกระแสถูกมองข้ามไปและทำให้ไม่สามารถที่จะนำไปสู่แนวความคิดการออกแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ที่สามารถวัดสนามแม่เหล็กและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ผู้วิจัยได้หยิบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือที่เรียกว่าโครงสร้าง MSM (Metal-Semiconductor-Metal) มาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบ โดยเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าโครงสร้างนี้ใช้ในการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นแสง รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างนี้ใช้รอยต่อซีกทั้งสองรอยต่อชนกัน รูปแบบที่นิยมมักจะทำเป็นอินเตอร์ดิจิตอล (interdigital) และแบบพื้นฐานที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม จากรอยต่อซีกก็ซึ่งผู้วิจัยเคยออกแบบซีกก็แมกนีโตไดโอดที่เป็นอุปกรณ์โหมดการทำงานแบบกระแสซึ่งสามารถใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี โดยการทำงานของอุปกรณ์นี้สามารถทำงานได้ทั้งการไบแอสไปข้างหน้า (forward bias) และการไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นพาหะนำกระแสเพียงชนิดเดียวทำให้การทำงานมีการตอบสนองเร็วกว่าการใช้พาหะนำกระแสที่เป็นโฮล เมื่อพิจารณาหลักการและโครงสร้างจึงมี

ความเป็นไปได้ที่โครงสร้าง MSM จะสามารถนำมาเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน โดยเพื่อที่จะรักษาการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงยังคงรักษาการออกแบบพื้นที่ในส่วนโลหะให้มีขนาดใหญ่เพราะเป็นพื้นที่ในการรับแสง ซึ่งในแง่การตรวจจับสนามแม่เหล็กอาจจะไม่จำเป็นที่จะต้องใช้พื้นที่ที่มีขนาดใหญ่แต่อย่างใด จากรูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ออกแบบเมื่อมองจากด้านบนจะเห็นมีรูปทรงทางเรขาคณิตในส่วนของโลหะซึ่งมีขนาด  $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$  ซึ่งจะใช้เป็นพื้นที่รับแสงในโครงสร้างปกติ ในส่วนของการตรวจจับสนามแม่เหล็ก เรา

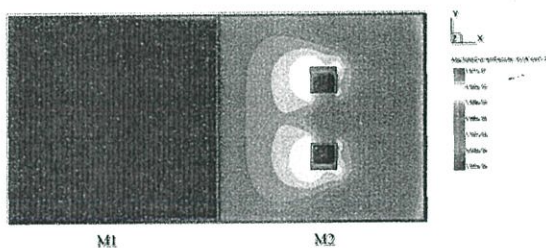


รูปที่ 4.1 แผนภาพด้านบนของอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โครงสร้าง MSM

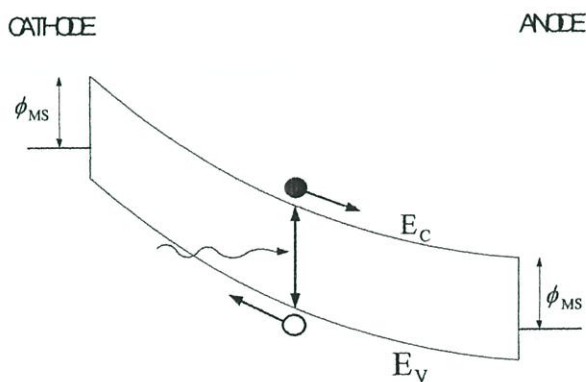
อาศัยหลักการของแมกนีโตไดโอดแบบกระแส โดยแมกนีโตไดโอดแบบกระแสจะต้องมีขั้วคาโทดสองขั้ว เพื่อเป็นช่องทางที่จะทำให้เกิดค่าความแตกต่างกระแสเออร์ทพุท แต่จากโครงสร้าง MSM ซึ่งเป็นอุปกรณ์สองขั้วเท่านั้น ดังนั้นจากประสิทธิภาพการวิจัยอุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็กมาก่อนหน้านี้ทำให้สามารถที่จะออกแบบให้อุปกรณ์มีขั้วโลหะการรับแสงเหมือนเดิมแต่สามารถแยกกระแสในโลหะขึ้นเดี่ยวนี่เป็นสองคอนแทค ทำให้กระแสในโลหะสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนไหลผ่านคอนแทคเท่ากัน โดยอาศัยการพิจารณาที่แตกต่างจากโครงสร้าง MSM เดิมที่มองโลหะเป็นขั้วกระแสและพื้นที่รับแสงแต่จะพิจารณาว่าชั้นโลหะเป็นวัสดุชั้นหนึ่งที่สามารถมีขั้วต่อกระแสออกไปภายนอกผ่านคอนแทคได้อีกเมื่อพิจารณาในมุมมองการตรวจวัดสนามแม่เหล็ก ดังนั้นโครงสร้างของอุปกรณ์เซนเซอร์นี้จึงออกแบบมาในลักษณะดังรูปที่ 4.1 โดยโลหะด้านหนึ่งเป็นขั้วโลหะและพื้นที่รับแสงส่วนโลหะอีกด้านหนึ่งมีขั้วคอนแทคสองคอนแทคต่อกับโลหะอีกทีหนึ่ง ซึ่งคอนแทคทั้งสองจะไปเชื่อมกับแพด (pad) สำหรับต่อกับตัวถังภายนอกอีกทีหนึ่ง หรือถ้าเป็นอุปกรณ์ในวงจรรวมก็นำไปต่อกับอุปกรณ์อื่นอีกทีหนึ่ง รูปที่ 4.1 แสดงมิติต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ออกแบบ สำหรับระยะห่าง  $10\mu\text{m}$  นั้นอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็กเป็นตัวกำหนดซึ่งก็มีค่าใกล้เคียงกับการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งค่านี้สามารถใช้งานร่วมกันได้ ส่วนการออกแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยมนั้นเนื่องจากโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตเจจไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก ดังนั้นทางออกร่วมกันคือใช้เป็นแบบรูปสี่เหลี่ยมซึ่งรูปแบบนี้ไม่เป็นอุปสรรคในการตรวจจับพลังงานทั้งสองด้วย

