

แมกเฟตแบบไม่แยกขั้วเตรนความไวสูง
HIGH SENSITIVITY NON SPLIT DRAIN MAGFET



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-D-018-109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH SENSITIVITY NON SPLIT DRAIN MAGFET



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-D-018-109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แมกเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรนความไวสูง
นักศึกษา	นายรัฐพงษ์ นาคาไชย
รหัสประจำตัว	59601017
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบแบบใหม่ของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้าง MAGFET แบบไม่แยกขั้วเดรนโดยใช้โปรแกรม Sentaurus TCAD จำลองแบบคุณลักษณะไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ภายใต้สนามแม่เหล็ก ทำการศึกษาโครงสร้าง Non-Split Drain MAGFET ซึ่งลักษณะการออกแบบไม่แยกเดรนนี้ให้ค่าความไวสูงสุดเข้าใกล้อุดมคติมากที่สุดในรูปแบบเดียวกัน อุปกรณ์ทำงานในโหมดกระแสใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้าง Split-Drain MAGFET ที่ถูกออกแบบให้ไม่มีช่องว่างระหว่างเดรน จึงไม่มีการสูญเสียจากช่องว่าง โดยมีคอนแทคแยกเป็น 2 คอนแทคในชั้นเดรนเดียวกันเพื่อแสดงความแตกต่างของกระแสที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก ทำให้ค่าแฟคเตอร์รูปทรงทางเรขาคณิตมีค่าที่ดีที่สุด การเปรียบเทียบความไวสัมพัทธ์ของแต่ละช่องว่างระหว่างเดรนที่แตกต่างกันทั้งหมดคือ 3, 2, 1 และ 0 μm มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวช่องทางเดินกระแส $L/W = 1, 0.6$ และ 0.2 ที่กระแสไบอัส 0.25 mA พบว่าที่ช่องว่างเป็นศูนย์หรือโครงสร้างแบบ Non-split drain MAGFET มีความไวสูงสุด โดยทำการศึกษาค่าความไวของโครงสร้างนี้ ตามอัตราส่วนของ $L/W = 1, 0.6$ และ 0.2 คือ $0.0595, 0.0479$ และ 0.0231 T^{-1} ตามลำดับ เป็นการพิสูจน์ว่าช่องว่างระหว่างเดรนไม่มีความจำเป็นสำหรับโครงสร้าง MAGFET ซึ่งเป็นวิธีใหม่ในการออกแบบ MAGFET ที่ได้ความไวสูงสุด ไม่เกิดการสูญเสียจากช่องว่างและไม่ขึ้นกับเทคโนโลยีการสร้าง เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กสมัยใหม่ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวนอนที่ตั้งฉากกับกระแสของอุปกรณ์มอสเฟตปกติที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับจำลองแบบ สามารถแสดงการประยุกต์อุปกรณ์มอสเฟตปกติสามารถนำมาใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวนอนทั้งขนาดและทิศทาง โดยอาศัยหลักการฮอลล์โหมดกระแส อุปกรณ์จะถูกไบอัสให้ทำงานปกติโหมดแอกทีฟและเพิ่มเติมการไบอัสแผ่นฐานที่ขั้วบอดี้ให้มีการไบแอสไปข้างหน้าให้เหมาะสมโดยการปรับค่าความต้านทานที่ต่อกับเดรนและบอดี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	High Sensitivity Non Split Drain MAGFET
Student	Mr. Rattapong Nakachai
Student ID.	59601017
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Toempong Phetchakul

ABSTRACT

This thesis presents a new design of a Non-Split Drain MAGFET using Sentaurus TCAD program to simulate the electrical characteristics of the device under a magnetic field. The structure of Non-Split Drain MAGFET was studied which this design gives maximum sensitivity close to ideal in the same shape. The device operate in low voltage current mode. The device used in the study has a split-drain MAGFET structure, which is designed with no gap between the drains, so there is no gap loss. It has two separate contacts in the same drain to extract the current difference caused by the magnetic field, thus giving the best geometry factor. The relative sensitivities of each gap between all different drains were 3, 2, 1 and 0 μm with a width to length ratio $L/W = 1, 0.6$ and 0.2 at a bias current of 0.25 . It was found that at zero gap or Non-Split Drain structure MAGFET has the highest sensitivity. The sensitivity of this structure was studied according to the ratio of $L/W = 1, 0.6$ and 0.2 , i.e. $0.0595, 0.0479$ and 0.0231 T^{-1} , respectively. It was proved that the gap between the drains is not necessary for the MAGFET structure. This new approach to MAGFET design achieves the highest sensitivity, no gap loss and independent of the fabrication technology. The device is suitable for use as a modern magnetic detection device. In addition, the horizontal magnetic field response perpendicular to the current of the fabricated normal MOSFET device was studied in comparison with the simulation. This shows the application of the normal MOSFET device which can be used to detect a horizontal magnetic field in both magnitude and direction based on current-mode Hall Effect. The device is biased to normal operation, active mode and additional forward biasing of the substrate at the body terminals by adjusting the resistances connected to the drain and body.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาและควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล ที่ให้ความรู้ความคิดริเริ่มคำปรึกษาชี้แนะในการแก้ปัญหาตลอดจน ประสพการณ์การวิจัยและการค้นคว้าที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จาก ท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

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

ขอขอบคุณ ดร.ชลินทร์ สุทธิเนตร รวมถึงนักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยเซ็นเซอร์และการจำลองแบบ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ คุณวิโรจน์ วงศ์ดีเลิศ ตำแหน่งผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการ คุณศตบงกช คชจันทร์ ตำแหน่งรองผู้จัดการทั่วไป และ คุณอภิรัตน์ หวานนุรักษ์ ตำแหน่งผู้ช่วยผู้จัดการทั่วไป สายงาน Corporate Asset and Facilities Management บริษัท ซีพี ออลล์ จำกัด(มหาชน) ที่เห็นถึงความสำคัญในการเรียนของข้าพเจ้าและอนุญาตให้ใช้เวลาทำงานควบคู่ไปกับการทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ คุณงามความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ คุณแม่สันทนา นาคาไชย คุณเอี่ยมศิริ คุ่มแสง และ คุณพรนิภา เดโชศาสตร์ ที่เป็นแรงผลักดันต่างๆ และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ให้มีความอดทนมุ่งมั่นตั้งใจในการเป็นวิศวกรที่ดี ทำงานสร้างประโยชน์ให้แก่สังคมและประเทศชาติสืบไป