โครงสร้างนี้ สำหรับพื้นที่รับแสงที่ใหญ่มีความจำเป็นสำหรับการรับกระแสแสงแต่ในทางตรวจจับแสงก็ถือเป็นข้อเสียที่ตามมาด้วยคือจะมีกระแสมีค่าสูงตามพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น แต่ในมุมมองของการตรวจจับสนามแม่เหล็กโหมดกระแสสั้น เนื่องจากโครงสร้าง MSM นั้นเป็นการใช้ค่ากระแสย้อนกลับได้เท่านั้น ดังนั้นในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเราจะต้องใช้โหมดการให้ไบแอสย้อนกลับกับรอยต่อข้อต่อที่ ดังนั้นในอุปกรณ์เซนเซอร์แบบแมกนีโตไดโอด การใช้งานแบบกระแสย้อนกลับมีความยากกว่ากระแสไปข้างหน้าทั้งนี้เพราะว่าค่ากระแสย้อนกลับมีค่าน้อยทำให้การตรวจจับทำได้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้าง MSM นี้ใช้ค่ากระแสย้อนกลับในการทำงาน แต่ความต้องการพื้นที่รับแสงที่ใหญ่กลับเป็นผลดีต่อการวัดสนามแม่เหล็ก เพราะจะทำให้ค่ากระแสย้อนกลับมีค่ามากขึ้น ทำให้การตรวจจับสนามแม่เหล็กทำได้ดีขึ้น และกระแสที่มากนั้นก็เป็นข้อจำกัดที่มีอยู่เดิมของโครงสร้าง MSM อยู่แล้วจึงไม่ได้เป็นส่วนทำให้การตรวจจับแสงมีประสิทธิภาพลดลง แต่การวัดแสงอาจมีประสิทธิภาพลดลงได้เพราะโครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมที่ให้ค่ากระแสแสงได้น้อยกว่าโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตอล

#### 4.2 การจำลองแบบและผลการจำลองแบบ

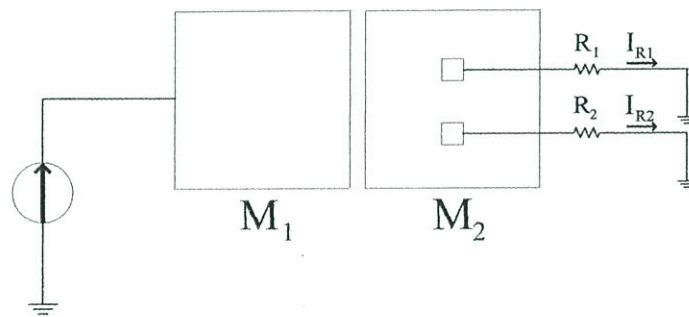


รูปที่ 4.2 แผนภาพโมเดลการจำลองแบบอุปกรณ์เซนเซอร์



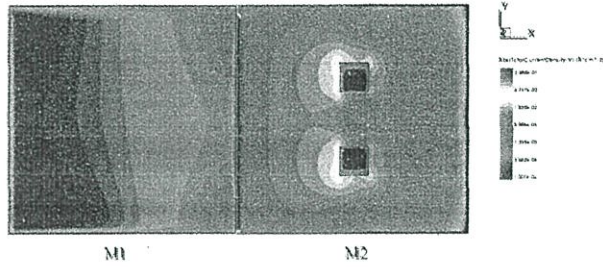
รูปที่ 4.3 แผนภาพแถบพลังงานและทิศทางกระแสแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นขณะที่ไบแอสโครงสร้าง MSM ระหว่างขั้วแอโนดและคาโทด

รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองในการศึกษาเพื่อออกแบริมาตร โดยมิติต่างๆเป็นไปตามรูปที่ 4.1 จากแบบจำลองคือพื้นที่ของโลหะอลูมิเนียมแสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสที่เกิดในอุปกรณ์ขณะได้รับไบแอส โดยการไบแอสใช้ค่ากระแสคงที่ไหลผ่านขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เพื่อที่จะให้กระแสนย้อนกลับอิเล็กตรอนไหลจากขั้ว M2 ไปยังขั้ว M1 ออกทางคอนแทคทั้งสองในลักษณะที่ M1 เป็นขั้วอาโนดและ M2 เป็นขั้วคาโทด กระแสอิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากขั้วคาโทดมาอาโนดดังแสดงในแผนภาพในรูป 4.3 เราทำการบ่อนแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่ขั้ว M1 ลงกราวด์ ส่วนที่ขั้ว M2 จากคอนแทคต่อตัวต้านทาน R ลงกราวด์ วงจรที่ใช้ในการศึกษาสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.4



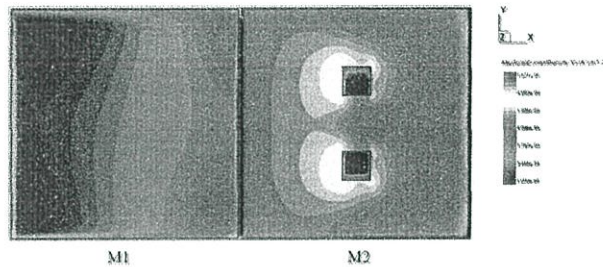
รูปที่ 4.4 แสดงวงจรวัดในการศึกษาคุณสมบัติตรงจับสนามแม่เหล็ก

เริ่มต้นจากการไบแอสโครงสร้างให้พร้อมการใช้งานโดยยังไม่ให้สนามแม่เหล็กกับอุปกรณ์ โดยดูการกระจายกระแสในโลหะทั้งสอง ในรูปที่ 4.2 ที่โลหะ M1 จะเห็นการกระจายกระแสมีความหนาแน่นกระแสที่ต่ำสังเกตจากสีน้ำเงินและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอสังเกตจากสีที่เรียบเป็นเนื้อเดียว แต่ในฝั่ง M2 โดยเฉพาะที่คอนแทคทั้งสองจะมีค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงกว่าเพราะว่าค่ากระแสในนี้คืออิเล็กตรอนจะออกทางคอนแทคทั้งสองที่มีพื้นที่เล็กกว่าแผ่นโลหะ M1 มากทำให้เกิดค่าความหนาแน่นกระแสที่สูงกว่าแต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นกระแสที่คอนแทคหรือบริเวณโลหะ M2 จะมีค่าสมมาตรกันตามแนวแกนอนันต์หมายถึงค่ากระแสที่คอนแทคทั้งสองมีค่าเท่ากันทำให้ค่าความต่างกันของกระแสที่คอนแทคทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก เมื่อให้สนามแม่เหล็กโดยให้ในแนวตั้งฉากกับอุปกรณ์ในแนวแกน Z รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพการกระจายความหนาแน่นกระแสในรูป 4.5 (ก) แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสเมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง  $-Z$  สังเกตที่ขั้วโลหะ M1 จะเริ่มมีค่าความหนาแน่นกระแสในโลหะที่ไม่สม่ำเสมอเหมือนในกรณีที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นความไม่สมมาตรของกระแสในชั้นโลหะด้วยทั้งนี้กระแสที่วิ่งในโลหะ M1 ก็ยังมีการเบี่ยงเบนกระแสจากปรากฏการณ์ฮอลล์ ในด้านโลหะ M2 ก็ จะเห็นการกระจายความหนาแน่นกระแสมีค่าเปลี่ยนไปจากขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็กแต่อย่างไรก็ตามการสังเกตจากสีที่กระจายตัวจะทำให้ยาก



(ก)

ให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง -Z



(ข)

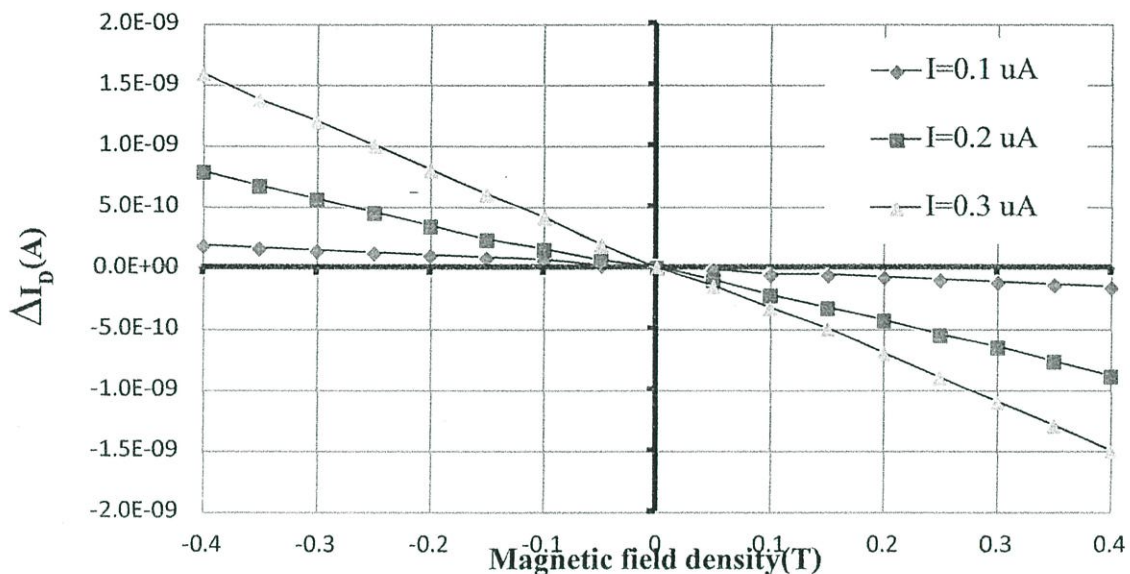
ให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง +Z

**รูปที่ 4.5 การกระจายความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์ขณะที่ให้สนามแม่เหล็ก**

ดังนั้นเพื่อให้เห็นค่าที่ชัดเจน จะต้องทำการวัดกระแสที่คอนแทกทั้งสองเพื่อดูค่าปริมาณความแตกต่างกระแสที่เกิดขึ้น ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 4.5 (ข) แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์ในกรณีที่ให้ค่าสนามแม่เหล็กในทิศทาง +Z เช่นเดียวกันเราจะสังเกตเห็นการกระจายความหนาแน่นกระแสในโลหะ M1 ที่ไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกันและจะมีความไม่สมมาตรอยู่ด้วยแต่จะมีทิศทางตรงข้ามกับในกรณีสนามแม่เหล็กมาในแนว -Z ในส่วนของโลหะ M2 ก็สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสที่แตกต่างจากกรณีที่ยังไม่ให้สนามแม่เหล็กการสังเกตการกระจายความหนาแน่นกระแสจากสื่ออาจจะทำได้ยาก ดังนั้นเราทำการวัดปริมาณกระแสที่คอนแทกทั้งสองเพื่อดูความแตกต่างของกระแส

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ความแตกต่างกระแสที่คอนแทกทั้งสองโดยสมมุติให้คอนแทกด้านบนในรูป 4.1 คือคอนแทกที่ 1 และคอนแทกด้านล่างคือคอนแทก 2 ผลต่างของกระแส ID คือค่าความแตกต่างของกระแสระหว่างคอนแทก 1 กับคอนแทก 2  $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$  เมื่อนำค่ากระแสที่ได้ที่คอนแทกทั้งสองมาพลอต กราฟเทียบกับความเข้มและทิศทางสนามแม่เหล็กจะได้กราฟในรูป 4.6 ในกรณีนี้

สนามแม่เหล็กมีทิศทาง  $-Z$  ค่าความแตกต่างกระแสจะมีค่าเป็นบวก ( $I_{D1} > I_{D2}$ ) และสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $+Z$  ค่าความแตกต่างกระแสจะมีค่าเป็นลบ ( $I_{D1} < I_{D2}$ ) กระแสไบแอสเป็นค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับจึง



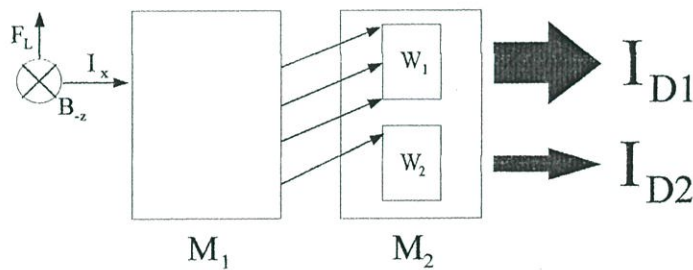
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างกระแส  $\Delta I_D$  กับความเข้มสนามแม่เหล็กและทิศทาง

มีค่าน้อยในระดับไมโครแอมแปร์ แต่ในทางเป็นจริงกระแสนี้จะมีค่าที่สูงกว่านี้เพราะมีกระแสการเกิดพาหะ (generation current) แต่ในโมเดลการจำลองแบบนี้เราไม่ได้นำกระแสส่วนนี้มาคำนวณ เราใช้เพียงกระแสเทอมอิออนิซึม (thermionic emission current) ค่ากระแสที่ไบแอสมีค่า 0.1, 0.2 และ 0.3  $\mu A$  ค่าความแตกต่างกระแสจะมีค่ามากขึ้นตามค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและค่ากระแสไบแอส ค่าความสัมพันธ์นี้เป็นความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น ค่าความไวของอุปกรณ์คือค่าความชันของกราฟ โดยค่าความชันสัมพัทธ์ (relative sensitivity) มีค่าเป็น 7.9, 11.93 และ 13.74  $mT^{-1}$  ที่ค่ากระแสไบแอสค่า 0.1, 0.2 และ 0.3  $\mu A$  ตามลำดับในทิศทางสนามแม่เหล็กทิศ  $-Z$  สำหรับในทิศทางสนามแม่เหล็กในทิศ  $+Z$  ที่ค่ากระแสไบแอสค่าเดียวกันจะได้ค่าความไวสัมพัทธ์ของอุปกรณ์เป็น 11.62, 14.19 และ 14.19  $mT^{-1}$  ตามลำดับ จากผลการจำลองแบบที่ได้เราสามารถอธิบายกลไกการทำงานของอุปกรณ์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็กด้วยกลไกการทำงานของแมกนีโตไดโอดได้ จากปรากฏการณ์ฮอลล์กระแสที่ใช้คือค่ากระแสสมมุติหรือกระแสประจุบวก แต่ในโครงสร้าง MSM เป็นค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์เป็นกระแสพาหะอิเล็กตรอนซึ่งมีทิศทางสวนกับกระแสสมมุติ ดังนั้นในการอธิบายการเบี่ยงเบนกระแสอิเล็กตรอนจะซับซ้อนกว่าการอธิบายด้วยกระแสประจุบวก แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เป็นการง่าย เราจะอธิบายโดยใช้ทิศทางกระแสสมมุติเป็นหลัก และกระแสพาหะอิเล็กตรอนจริงจะมีค่าสวนทางกับกระแสสมมุตินั่นเอง