รัฐพงษ์ นาคาไชย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมุติฐานการศึกษา	3
1.4 ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟต	6
2.1.1 แรงดันขีดเริ่ม	7
2.1.2 ผลของขนาดมอสเฟต.....	10
2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device)	12
2.2.1 ปรากฏการณ์กัลวานโนแมกเนติก (Galvanomagnetic effect).....	12
2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect).....	12
2.2.3 สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field).....	14
2.2.4 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage).....	15
2.2.5 มุมฮอลล์ (Hall angle).....	15
2.2.6 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient).....	16
2.2.7 ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection effect)	18
2.3 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟต.....	18
2.3.1 MOS Hall Plate	18
2.3.2 Split Drain MAGFET	20
2.3.3 Non-Split Drain MAGFET	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการจำลองแบบ	25
3.1 กระบวนการสร้างอุปกรณ์มอสเฟต	25
3.1.1 N-MOSFET.....	25
3.2 การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ	34
3.2.1 การจำลองแบบการสร้าง MAGFET	35
3.2.2 ขั้นตอนการสร้าง MAGFET	36
3.2.3 การจำลองแบบและแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก	39
3.3 สมมุติฐานในการจำลองแบบ.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	43
4.1 การศึกษาคุณสมบัติและผลตอบสนองแม่เหล็กอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐาน	43
4.1.1 MOSFET แบบทั่วไป.....	43
4.1.2 การทดลองและผลลัพธ์ของกราฟคุณลักษณะ I-V.....	45
4.1.3 วงจรสำหรับไบอัสและผลการตอบสนองแม่เหล็ก.....	45
4.1.4 การจำลองแบบและผลการตอบสนองแม่เหล็กในแวนอน	46
4.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแวนอนสำหรับโครงสร้าง อุปกรณ์แมกเฟตแบบแยกขั้วเดรน (Split-Drain MAGFET)	51
4.2.1 MAGFET แบบแยกขั้ว Drain	51
4.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งสำหรับโครงสร้างอุปกรณ์แมกเฟ ตแบบไม่แยกขั้วเดรน(Non-Split Drain MAGFET).....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าความไวสัมพัทธ์ ที่ 0.25 mA ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.5 T	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างกายภาพอย่างง่ายของมอสเฟตชนิด n (n-channel MOSFET หรือ NMOS).... 7
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงคุณสมบัติมอสเฟต..... 8
รูปที่ 2.3	(ก) สนามไฟฟ้า $\zeta(x)$ และ(ข) ศักย์ไฟฟ้า $\phi(x)$ 10
รูปที่ 2.4	แสดงภาพตัดขวางของมอสเฟต (ซ้าย) ก่อน และ (ขวา) หลังทำการย่อขนาด..... 10
รูปที่ 2.5	ปรากฏการณ์ช่องนำไฟฟ้าสั้น 11
รูปที่ 2.6	ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n 13
รูปที่ 2.7	แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาว..... 17
รูปที่ 2.8	แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)..... 18
รูปที่ 2.9	โครงสร้างของอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท..... 19
รูปที่ 2.10	มอสเฟตแบบเดรนแยกส่วน (Split Drain MAGFET) 20
รูปที่ 2.11	ผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลอง MAGFET แบบเดรนแยกส่วน 21
รูปที่ 2.12	แสดงการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์ ในโหมดกระแส และโหมดแรงดัน 22
รูปที่ 2.13	โครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน..... 24
รูปที่ 3.1	โครงสร้างทั่วไปของ N-MOSFET..... 25
รูปที่ 3.2	ภาพตัดขวางของ N-MOSFET..... 26
รูปที่ 3.3	ภาพถ่าย Mask อุปกรณ์ของ N-MOSFET 26
รูปที่ 3.4	layout ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ถูกสร้างด้วย Ligament Layout Editor..... 28
รูปที่ 3.5	ส่วน Environment สำหรับกำหนดตัวแปรและเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโครงสร้าง..... 29
รูปที่ 3.6	ส่วน Substrate ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง..... 29
รูปที่ 3.7	ส่วน Comment ที่ใช้ระบุข้อความ 30
รูปที่ 3.8	ส่วน Insert ที่ใช้ระบุชนิด, วัสดุ, ความเข้มข้นของสารเจือ, และความลึกรอยต่อ..... 30
รูปที่ 3.9	ส่วน Insert ที่ใช้ระบุรูปแบบการเจือสาร..... 31
รูปที่ 3.10	ส่วน Pattern สำหรับกำหนดบริเวณที่จะถูกเจือสาร..... 31
รูปที่ 3.11	ส่วน Insert ที่ใช้ระบุการยิงฝังประจุ 32
รูปที่ 3.12	ส่วน Anneal สำหรับกระบวนการแอนนัลหลังยิงฝังประจุ 32
รูปที่ 3.13	ส่วน Etch สำหรับกำหนดการกัดชั้นน้ำยาไวแสงก่อนสร้างชั้นโลหะ 32
รูปที่ 3.14	ส่วน Deposit ที่ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ..... 33
รูปที่ 3.15	ส่วน Pattern สำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้า..... 33
รูปที่ 3.16	ส่วน Etch ที่ใช้กัดชั้นโลหะ 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.17 ส่วน Etch ชั้นสุดท้ายสำหรับกัดชั้นน้ำยาไวแสงที่ผิวออกทั้งหมด	34
รูปที่ 3.18 MAGFET	36
รูปที่ 3.19 การสร้างโครงสร้างฐานรอง	36
รูปที่ 3.20 การสร้างขั้ว Source	37
รูปที่ 3.21 การสร้างขั้ว Drain	37
รูปที่ 3.22 การสร้าง Gate	38
รูปที่ 3.23 ทำการสร้างขั้วไฟฟ้า (Contact).....	38
รูปที่ 3.24 การสร้าง Mesh	39
รูปที่ 4.1 โครงสร้างทั่วไปของ N-MOSFET.....	43
รูปที่ 4.2 ภาพด้านบนของ N-MOSFET.....	44
รูปที่ 4.3 ภาพอุปกรณ์จริงของ N-MOSFET จากการ Fabrication.....	44
รูปที่ 4.4 คุณสมบัติกราฟ I-V ของ N-MOSFET	45
รูปที่ 4.5 วงจรไบอัสสำหรับวัดค่าการตอบสนองแม่เหล็ก	45
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองต่อแม่เหล็กของอุปกรณ์จริง.....	46
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองต่อแม่เหล็กของการจำลองแบบ.....	47
รูปที่ 4.8 การกระจายความหนาแน่นกระแสของการจำลองแบบ.....	48
รูปที่ 4.9 กลไกการทำงานของอุปกรณ์ของ N-MOSFET สำหรับการตรวจจับแม่เหล็กในแนวนอน..	50
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของ MAGFET แบบแยกขั้ว Drain.....	51
รูปที่ 4.11 กราฟคุณสมบัติ ΔI_D -B ของ MAGFET แบบแยกขั้ว Drain.....	52
รูปที่ 4.12 กราฟคุณสมบัติ I-V ของ N-MOSFET ที่ใช้เป็น MAGFET.....	53
รูปที่ 4.13 ผลกระทบของการไบอัสแรงดันที่ Substrate ของ N-MOSFET ที่ใช้เป็น MAGFET	53
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของค่า V_{th} และ V_{bs}	54
รูปที่ 4.15 การจำลองแบบการกระจายตัวของกระแส เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง	55
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง	56
รูปที่ 4.17 การจำลองแบบของความหนาแน่นกระแสเมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวนอน	57
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวนอน	57
รูปที่ 4.19 กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวนอน.....	58
รูปที่ 4.20 โครงสร้างอุปกรณ์ MAGFET	59
รูปที่ 4.21 ลักษณะแรงดันกระแสของ MAGFET	60
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างของกระแสและผลตอบสนองแม่เหล็ก.....	61
รูปที่ 4.23 การกระจายความหนาแน่นกระแสของ MAGFET ที่ $L/W = 1$ และ $B_{z,z} = 0.5$ T.....	63
รูปที่ 4.24 การกระจายความหนาแน่นกระแสของ MAGFET ที่ $L/W = 0.6$ และ $B_{z,z} = 0.5$ T.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.25 การกระจายความหนาแน่นกระแสของ MAGFET ที่ $L/W = 0.2$ และ $B_{z,z} = 0.5$ T.....	65
รูปที่ 4.26 การกระจายความหนาแน่นกระแสของ MAGFET (ก) $L/W = 1$, (ข) $L/W = 0.6$ และ (ค) $L/W = 0.2$	66
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) MAGFET ทั่วไป และ (ข) Non Split-Drain MAGFET	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
B	Magnetic field	Wb/m ²
d	Hall thickness	μm
e	Electron charge = 1.602x10 ⁻¹⁹	C
E_H	Hall field	V/cm
E	Electric field	V/cm
\vec{F}_L	Lorentz force	V.Wb/m.s
G	Geometry Factor	-
I_D	Diode current	A
J_n	Electron density	A/cm ²
J_p	Hole density	A/cm ²
J_x	Current density	A/cm ²
L, l	Length of hall	μm
n	Density of electron	cm ⁻³
p	Density of hole	cm ⁻³
q	Magnitude of electronic charge = 1.602x10 ⁻¹⁹	C
r_n	Scattering parameter	-
R_H	Hall constant	1/C.cm ⁻³
S_A	Absolute sensitivity	V/T
S_R	Relative sensitivity	T ⁻¹
v_x	Velocity	cm/s
V_H	Hall voltage	V
W, w	Width of hall	μm
μ_H	Hall mobility	cm ² /V-s
μ_{Hi}	Hall mobility (Consider collusion of lactic)	cm ² /V-s
μ_n	Electron mobility	cm ² /V-s
μ_p	Hole mobility	cm ² /V-s
θ_H	Hall angle	rad
ρ	Resistivity	Ω – cm
σ	Conductivity	(Ω – cm) ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีการวิจัยพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายๆ ด้าน เช่น อุปกรณ์ตรวจจับแสง อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น โดยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก เช่น ไดโอด ,ทรานซิสเตอร์, มอสเฟต ฯลฯ อุปกรณ์เหล่านี้อาศัยหลักการปรากฏการณ์ฮอลล์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะและความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งโครงสร้างอุปกรณ์มอสเฟตเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากมีโครงสร้างขนาดเล็ก, สัญญาณรบกวนที่เอาต์พุตมีค่าต่ำ โดยอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เป็นที่นิยมคือ เซ็นเซอร์ฮอลล์ (Hall effect sensor) ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีข้อดีในด้านของประสิทธิภาพ ความทนทาน และ ความง่ายต่อการนำไปสร้างลงในวงจรรวม อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กประเภทนี้จึงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน สามารถใช้งานกับวงจรรวมได้ และสามารถประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้หลากหลาย [1-3]