การอธิบายกลไกกระแสอิเล็กทรอนิกส์นี้ได้เคยอธิบายในกลไกการทำงานของข้อดีที่แมกนีโตไดโอดมาก่อนหน้านี้แล้ว

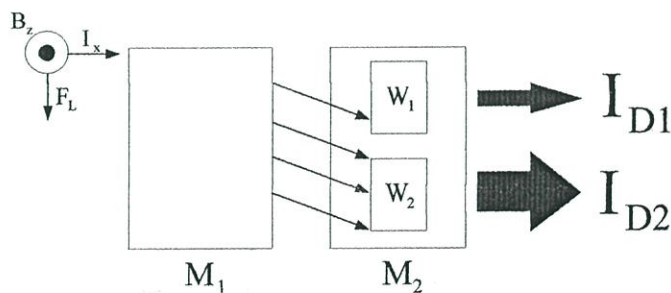
### 4.3 กลไกการทำงาน

รูปที่ 4.7 (ก) เป็นกลไกการทำงานการเบี่ยงเบนกระแสขณะที่มีสนามแม่เหล็กในทิศทาง  $-Z$  กระแสการไบแอสจะวิ่งจากโลหะ  $M_1$  ไปยังโลหะ  $M_2$  โดยความเป็นจริงกระแสอิเล็กทรอนิกส์จะวิ่งสวนทางจาก  $M_2$  ผ่านทางคอนแทกทั้งสอง เมื่อสนามแม่เหล็กในทิศ  $-Z$  ตัดผ่านกระแสทิศ  $+X$  ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงในทิศ  $Y$  ถ้ากระแสประจุบวกจะทำให้กระแสจาก  $M_1$  เบี่ยงเบนไปทางคอนแทก 1 มากกว่าคอนแทก 2 ทำให้ค่ากระแส  $I_{D1}$  มีค่ามากกว่า  $I_{D2}$  แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงมีแต่กระแสอิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้าง MSM จะทำให้กระแสอิเล็กทรอนิกส์วิ่งเข้าทางขั้วคอนแทก 1 ( $W_1$ ) มากกว่าคอนแทก 2 ( $W_2$ ) ทำให้ค่าความต่างกระแส  $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$  มีค่าเป็นบวก ในทางตรงข้ามเมื่อสนามแม่เหล็กถูกให้ในทิศทาง  $+Z$  ค่าแรงเหวี่ยงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กตัดผ่านกระแสในทิศตั้งฉากจะมีทิศทาง  $-Y$  ทำให้กระแสเบี่ยงเบนไปที่คอนแทก 2 มีค่ามากกว่าคอนแทก 1 ทำให้กระแส  $I_{D2}$  มีค่ามากกว่า  $I_{D1}$  ค่า  $\Delta I_D$  จึงมีค่าเป็นลบ และในความเป็นจริงค่ากระแสอิเล็กทรอนิกส์จะวิ่งจาก  $M_2$  ผ่านคอนแทก 1 ( $W_1$ ) มีค่าน้อยกว่าคอนแทก 2 ( $W_2$ ) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 (ข)



(ก)

สนามแม่เหล็กในทิศ  $-Z$



(ข)

สนามแม่เหล็กในทิศ  $+Z$

รูปที่ 4.7 กลไกการทำงานของอุปกรณ์ขณะได้รับสนามแม่เหล็ก



จากการทำงานของข้อต่อกึ่งแมกนีโตไดโอดที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ค่าความต่างกระแส  $\Delta I_D$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta I_D = J_x \cdot d \cdot \Delta y \quad (4.1)$$

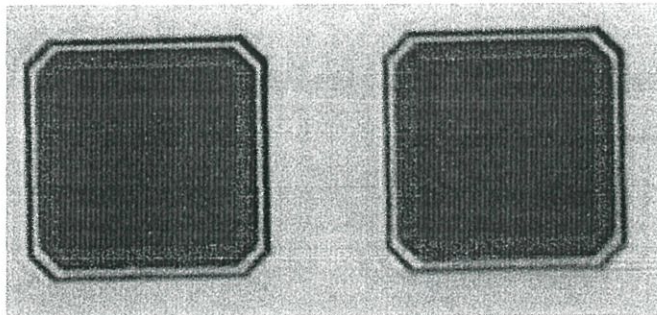
ซึ่งค่า  $J_x$  คือค่าความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนในทิศทาง X ค่า  $\Delta y$  คือระยะการเบี่ยงเบนกระแสในทิศทาง Y เนื่องจากแรงลอเรนซ์ และ d คือระยะความลึกของกระแส และค่าความไวสัมพัทธ์หาได้จาก

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D} \cdot \Delta B_Z \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.1) และ (4.2) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อย่างเป็นเชิงเส้นของ  $\Delta I_D$  กับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและค่ากระแสไบแอส

#### 4.4 การสร้างอุปกรณ์

การสร้างอุปกรณ์โครงสร้าง MSM เราใช้กระบวนการสร้าง MSM มาใช้ในการสร้างอุปกรณ์นี้ โดยโครงสร้างจะเป็นการสร้างรอยต่อข้อต่อกึ่งสองรอยต่อซึ่งจะแตกต่างจากโครงสร้างข้อต่อกึ่งแมกนีโตไดโอดที่จะมีโครงสร้างข้อต่อกึ่งเพียงหนึ่งรอยต่อและอีกรอยต่อจะเป็นโครงสร้างโอมห์มิก นอกจากนี้โครงสร้างอุปกรณ์นี้ ฝั่งโลหะด้านหนึ่งจะต้องมีคอนแทคสองคอนแทคที่สมมาตรกัน ดังนั้นจะต้องมีชั้นของโลหะอีกหนึ่งชั้นเอตอเป็นแพดเพื่อนำไปต่อसान (Bonding) เพื่อติดกับบรรจุภัณฑ์อีกทีหนึ่งจึงทำให้การสร้างมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้นมากพอสมควร รูปที่ 4.8 เป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากกระบวนการสร้างซีมอสโดยจะเห็นส่วนของโลหะชั้นที่หนึ่ง ซึ่งจะต้องมีการสร้างโลหะชั้นที่สองและเชื่อมต่อกับโลหะชั้นที่หนึ่งผ่านช่องคอนแทคซึ่งการออกแบบสามารถที่จะทำให้ง่ายขึ้นโดยการใช้การออกแบบให้มีโลหะเพียงชั้นเดียวซึ่งจะได้มีการพัฒนาต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างอุปกรณ์โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างซีมอส

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเราสามารถสร้างอุปกรณ์เซนเซอร์โครงสร้าง MSM ที่สามารถตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ในอุปกรณ์ตัวเดียวกัน โครงสร้าง MSM เป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแสง แต่ได้ทำการเพิ่มคุณสมบัติในการตรวจจับสนามแม่เหล็กเข้าไปโดยใช้พื้นฐานตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างช็อคกี้ไดโอดที่เรียกว่าช็อคกี้แมกนีโตไดโอด โดยพิจารณาเงื่อนไขร่วมกันที่มีอยู่ โครงสร้าง MSM ตรวจจับแสงเป็นรอยต่อช็อคกี้สองรอยต่อทำงานด้วยกระแสลัดด้วยย้อนกลับ ส่วนช็อคกี้แมกนีโตไดโอดสามารถทำงานได้ทั้งการไบแอสไปข้างหน้าและย้อนกลับ โครงสร้าง MSM ตรวจจับแสงใช้พื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อรับกระแสแสง ส่วนช็อคกี้แมกนีโตไดโอดไม่ต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่แต่พื้นที่ขนาดใหญ่ทำให้มีค่ากระแสลัดด้วยย้อนกลับมากขึ้นทำให้สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กได้ง่าย และทั้งสองโครงสร้างเป็นการทำงานในโหมดกระแส โครงสร้าง MSM มีสองขั้วแต่แมกนีโตไดโอดมีสามขั้วซึ่งสามารถออกแบบให้มีคอนแทกสองคอนแทกในขั้วโลหะด้านหนึ่งแต่ใช้โลหะสองชั้นแทนโลหะชั้นเดียวในการสร้างอุปกรณ์ ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะทั้งสองมีระยะวิกฤติที่ใกล้เคียงกันมากสามารถออกแบบใช้ร่วมกันได้ จากที่กล่าวมาในข้อเหมือนและการปรับแต่งทำให้โครงสร้าง MSM สามารถที่จะเพิ่มความสามารถที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กนอกจากที่จะตรวจจับแสงเพียงอย่างเดียว นับว่าเป็นโครงสร้าง MSM ตัวแรกที่สามารถทำได้ การศึกษานี้ได้นำเอาความรู้ที่ผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับเซนเซอร์สนามแม่เหล็กในโหมดกระแสมาปรับเข้ากับโครงสร้าง MSM ที่มีอยู่เดิมทำให้เกิดอุปกรณ์เซนเซอร์ตัวใหม่ขึ้นที่เป็นนวัตกรรมบนพื้นฐานองค์ความรู้ งานวิจัยนี้ยังสามารถออกแบบให้อุปกรณ์สามารถสร้างง่ายขึ้นได้อีกดังข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากในตอนแรกมีจุดประสงค์ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโครงสร้าง MSM ทำให้ออกแบบด้วยการเพิ่มคอนแทกสองคอนแทกบนโลหะเหมือนเป็นการเชื่อมชั้นโลหะกับชั้นโลหะ แต่การออกแบบเช่นนี้ทำให้กระบวนการสร้างยุ่งยากและใช้ต้นทุนมากขึ้น เราสามารถออกแบบโดยอาศัยเพียงเทคโนโลยีโลหะชั้นเดียวได้ซึ่งผู้วิจัยถ้ามีโอกาสจะทำการออกแบบโลหะชั้นเดียวต่อไป และจากงานวิจัยนี้การออกแบบจะต้องไปใช้ร่วมกับต้นแบบสร้างอุปกรณ์อื่น ๆ ด้วยซึ่งในกระบวนการสร้างในต้นแบบรวมเป็นเทคโนโลยีแบบโลหะชั้นเดียว ทำให้อุปกรณ์ MSM ที่ออกแบบไว้ไม่สามารถที่จะสร้างโลหะชั้นที่สองได้เพราะต้องสร้างร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ในต้นแบบรวมเดียวกัน ดังนั้นควรออกแบบให้เป็นแบบโลหะชั้นเดียวในอนาคตต่อไป อุปกรณ์นี้สามารถตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ก็จริงแต่ต้องทำการวัดกันทีละครั้ง แต่อย่างไรก็ตามสามารถประยุกต์ให้สามารถตรวจจับพลังงานที่แตกต่างพร้อมกันได้เช่นกัน ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ได้มากยิ่งขึ้นต่อไป

รายงานสรุปการเงิน ประจำปีงบประมาณ 2558  
รหัสโครงการ สกอ.-2558A11862011  
โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ  
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

ชื่อมหาวิทยาลัย ..สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.....  
ชื่อโครงการ (ไทย) ..เซนเซอร์แม่เหล็กโครงสร้าง MSM (โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ).....  
(อังกฤษ) ..MSM (Metal-semiconductor-metal) Magnetic sensor.....  
ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) ..  
รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557 .. ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 ..  
ระยะเวลาดำเนินการ .. 2 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557 .. ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559 ..

รายจ่าย

| หมวด                                             | งบประมาณรวมทั้งโครงการ<br>(บาท) | ค่าใช้จ่าย<br>งวดปัจจุบัน | คงเหลือ<br>(หรือเกิน) |
|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1. ค่าตอบแทน                                     | -                               | -                         | -                     |
| 2. ค่าจ้าง                                       | -                               | -                         | -                     |
| 3. ค่าวัสดุ                                      | 305,000                         | 305,000                   |                       |
| 4. ค่าใช้สอยอื่นๆ                                |                                 |                           |                       |
| - ค่าเช่าจ่ายในการ<br>ออกแบบจำลองแบบและ<br>ทำแบบ | 30,000                          | 30,000                    | -                     |
| - ค่าเช่าจ่ายในการสร้าง                          | 30,000                          | 30,000                    | -                     |
| - ค่าเช่าจ่ายในการวัดผล<br>การทดสอบ              | 35,000                          | 35,000                    | -                     |
|                                                  | 95,000                          | 95,000                    | -                     |
| <b>รวม</b>                                       | <b>400,000</b>                  | <b>400,000</b>            | -                     |

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ .. 400,000 บาท ..  
งวดที่ 1 .. 320,000 .. บาท .. เมื่อ ..  
งวดที่ 2 .. 80,000 .. บาท .. เมื่อ ..  
รวม .. 400,000 .. บาท ..

.....  
ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

..... / ..... / .....

.....  
ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

..... / ..... / .....

## เอกสารอ้างอิง

1. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai, "The mechanism of dualschottky magnetodiode" 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), May 16-18, Hua Hin, Thailand, 2012.
2. T. Phetchakul, S. Junkamkaw, "Dual magnetodiode" The 12th International Symposium on Integrated Circuits, 14-16 December, Singapore, 2009.
3. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, C. Leepattarapongpan, E. Chaowicharat, P. Pengpad and A. Poyai, "The Study of p-n and Schottky Junction for Magnetodiode" AMEE 2012, The 2012 International Conference on Applied Materials and Electronics Engineering, 18-19 January, HongKong, 2012.
4. T. Phetchakul, P. Sottip, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun, and A. Poyai, "The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
5. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Deflection Effect" IEEE Sensors Journal, Vol. 10, No. 2, 2010.
6. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun and A. Poyai, "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor", Proc. Eurosensors XXV, September 4-7, Athens, Greece, 2011.
7. T. Sugeta, T. Urisu, S. Sakata and Y. Mizushima, "Metal-semiconductor-metal photodetector for high speed optoelectronic circuits" J. Appl. Phys., 19-1, 1980
8. T. Sugeta and T. Urisu, "High-gain metal-semiconductor-metal photodetectors for high-speed optoelectronics circuits", IEEE Trans. Electron Dev. ED-26, 1979.
9. S. M. Sze, D. J. Coleman, Jr. and A. Loya, "Current transport in metal-semiconductor-metal (MSM) structures, Solid-State Electron., 14, 1971.
7. Edward Ramsden, "Hall –Effect Sensors Theory and Applications", Elsevier, Newnes, 2006.
8. C. Roumenin, "Handbook of Sensors and Actuators 2: Solid State Magnetic Sensors" , Elsevier, 1994.