อุปกรณ์ฮอลล์หรือเซ็นเซอร์ฮอลล์ เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยหลักการจากปรากฏการณ์ฮอลล์ ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โครงสร้างของตัวอุปกรณ์โดยทั่วไปไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยขั้วทั้งหมดสี่ขั้ว สองขั้วใช้สำหรับจ่ายกระแสให้กับตัวอุปกรณ์และอีกสองขั้วใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์ โครงสร้างของตัวอุปกรณ์ได้รับแบบมาจากแผ่นฮอลล์ (Hall plate) แบบดั้งเดิม ที่เป็นแผ่นตัวนำสี่เหลี่ยมผืนผ้าบางๆ ซึ่งตัวอุปกรณ์สามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในทิศทางที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ หรืออาจเรียกว่าอุปกรณ์ฮอลล์แบบแนวนอน (Horizontal Hall device) เนื่องจากสนามไฟฟ้าฮอลล์เกิดขึ้นในแนวนอนหรือขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ นอกจากนี้แล้วได้มีการออกแบบให้อุปกรณ์ฮอลล์สามารถตรวจจับสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ขนานกับพื้นผิวของตัวอุปกรณ์ ซึ่งมันถูกเรียกว่า อุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้ง (Vertical Hall device) โครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจะประกอบไปด้วยขั้วห้าขั้ว สองขั้วใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ส่วนอีกสามขั้วจะถูกใช้สำหรับจ่ายกระแสให้กับตัวอุปกรณ์ การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งจะอาศัยกลไกจากปรากฏการณ์ฮอลล์เช่นเดียวกับอุปกรณ์ฮอลล์แบบแนวนอน ปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ทั้งสองแบบจะทำให้เกิดการสะสมของพาหะภายในอุปกรณ์ ส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กและ

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอุปกรณ์ ดังนั้นจากหลักการและโครงสร้างของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ง่ายต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปพัฒนาจึงทำให้อุปกรณ์ฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมต่อการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาและออกแบบอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง

แนวโน้มในอนาคตของการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพและออกแบบอุปกรณ์ให้มีขนาดเล็กลง ใช้พลังงานต่ำและมีความไวสูงเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมต่างๆ ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์แม่เหล็กเพื่อตรวจสอบตำแหน่งของรถ รวมถึงการพัฒนาอัลกอริทึมเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์แม่เหล็กไร้สายสำหรับการตรวจสอบการจราจรแบบเรียลไทม์และการประมวลผลข้อมูลสำหรับเครือข่ายถนน สำหรับระบบอัจฉริยะเซ็นเซอร์สามารถรวมอยู่ในชิปประมวลผลซึ่งทั้งหมดนี้ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำและใช้พลังงานต่ำ อุปกรณ์เซ็นเซอร์จะทำงานในโหมดกระแสสำหรับการประมวลผลสัญญาณ อุปกรณ์จำเป็นต้องมีขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูงเพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในวงจรรวมได้

MAGFET เป็นเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดหนึ่งที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นโครงสร้าง MOSFET ที่ถูกออกแบบพิเศษ โดยขั้ว Drain ถูกแบ่งสองส่วนเป็น D_1 และ D_2 สมมาตรกัน เพื่อวัดความแตกต่างของค่ากระแสจากแรงของลอเรนซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งและแนวนอน โดย MAGFET เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำและถูกสร้างด้วยมาตรฐานของเทคโนโลยี CMOS สำหรับวงจรรวมที่ต้องการใช้พลังงานและแรงดันไฟฟ้าต่ำ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้าง Non-Split Drain MAGFET สำหรับความไวสูง ซึ่งอุปกรณ์ MAGFET โดยทั่วไปจะออกแบบช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 ให้ค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ได้ค่าความไวสูงสุด ซึ่งวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับกระบวนการสร้าง แต่โครงสร้าง Non-Split Drain MAGFET จะออกแบบให้ไม่มีช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 แต่ยังคงมีหน้าสัมผัสแยกเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับวัดกระแสเอาต์พุตที่แตกต่างกัน การออกแบบใหม่นี้จะไม่มีช่องว่างของขั้ว Drain เลย ดังนั้นจึงไม่ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีกระบวนการสร้าง และงานวิจัยนี้ยังพิสูจน์ได้ว่าการออกแบบให้ไม่มีช่องว่างของขั้ว Drain จะให้ค่าความไวสูงสุดและมีค่าเข้าใกล้ทางอุดมคติ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐานที่สร้างขึ้น
2. เปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐานกับอุปกรณ์มอสเฟตใช้งานในโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ
3. ศึกษาผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของการเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสวงจรมอสเฟตที่มีต่ออุปกรณ์มอสเฟตที่ใช้งานในโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงช่องว่างของขั้วเดรนที่มีต่อความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตที่ใช้งานในโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ
5. ศึกษาค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของโครงสร้างอุปกรณ์แบบไม่แยกขั้วเดรน ในโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ

1.3 สมมุติฐานการศึกษา

1. ระยะห่างขั้วเดรนของอุปกรณ์มอสเฟตอาจส่งผลให้เกิดผลกระทบที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก
2. ระยะห่างขั้วเดรนของอุปกรณ์มอสเฟตยิ่งน้อยยิ่งทำให้ได้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุด
3. ค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุด เมื่อออกแบบให้ไม่มีระยะห่างระหว่างขั้วเดรน

1.4 ทฤษฎีแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์มอสเฟตแนวคิดที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้จะถูกศึกษาลงลึกในรายละเอียดด้านออกแบบระยะห่างขั้วเดรนของโครงสร้าง MAGFET ที่มีผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส โดยทั่วไปควรออกแบบช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 ให้ค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ได้ค่าความไวสูงสุด ซึ่งวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับกระบวนการสร้าง แต่โครงสร้าง Non-Split Drain MAGFET จะออกแบบให้ไม่มีช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 แต่ยังคงมีหน้าสัมผัสแยกเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับวัดกระแสเอาต์พุตที่แตกต่างกัน การออกแบบใหม่นี้จะไม่มีช่องว่างของขั้วเดรนเลย ซึ่งได้ความไวสูงสุดและเข้าใกล้สภาวะที่เหมาะสมโดยไม่มีการสูญเสียจากช่องว่าง

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษาการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กให้มีค่าความไวสูงสุด โดยออกแบบโครงสร้าง MAGFET ที่มีค่าช่องว่างระหว่างขั้ว D_1 และ D_2 ต่างๆกัน จนเป็นศูนย์หรือ ไม่มีช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 แต่ยังคงมีหน้าสัมผัสแยกเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับวัดกระแสเอาต์พุตที่แตกต่างกันตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานในการตรวจจับสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐาน
2. ศึกษาปรากฏการณ์กัลป์วาโนแมกเนติกที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์มอสเฟตที่อยู่ภายใต้สภาวะแม่เหล็ก
3. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟตที่อาศัยปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส
4. ศึกษาการใช้งานและการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD
5. ศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตแนวตั้งในโหมดกระแสผ่านการจำลองแบบ
6. ศึกษาผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของการเปลี่ยนแปลงค่าไบอัสวงจรมีต่ออุปกรณ์มอสเฟตแนวตั้งที่ใช้งานในโหมดกระแสด้วยการจำลองแบบ
7. ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงช่องว่างของขั้วเดรนที่มีต่อความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตแนวตั้ง

รายละเอียดในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเป็นบทต่าง ๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

กล่าวถึงความจำเป็นมา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีหรือแนวคิดของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย บอกขั้นตอนของการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กล่าวถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟต ปรากฏการณ์กัลป์วาโนแมกเนติก เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส ปรากฏการณ์แมกนีโตรซิสแตนซ์ กลไกการเบี่ยงเบนแม่เหล็กของอุปกรณ์มอสเฟตโครงสร้างต่างๆรวมถึง Non-Split Drain MAGFET และการประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก

บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการจำลองแบบ

เป็นบทที่กล่าวถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์มอสเฟต เครื่องมือที่ใช้ในการจำลองแบบสำหรับงานวิจัยนี้ และกล่าวถึงขั้นตอนการจำลองแบบอุปกรณ์รวมถึงรายละเอียดของโมเดลทางฟิสิกส์ที่อยู่เบื้องหลัง และทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD จากเครื่องมือต่าง ๆ โดยทำการจำลองแบบแมกเฟตทั้งแบบแยกขั้วเดรนและไม่แยกขั้วเดรน

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองวัดและวิเคราะห์ MOSFET แบบทั่วไป ผลการจำลองแบบด้วยโปรแกรม TCAD ผลการวัดคุณสมบัติและผลตอบสนองแม่เหล็กอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐานที่สร้างขึ้นและการจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงกว้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งสำหรับโครงสร้างอุปกรณ์ แมกเฟตแบบแยกชิ้นเดรนและแมกเฟตแบบไม่แยกชิ้นเดรน อธิบายถึงกลไกกระแสแบบจำลองต่าง ๆ และแนวทางการออกแบบให้มีความไวในความไวการตอบสนองที่ดี

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการวัดคุณสมบัติและผลตอบสนองแม่เหล็กอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐานที่สร้างขึ้นและการจำลองแบบทั้งหมด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำความเข้าใจกลไกการทำงานพื้นฐานของแมกเฟตแบบแยกชิ้นเดรนและแมกเฟตแบบไม่แยกชิ้นเดรน เพื่อจะนำไปสู่ความเข้าใจในตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กในโครงสร้างที่ใกล้เคียงกัน เข้าใจเงื่อนไขทางโครงสร้างที่มีผลอย่างมากต่อความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก โดยความรู้ความเข้าใจที่ได้จะนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