9. S. Middelhoek, S. A. Audet, "Silicon Sensor", Academic Press, 1989.
10. S. M. Sze, "Semiconductor Sensors", John Wiley & Sons, 1994.
11. J. Korvink, "MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis and Application", Springer, 2006.
12. F. Toumazou and D. Haigh "Analog IC Design; The Current-Mode Approach" Peter Peregrinus Ltd., London, 1990.
13. รัตนาวรรณ สันบุญตัน, "การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ โครงสร้างขั้วอินเดอร์ดิจิตัล ร่วมกับกระบวนการผลิตซีมอส", วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
14. วิทยา ล้วนอธิคมกุล, "การศึกษาโครงสร้างและการทำงานของรอยต่อแบบช็อคกีบนโครงสร้างแมกนีโตไดโอดแบบคู่", วิทยานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์



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

## The Design of Metal-Semiconductor-Metal Structure Magnetic sensor

Chalin Sutthinet <sup>a</sup>, Toempong Phetchakul <sup>a,\*</sup>, Wittaya Luangatikomkul <sup>a</sup> and  
Amporn Poyai <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

<sup>b</sup> Thai Microelectronics Center, National Electronics and Computer Technology Center, Chauchongwong, Thailand

### Abstract

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

© 2016 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of iEECON2016

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

### 1. Introduction and Structure

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

\* Corresponding author.

E-mail address: [toempong.ph@kmitl.ac.th](mailto:toempong.ph@kmitl.ac.th)



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

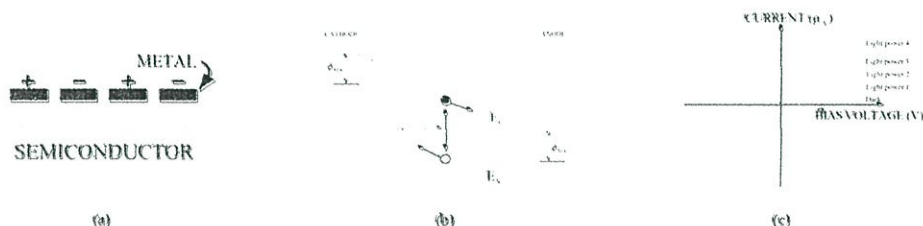


Figure 1. MSM photo detector (a) The interdigitated structure MSM (b) Energy Band diagram (c) Photo current characteristics.

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



Figure 2. Dual magnetodiode.

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

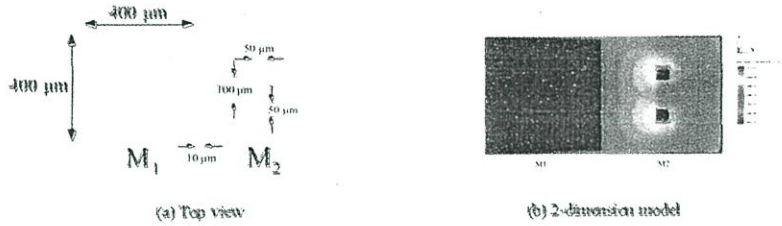


Figure 3. Merged structure of MSM Magnetic sensor.

2. Results and Discussion

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

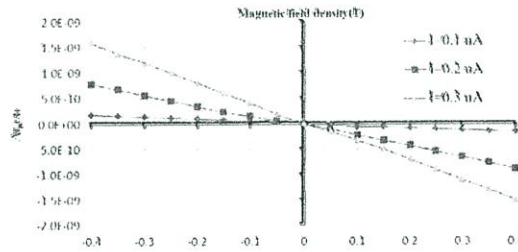


Figure 4. The magnetic field response of MSM magnetic sensor.



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

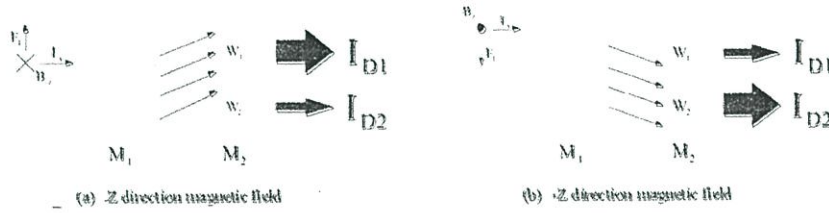


Figure 6. The mechanism of MSM magnetic sensor.

$$\Delta I_D = J_x \cdot d \cdot \Delta Y \tag{1}$$

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

$$S_R = \frac{\Delta I_D}{I_D} \cdot \frac{\Delta B_z}{B_z} \tag{2}$$

### 3. Conclusion

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

#### Acknowledgement

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

#### References

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

ภาคผนวก ข.

การเผยแพร่ในการประชุมวิชาการนานาชาติ

# iEECON2016

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

#### Honorary Advisory Chair

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

#### International Advisory Committees

Wanlop Surakamponrom (TAIST, Thailand)  
Vichai Ungchuan (Florida Atlantic University, USA)  
Sarah Thompson (University of York, UK)  
Mark Re (Seagate Technology, USA)  
Hiroshi Matsuno (University of Yamaguchi, Japan)  
Tim Mews (University of Alabama, USA)  
Athikom Rodsriat (Mahasarakham University, Thailand)

#### Technical Advisory Committees

Somchai Huanwarodom (Rajamangala University of Tech. Thanyaburi)  
Wakun Piyarat (Srinakharawit University)  
Kessin Jomnongthai (King Mongkut's University of Tech., Thonburi)  
Prayoot Akkarakhaim (King Mongkut's Univ. of Tech., North Bangkok)  
Decha Wilaivat (Mahidol University)  
Boonchouy Suprasittha (Chulalongkorn University)  
Nint Tejjasitthim (Srinakharawit University)  
Nathaphop Nanyawat (Bangkok University)  
Sutticha Premudeeprachacharn (Chiang Mai University)

#### General Chair

Aparat Srirattawat (Khon Kaen University, Thailand)

#### General Co-Chairs

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

#### Technical Program Chair

Anan Kruessubhaworn (Khon Kaen University, Nongkha Campus)  
Somnwat Sang-ngoen (Mahasarakham University)