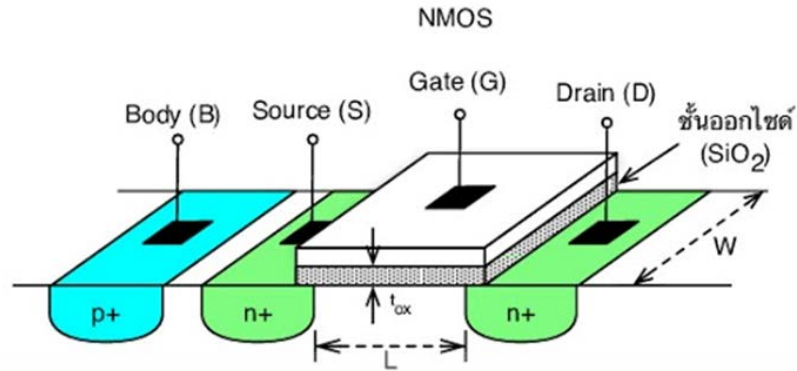
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์มอสเฟต

มอสเฟต (MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างกายภาพพื้นฐานประกอบด้วยชั้นโลหะ (Metal: M) ชั้นออกไซด์ (Oxide O) และชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor S) และใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้มีการนำกระแสไฟฟ้า มอสเฟตได้ถูกคิดค้นขึ้น ครั้งแรกโดย J. E. Lilienfeld ในช่วงประมาณปี ค.ศ. 1930 หรือกว่า 80 ปีมาแล้ว แต่มอสเฟตยังคง เป็นผลงานอยู่ห้องวิจัยอีกกว่า 30 ปี จนกระทั่งประมาณปี ค.ศ. 1960 Kahng และ Atalla [4-5] นักวิจัยของ ห้องวิจัยเบลล์ (Bell Laboratory) ได้นำเสนอและสาธิตมอสเฟตที่สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ และ หลังจากนั้นก็มีนักวิจัยจำนวนมากคิดค้นและนำเสนอเทคนิคและกระบวนการสร้างมอสเฟตในทางปฏิบัติ ทำให้เทคโนโลยีมอสเฟตมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และนำมา ซึ่งการปฏิวัติทางอุตสาหกรรมต่างๆ ที่สำคัญอย่างมาก

จากรูปที่ 2.1 สังเกตได้ว่า มอสเฟตมีโครงสร้างกายภาพที่สมมาตรกันระหว่างซอร์สกับเดรน บริเวณซอร์สและ เดรนมีคุณสมบัติกายภาพเหมือนกัน โดยซอร์ส คือจุดเริ่มต้นหรือแหล่งกำเนิด (Source) ของพาหะนำไฟฟ้า ที่จะเคลื่อนที่ไปยังอีกด้านหนึ่ง ซึ่งก็คือ เดรน หมายถึงปลายทางเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้า ใน NMOS มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันขาสอร์สจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันขาเดรน ทำให้อิเล็กตรอน เคลื่อนที่จากขาซอร์สไปขาเดรน และกระแสจะไหลจากขาเดรนไปยังขาซอร์ส (กระแสมีทิศตรงกันข้าม กับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน) ใน PMOS มีโฮลเป็นพาหะนำไฟฟ้า ดังนั้นแรงดันขาสอร์สจะมีค่ามากกว่า แรงดันขาเดรน ทำให้โฮลเคลื่อนที่จากขาซอร์สไปขาเดรน และกระแสจะไหลจากขาซอร์สไปยังขาเดรน (กระแสมีทิศตรงกันกับการเคลื่อนที่ของโฮล) ในการศึกษาคุณสมบัติของมอสเฟตจะทำการต่อแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก ด้าน input เข้าที่ขั้วเกต (V_{GS}) และที่ด้าน output (V_{DS}) ขั้วเดรน โดยจะใช้ขั้วซอร์สเป็นจุดอ้างอิง $V_S = 0$ ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ที่ขั้วควบคุม V_{GS} ทำให้สามารถควบคุมการเปิด-ปิด ช่องนำกระแส I_D ได้ ดังแสดงในกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขาออก (output-I-V characteristics) ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า หาก V_{GS} ต่ำกว่า V_{th} ทรานซิสเตอร์จะไม่นำกระแส สภาวะช่วงดังกล่าวเรียกว่า ช่วงตัด (cut-off) หรือปิด (OFF) เมื่อ V_{GS} สูงกว่า V_{th} กระแส I_D จึงจะเริ่มไหลการนำไฟฟ้าในย่าน ON ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงไตรโอด (triode) คือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงกระแส I_D เมื่อ V_{DS} เปลี่ยนไป และช่วงอิ่มตัว (saturation) ที่กระแส I_D มีค่าคงที่ แม้ V_{DS} จะเปลี่ยนไปก็ตาม ปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านมอสเฟตจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน V_{GS} , V_{DS} และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างกายภาพอย่างง่ายของมอสเฟตชนิด n (n-channel MOSFET หรือ NMOS)

ค่า V_{th} และตัวแปรทางกายภาพอื่นๆ ของมอสเฟตสามารถพิสูจน์ให้เห็นดังสมการ กระแสเดรน I_D มีค่าดังนี้

$$I_D = K \left[2(V_{GS} - V_{th})V_{DS} - V_{DS}^2 \right] \quad (2.1)$$

ซึ่งค่า K คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับความกว้าง (W) และยาว (L) ของมอสเฟต

$$K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) \quad (2.2)$$

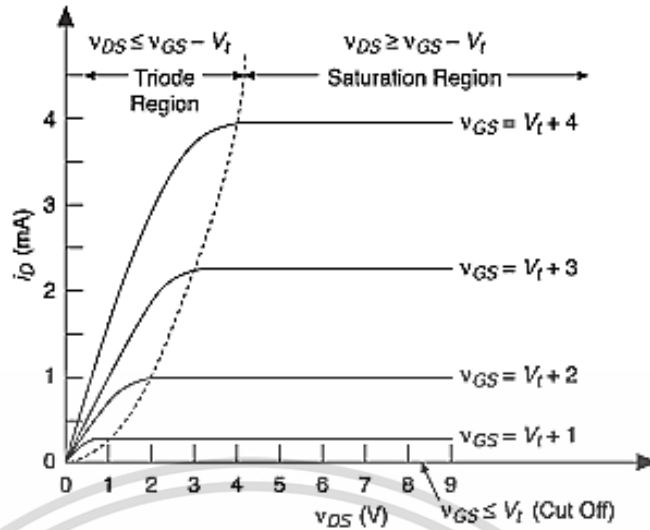
เมื่อ μ_n คือ ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility) ที่เดินในแชนเนล และ C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์ (oxide capacitance) ซึ่งเป็นฉนวนคั่นขั้วเกต หลังจากที่มีกระแสเริ่มนำไฟฟ้า หากทำการเพิ่ม V_{DS} เพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยๆ กระแสจะเกิดการอิ่มตัว หลังจากที่มี V_{DS} สูงเกินกว่า $V_{GS} - V_{th}$ เห็นได้จากด้านขวามือของเส้นประใน รูปที่ 2.2 ย่านอิ่มตัว ความต่างศักย์ที่มีผลต่อการขับเคลื่อนประจุผ่านช่องนำไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ คือ $V_{DS}(sat) = V_{GS} - V_{th}$ ดังสมการลดรูปได้เป็น

$$I_D = K (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2.3)$$

2.1.1 แรงดันขีดเริ่ม

แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage, V_{th}) คือแรงดันของขั้วโหลหะที่ทำให้ผิวของสารกึ่งตัวนำเริ่มเปลี่ยนเข้าสู่สภาวะผกผันแบบเข้ม แรงดัน V_{th} เป็นแรงดันที่ทำให้มอสเฟตเริ่มนำกระแส โครงสร้างมอสเฟตในอุดมคติที่สร้างบนแผ่นฐาน สารกึ่งตัวนำชนิด p และถูกไบแอสจะมีประจุบวกเท่ากับประจุลบในสารกึ่งตัวนำ คือ $Q_m = |Q_s|$ โดย Q_m คือประจุไอออนเคลื่อนที่ และ Q_s คือประจุอิมิตัวประจุลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงคุณสมบัติของ MOSFET

ในสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยประจุค้าง Q_d จากไอออนลบในชั้นพร่องพาหะ ($0 \leq x \leq W$) และประจุเคลื่อนที่ในแกนแนล คือ Q_n จากอิเล็กตรอนในชั้นผกผันแคบๆ ประมาณ 10 nm จากผิวหน้า

$$Q_s = Q_d + Q_n = -Q_m \quad (2.4)$$

สนามไฟฟ้าจากขั้วโลหะจะแผ่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำส่งผลให้แผนภาพแถบพลังงานโค้งลง สนามไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่ง x ใดๆ กำหนดได้จากความชันของ E_i ที่ตำแหน่งนั้นๆ

$$\xi(x) \equiv -\frac{dV}{dx} = -\frac{d}{dx} \left(\frac{E_i}{-q} \right) = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \quad (2.5)$$

โดย E_i อาจถูกแทนด้วย E_C หรือ E_V ก็ได้ เนื่องจากระดับ E_i , E_C และ E_V ขนานกัน ดังรูปที่ 2.3(ก) แสดงให้เห็นว่าสนามไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น จากศูนย์ที่บริเวณขอบของบริเวณพร่องพาหะ ($x = W$) มาสู่ค่าสูงสุด ξ_s ที่ผิวหน้า ($x = 0$) ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันเป็น ξ_0 ในฉนวนตามกฎของเกาส์ แรงดันสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าดังสมการ $\xi(x) = -dv/dx$ รูปที่ 2.3(ข) แสดงแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้าง แรงดันที่ป้อนให้แก่ขั้วโลหะ V จะตกคร่อมชั้นออกไซด์ (V_o) และผลึกสารกึ่งตัวนำ ϕ_s คือ

$$V = V_o + \phi_s \quad (2.6)$$

ในภาวะผกผันแบบเข้ม $\phi_s = 2\phi_F$ จากสมการ ในขณะที่ V_o สามารถกำหนดได้จาก ξ_0 และความหนาของฉนวน d ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = \xi_0 d = \frac{|Q_s|}{\epsilon_o} d = \frac{|Q_s|}{C_o} \quad (2.7)$$

เมื่อ ϵ_o และ C_o คือสภาพยอมต่อความจุพื้นที่ของชั้นออกไซด์ ประจุ Q_s ประมาณได้ว่าเกิดจากไอออนลบทั้งหมด $Q_s = Q_d + Q_n = Q_d$ เนื่องจาก Q_n กระจุกตัวกันอยู่ที่ชั้นบางๆ ณ ผิวหน้าเท่านั้น สมการ สำหรับจุดสารกึ่งตัวนำเริ่มเปลี่ยนเข้าสู่สภาวะผกผันแบบเข้มจึงเป็น

$$V_{th} = -\frac{Q_d}{C_o} + 2\phi_F \quad (2.8)$$

เมื่อ $c_o = \epsilon_o / d, 2\phi_F$ คำนวณได้จากสมการ $\phi_s(\text{inv.}) = 2\phi_F = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$ และ $Q_d = -qN_A W$ โดย w คำนวณได้เช่นเดียวกับกรณีรอยต่อ $n^+ - p$ เนื่องจากในกรณีนี้บริเวณปลอดพาหะอยู่ในชั้น p ทั้งหมด จากสมการ จะได้

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_s}{qN_A}} \quad (2.9)$$

เมื่อแรงดันของขั้วโลหะ V เท่ากับ V_{th} ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะกลายเป็นชั้นผกผันที่เต็มไปด้วยประจุเคลื่อนที่ หากแรงดันของขั้วโลหะถูกปรับเพิ่มจาก V_{th} เล็กน้อย ก็จะส่งผลให้ ϕ_s เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามแต่ระยะความเข้มข้นของอิเล็กตรอนในชั้นผกผัน n จะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเนื่องจาก n แปรผันแบบเอกโพเนนเชียลกับ ϕ_s ดังสมการ