#### Technical Conference Committees

Jakkrit Tugapang (Mahasarakham University)  
Paul Ritter (University of Manchester)  
Worawat Sa-ngamwibool (Mahasarakham University)  
Kittipong Tommitr (Khon Kaen University)  
Rinschonne Bummitipoch (Rajamangala Univ. of Tech. Thanyaburi)  
Boonyong Plangklang (Rajamangala Univ. of Tech. Thanyaburi)  
Aikom Kaewraiwang (Khon Kaen University)  
Theraputh Chakhanayemying (Mahasarakham University)  
Heshalle N. Aaz (University of Exeter)  
Lu Han Han Hui (Shinshuwa University)  
Pichpong Soombirapit (Mahidol University)  
Kittipich Meesawas (Khon Kaen University)  
Chanon Wansan (King Mongkut's Institute of Tech. Ladkrabang)  
Wannarong Wongbraiat (Rajamangala Univ. of Tech. Isaan)  
Sunchara Ongkittikul (Mahasarakham University of Technology)  
Pattarawit Polpanit (Khon Kaen University)

#### Publicity and Website Chair

Niwat Anglavattitpan (Mahasarakham University)  
Nattawoot Suwannata (Mahasarakham University)  
Yoppanon Kuevhanant (Mahasarakham University)

#### Registration Chair

Cattanya Suwanan (King Mongkut's Univ. Of Tech. North Bangkok)

#### Financial Chair

Wanchai Chankapal (Sripatum University)

#### Local Arrangement Chair

Dhanavit Chelkavit (Chiangmai University)

#### General Secretariat

Chonlathee Pholong (Mahasarakham University)  
e-mail: chonlathee.p@msu.ac.th



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

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

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

#### Conference Topics

##### COMMUNICATIONS

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

##### ELECTRONICS & CONTROL

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

##### DIGITAL SIGNAL PROCESSING

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

##### POWER & ENERGY

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

##### COMPUTER & IT

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

#### IMPORTANT DATES

**Paper submission deadline: October 13, 2015**

**Paper acceptance notification: November 22, 2015**

**Camera-ready submission deadline: December 22, 2015**

**Early-bird registration deadline: December 22, 2015**

**Conference dates: March 2 - 4, 2016**



For more information, please refer to the conference website:

[www.ieecon.org](http://www.ieecon.org)

ภาคผนวก ค.

รางวัลที่ได้รับ



# สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา



โดยสำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ

เกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล

เป็นผู้ได้รับรางวัลผลงานวิจัยตีพิมพ์ไปสี่เตอร์

ในการประชุมใหญ่โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา ครั้งที่ ๔ (HERP CONGRESS IV)

ระหว่างวันที่ ๘-๑๐ กุมภาพันธ์ พุทธศักราช ๒๕๕๗

ขอแสดงความเจริญด้วยจตุรพิธพร ทำคุณประโยชน์ในด้านการศึกษาสร้างสรรค์ปัญญา เพื่อพัฒนาประเทศไทยไป

(นางสาวอาภาณี แก่นวงศ์)

เลขาธิการคณะกรรมการอุดมศึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญสงค์)

ผู้อำนวยการสำนักบริหารโครงการ

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย (รูปแบบปรับได้ตามความเหมาะสม)

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล

ประวัติการศึกษา

| ชื่อย่อปริญญา                   | สาขา                   | สถาบันที่จบ                                        | ปีที่จบ |
|---------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|---------|
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต<br>วศบ.     | อิเล็กทรอนิกส์         | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า<br>เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2532    |
| วิศวกรรมศาสตร<br>มหาบัณฑิต วศม. | วิศวกรรมไฟฟ้า          | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า<br>เจ้าคุณทหารลาดกระบัง | 2535    |
| Doctor of Engineering           | Solid State Electronic | Tokai University                                   | 2541    |

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)..... อุปกรณ์เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก  
..... อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คาร์บอนนาโนทิวป์ กระบวนการสร้างซีมอสและไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
..... การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชร

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่น ๆ) ที่ได้รับ

| ปี พ.ศ. | ชื่อรางวัล                                 | สถาบันที่ให้                                                                                                             |
|---------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2559    | รางวัลการนำเสนองานวิจัยดีมีแบบ<br>โปสเตอร์ | สำนักบริหารโครงการส่งเสริมการวิจัย<br>ในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัย<br>วิจัยแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการ<br>การอุดมศึกษา |

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

| ปี พ.ศ. | ทุนการศึกษาและทุนวิจัย      | สถาบันที่ให้    |
|---------|-----------------------------|-----------------|
| 2538    | ทุนพัฒนาอาจารย์ ทุนการศึกษา | ทบวงมหาวิทยาลัย |
| 2543    | ทุนวิจัย                    | ว.ช.            |
| 2547    | ทุนวิจัย                    | ว.ช.            |
| 2549    | ทุนวิจัย                    | ว.ช.            |
| 2550    | ทุนวิจัย                    | ว.ช.            |
| 2551    | ทุนวิจัย                    | ว.ช.            |
| 2552    | ทุนวิจัย                    | ว.ช.            |



|      |          |      |
|------|----------|------|
| 2553 | ทุนวิจัย | ว.ช. |
| 2554 | ทุนวิจัย | ว.ช. |
| 2555 | ทุนวิจัย | ว.ช. |
| 2556 | ทุนวิจัย | ว.ช. |
| 2557 | ทุนวิจัย | สกอ. |
| 2558 | ทุนวิจัย | สกอ. |
| 2559 | ทุนวิจัย | ว.ช. |

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

#### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Chalin Sutthinet, Toempong Phetchakul, Wittaya Luanatikomkul and Amporn Poyai, "The Design of Metal-Semiconductor-Metal Structure Magnetic sensor" *Procedia Computer Science*, completed online on 6-MAY-2016.
2. Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat, Amporn Poyai, "The Effect of Deviation Current to 5-Contacts Vertical Hall Device" *The 13<sup>rd</sup> International on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2016)*, 28 June – 1 July, Chiang Mai, Thailand.
3. Toempong Phetchakul, Wittaya Luanatikomkul and Amporn Poyai, "The Effect of Anode Width of Dual Schottky Magnetodiode to Sensitivity" *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 781(2015), pp. 164-167.
4. W. Praepattharapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Yield analysis based on the Defect Analysis with Derivative Method" *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 781 (2015), pp. 160-163.
5. Chana Leepattarapongpan, Toempong Phetchakul, Naritchaphan Penpondee, Puttapon Pengpad, Arckom Srihapat, Wutthinan Jeamsaksiri, Ekalak Chaowicharat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai "A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection effect" *Microelectronics Journal*, Volume 45, Issue 6, June 2014, Pages 565.
6. Chalin Sutthinet, Toempong Phetchakul, Wittaya Luanatikomkul and Amporn Poyai, "Multi-sensor Diode for Magnetic Field and Photo Detection" *10<sup>th</sup> IEEE International Conference on*

Nano/Micro Engineered and Molecular System, IEEE-NEMS 2015, 7-11 April, Xi'an, China, 2015.

7. Chana Leepattarapongpan, Toempong Phetchakul, Naritchaphan Penpondee, Puttapon Pengpad, Arckom Srihapat, Wutthinan Jeamsaksiri, Ekalak Chaowicharat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, "The Magnetotransistor for 2-Axis Magnetic Field Measurement in CMOS Technology" The 12<sup>th</sup> International on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON 2015), 24-27 June, Hua Hin, Thailand, 2015.

8. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai "A Simulation of 3-Axis Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Reflection Effect" The 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.

9. W. Praepttharapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Yield Analysis by Poisson Yield Model based on the Defect Analysis with Derivative Method" The 11<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2014, 14-17 May, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.

10. T. Phetchakul and C. Sutthinet "Monitoring of Draft Beer Fermentation Process by Electronic Nose" Advanced Material Research, Vol. 911, pp. 297-301, 2014.

11. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Defect Distribution and Yield Analysis Technique on Silicon Wafer" Advanced Material Research, Vol. 911, pp. 271-275, 2014.

12. T. Phetchakul, S. Muangthong, C. Leepattarapongpan and A. Poyai "Mechanism of Merged Magnetotransistor" The 36<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.

13. W. Praepattarapisut, W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Defect Distribution Analysis by Derivative Technique for P-N Junction" The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36), 11-13 December, Kanchanaburi, Thailand, 2013.

14. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai "Split-current Magnetoresistor" Analysis based on Leakage Current in PN junction" Advanced Materials Research, Vol. 739, pp. 489-492, 2013.

15. W. Pengchan, T. Phetchakul and A. Poyai "Powerloss Analysis based on Leakage Current in PN junction" Advanced Materials Research, Vol. 739, pp. 90-93, 2013.

16. Weera Pengchan, Toempong Phetchakul, Amporn Poyai, "The local generation and recombination lifetime based on forward diode characteristics diagnostics", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 362, PP. 300-303, 2013.
17. T.Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Pengchan, W. Yamwong and A. Poyai "The New Design for Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012, 16-18 May 2012, Phetchaburi, Thailand.
18. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai "The Mechanism of Dual Schottky Magnetodiode" 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology, ECTI-CON 2012, 16-18 May 2012, Phetchaburi, Thailand.
19. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, W. Yamwong, A. Poyai "The Study of Forward and Reverse Schottky Junction for Dual Magnetodiode" 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular System, IEEE-NEMS 2012, 5-8 March, Kyoto, Japan.
20. T. Phetchakul, P. Taisettavatkul, W. Yamwong and A. Poyai, "A Simulation of Magnetoresistance Effect on Hall Plate Structure" The 7<sup>th</sup> Annual Conference of Thai Physics Society, Siam Physic Congress 2012, 9-12 May 2012, Pra Nakon Si Ayutthaya, Thailand.
21. T. Phetchakul, W. Luanatikomkul, C. Leepattarapongpan, E. Chaowicharat, P. Pengpad and A. Poyai, "The Study of p-n and Schottky Junction for Magnetodiode" *Advanced Materials Research*, Vol. 378-379, 2012.
22. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Improved extraction of the local carrier generation lifetime from forward diode characteristics", *Advanced Materials Research*, Vol. 378-379, 2012.
23. P. Trisetwattakoon, T.Phetchakul, W. Yamwong, A. Poyai "Magnetoresistance on Hall Plate Structure" The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-34), 30 November-2 December, Pattaya Chonburi, Thailand, 2011.
24. S. Mungtong, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, P. Pengpad, N. Penpondee, A. Srihapheet, C. Hruanan, A. Poyai "The Low power 3 D Magnetotransistor based on CMOS Technology" The 34<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-34), 30 November-2 December, Pattaya Chonburi, Thailand, 2011.
25. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "Non-uniform Defects Assessment by I-V and C-V characteristics of p-n junction" ICDS 2011, The 26th International Conference on Defects in Semiconductor, 17 – 22 July, Nelson, New Zealand, 2011.

26. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun and A. Poyai, "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor", Proc. Euroensors XXV, September 4-7, Athens, Greece, 2011.
27. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Local Generation and Recombination Lifetime based on Forward Diode Characteristics Diagnostics", ICMAT 2011, The 6th International Conference on Material for Advanced Technologies, 26 June -1 July, Singapore, 2011.
28. T. Phetchakul, P. Sottip, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun, and A. Poyai, "The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
29. T. Phetchakul, A. Sangnual, and C. Sutthinet, "Investigation on Temperature Effect on Alcohol Sensing of Multi- Walled Carbon Nanotube", IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
30. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, "The Defects Analysis in CMOS Fabrication by Arrhenius Activation Energy Technique" IEEE-NEMS 2011, IEEE International Conference on Nano/Micro Engineering and Molecular Systems, February 20-23, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
31. C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, E. Chaowicharat, C. Hruanun, A. Poyai, "Magnetotransistor Based on the Carrier Recombination-Deflection Effect" IEEE Sensors Journal, Vol. 10, No. 2, 2010.
32. P. Sottip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, C. Hruanun, A. Poyai, "The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology" Proceeding of the 2010 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference, May 19-21, Chiang Mai, Thailand, 2010.
33. W. Pengchan T. Phetchakul, S. Koontaweethep, A. Ruangpanid, "N-well Resistor Snapback Effect of 0.8  $\mu\text{m}$  CMOS Technology" The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 1-3 December, Chiang Mai, Thailand, 2010.
34. A. Srihapat, C. Leepattarapongpan, P. Pengpad, N. Penpondee, C. Hruanun, A. Poyai, P. Sottip, T. Phetchakul, "A Study of Temperature Coefficient and Compensation of

Magnetotransistor” The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 1-3 December, Chiang Mai, Thailand, 2010.

35. W. Pengchan, T. Phetchakul, A. Poyai, “Analysis of defect generated in PN Junction for 0.8  $\mu\text{m}$  CMOS Fabrication”, The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 1-3 December, Chiang Mai, Thailand, 2010.

36. A. Sangnual, C. Sutthinate, T. Phetchakul, “Environment Temperature effect on Alcohol Detection of Carbon Nanotube” The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 1-3 December, Chiang Mai, Thailand, 2010.

37. P. Sotthip, T. Phetchakul, C. Leepattarapongpan, P. Pengpad, N. Penpondee, A. Srihapat, C. Hruanun, A. Poyai, “The Deflection Length and Injection Width on the Sensitivity of Magnetotransistor” NECTEC Technical Journal, NECTEC-ACE 2010, September, 2010.

38. A. Sangnual, C. Sutthinate, T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, “Thermal CVD for Carbon Nanotube” The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 1-3 December, Chiang Mai, Thailand, 2010.

39. W. Pengchan, S. Cheirsirikul, T. Phetchakul, A. Ruangphanit and A. Poyai, “The Defect Generated in PN Junction Analysis by the Arrhenius Activation Energy Technique”, Proceeding of 14th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering ANSCSE 14, March 23-26, Chiang Rai, Thailand, 2010.

40. W. Pengchan, S. Cheirsirikul, T. Phetchakul, A. Ruangphanit, A. Poyai, “Diagnostics of Ion Implantation with 0.8 micron CMOS Technology based on TCAD Simulation”, Proceeding of 14th International Annual Symposium on Computational Science and Engineering ANSCSE 14, March 23-26, Chiang Rai, Thailand, 2010.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่น ๆ)

แมกนีโตทรานซิสเตอร์