$$n = n_i e^{[E_F - E_i(0)]/kT} = n_i e^{q(\phi_s - \phi_F)/kT} \quad (2.10)$$

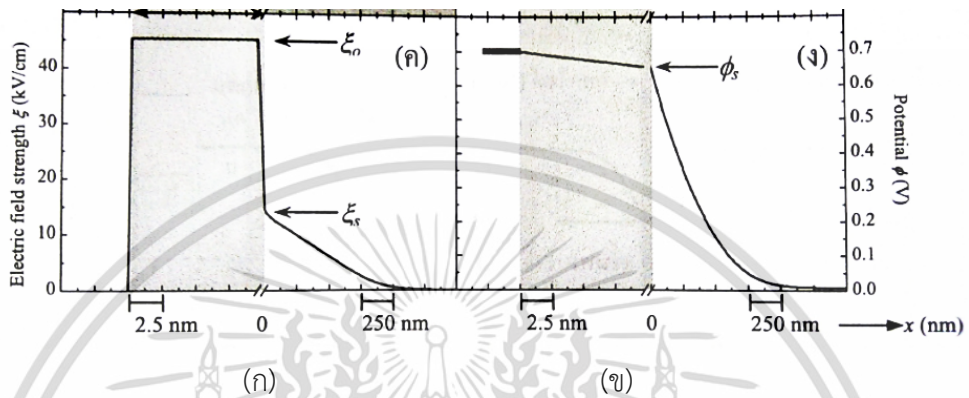
ผลคือ Q_n, Q_s และ V_o จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงว่าการแบ่งแรงดัน V_{th} โดยออกไซด์ (V_o) และสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ในสมการ หลังจากที่สารกึ่งตัวนำเข้าสู่สภาวะผกผันแบบเข้มแล้วจะเกิดขึ้นโดยชั้นออกไซด์ได้รับแรงดันส่วนเกิน $V_o \approx V - V_{th}$ ไปแทบทั้งหมด แรงดันคร่อมสารกึ่งตัวนำ ϕ_s แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงจาก $2\phi_F$ หรือระยะบกพร่องพาหะแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดคือ W_m โดย W_m คือ ความกว้างสูงสุดของบริเวณปลอดพาหะ

$$W_m = \sqrt{\frac{2\epsilon_s f_s(\text{inv.})}{qN_A}} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s fF}{qN_A}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_d = -qN_A W_m = -2\sqrt{\epsilon_s q N_A} f_F \tag{2.12}$$

ดังนั้น แรงดันซีดีเริ่มเปลี่ยนดังสมการ 2.8 ใช้ได้กับมอสในอุดมคติซึ่งชั้นโลหะและสารกึ่งตัวนำ มีฟังก์ชันงานเท่ากับ ($q\phi_m = q\phi_s$)

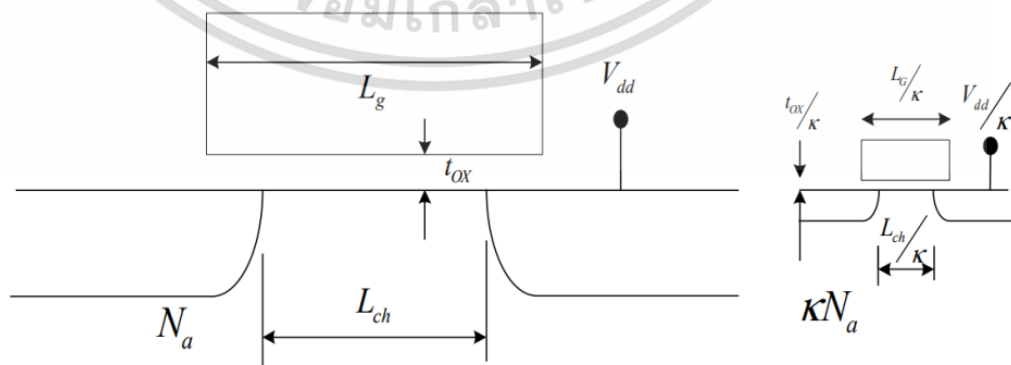


รูปที่ 2.3 (ก) สนามไฟฟ้า $\xi(x)$ และ(ข) ศักย์ไฟฟ้า $\phi(x)$

2.1.2 ผลของขนาดมอสเฟต

มีนักวิจัยหลายคนได้เสนอแนวคิดในการย่อขนาดทรานซิสเตอร์ไว้หลายรูปแบบ แต่วิธีการที่ได้รับการอ้างอิงถึงมากที่สุดคือ การย่อขนาดในอุดมคติ (ideal scaling) ตามหลักการของเดนมาร์ด ดั้ง

รูปที่ 2.4 ซึ่งมีหลักการว่า ให้รักษาสนามไฟฟ้าให้คงที่ในทุกทิศทาง (constant electric fields) ด้วยการย่อขนาดทางกายภาพ แรงดัน กระแสไปพร้อมๆ กัน ครึ่งละ α เท่า (โดยทั่วไปคือ $\sqrt{2}$ เท่า) และทำการเพิ่มระดับการโด๊ปทุกบริเวณเป็น α เท่า

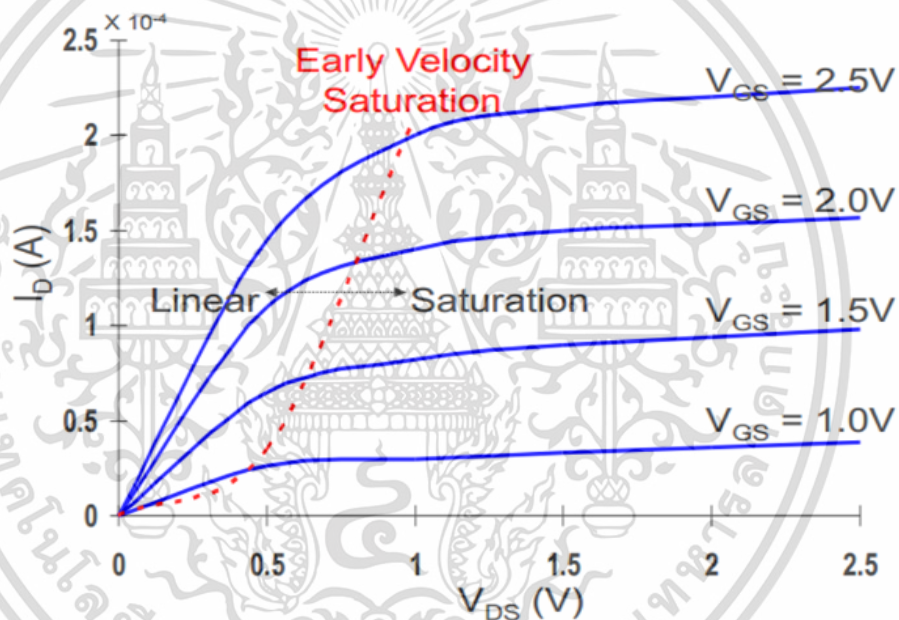


รูปที่ 2.4 แสดงภาพตัดขวางของมอสเฟต (ซ้าย) ก่อน และ (ขวา) หลังทำการย่อขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรได้มากมายหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ วงจรขยายสำหรับสัญญาณแอนะล็อก และ วงจรสลับสัญญาณดิจิทัล แม้ว่าการย่อขนาดโครงสร้างมอสเฟตเพื่อเพิ่มความเร็วในการประมวลผลสัญญาณจะส่งผลให้มอสเฟตทำงานได้ไวขึ้น มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่จะมีปัญหาหลักๆที่ตามมาส่งผลกระทบต่อเมื่อลดขนาดมอสเฟตลง ทำให้มอสเฟตไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยสามารถแบ่งออกเป็นปัญหาหลักได้ดังนี้

ปัญหาที่หนึ่งคือ จำเป็นต้องสร้างฉนวนกันขั้วเกตให้บางมาก เพื่อให้ขั้วเกตสามารถควบคุมการเดินทางของช่องนำไฟฟ้าได้ดี มิเช่นนั้นจะเกิดปรากฏการณ์ช่องนำไฟฟ้าสั้น (short-channel effects : SCE) ผลจากปรากฏการณ์ในข้อนี้จะทำให้สนามไฟฟ้าจากขั้วเดรน ส่งผลกระทบต่อขั้วซอส ทำให้ขั้วเกตเสียการควบคุม แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.5 ซึ่งให้เห็นถึงกระแส I_{ds} ที่ไม่อิ่มตัว โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อ V_{ds} เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์ช่องนำไฟฟ้าสั้น

ปัญหาที่สองคือ วัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วเกต (gate electrode) สภาพความต้านทานจะต้องลดลงเรื่อยๆ หมายความว่าขั้วเกตจะต้องถูกได้ปในระดัที่สูงขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ แต่การได้ปในระดัที่สูงเกินไปไม่สามารถทำได้ เนื่องจากถูกจำกัดโดยขีดจำกัดสภาพละลาย (solubility limits) และโดยการแพร่ซึมของสารเจือปน (dopant outdiffusion) จากขั้วเกต ผ่านฉนวนบาง เข้าสู่เซนแนล ซึ่งจะเป็ปัญหาอย่างมากกับขั้วเกตชนิด p+ เนื่องจากโบรอนเป็นอะตอมของสารเจือที่สามารถแพร่ผ่าน SiO_2 ได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Device)

2.2.1 ปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติก (Galvanomagnetic effect)

ปรากฏการณ์กัลวาโนแมกเนติกทั้งหมดเกิดจากการที่แรงลอเรนซ์กระทำต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ในตัวกลาง และแรงลอเรนซ์ก็คือแรงที่กระทำกับอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเราสามารถแสดงได้ดังสมการ

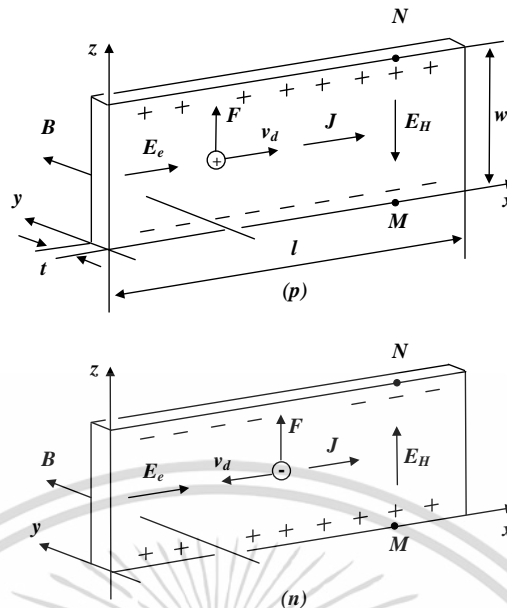
$$F = eE + e[v \times B] \quad (2.13)$$

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

2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

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

พิจารณาการเคลื่อนที่ของพาหะในแท่งสารกึ่งตัวนำบางและยาว รูปที่ 2.6 คำว่า “ยาว” ในที่นี้หมายความว่าความยาวของแผ่น l มีค่ามากกว่าความกว้าง w ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวเราสามารถละเลยอิทธิพลของขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่แผ่นสารกึ่งตัวนำได้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวโดยส่วนใหญ่จะมีระยะทางที่สั้นจึงส่งผลให้เกิดผลกระทบที่น้อยจนละเลยได้ เราจะให้แผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวถูกกำหนดประเภทเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p อย่างละแผ่น โดยเราจะไม่คิดผลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยในแผ่นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดเพื่อความง่ายต่อการอธิบาย



รูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n

ในรูปที่ 2.6 E_e คือสนามไฟฟ้าภายนอก, B คือสนามแม่เหล็ก, v_d คือความเร็วลอยเลื่อนของพาหะ, F คือแรงแม่เหล็ก, J คือความหนาแน่นกระแส, และ E_H สนามไฟฟ้าฮอลล์ แรงแม่เหล็กจะผลักพาหะที่มีประจุลบและบวกไปยังขอบข้างบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำทำให้แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ปรากฏระหว่างประจุที่ขอบของแผ่นสารกึ่งตัวนำ

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

$$v_{dp} = \mu_p E_e \quad v_{dn} = \mu_n E_e \quad (2.14)$$

ซึ่ง μ_p และ μ_n คือสภาพคล่องของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสจะหาได้ด้วย

$$J_p = q\mu_p p E_e \quad J_n = q\mu_n n E_e \quad (2.15)$$

ซึ่ง p และ n แทนความหนาแน่นโฮลและอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ

2.2.3 สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall electric field)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำในแนวแกน y ตอนนี้พาหะที่มีประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ทั้งสองส่วน เนื่องจากเราสมมติให้ความเร็วของพาหะทั้งหมดในแผ่นสารกึ่งตัวนำมีค่าสม่ำเสมอ ดังนั้นแรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p จะเป็น

$$F_p = e[v_{dp} \times B] \quad F_n = e[v_{dn} \times B] \quad (2.16)$$

แรงที่เกิดขึ้นกับพาหะประจุในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีทิศทางเดียวกัน เนื่องจาก $e = q$ และ $e = -q$ สำหรับโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นจากการรวมสมการจากaboveจะได้ว่า

$$F_p = q\mu_p[E_e \times B] \quad F_n = q\mu_n[E_e \times B] \quad (2.17)$$

โดยแรงที่เกิดขึ้นกับพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะอยู่ในแกน z จึงสามารถเขียนอยู่ในรูปขนาดของแต่ละแนวแกนเป็น

$$F_p = (0, 0, q\mu_p E_x B_y) \quad F_n = (0, 0, q\mu_n E_x B_y) \quad (2.18)$$

แรงนี้จะผลักพาหะไปทางขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความเข้มข้นของพาหะที่ขอบด้านบนของแผ่นสารกึ่งตัวนำจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของพาหะที่ขอบด้านล่างจะเริ่มลดลง ด้วยเหตุนี้ความสมดุลของประจุจะถูกรบกวนและทำให้มีสนามไฟฟ้าปรากฏระหว่างขอบด้านบนและด้านล่าง สนามไฟฟ้าที่ปรากฏนั้นดังรูปที่ 2.6 จะกระทำต่อพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับแรงทางแม่เหล็ก ซึ่งผลจากสนามไฟฟ้าจะผลักพาหะไปยังทิศที่จะลดประจุส่วนเกินที่ขอบจนในที่สุดแรงทางไฟฟ้าจะมีค่ามากพอที่จะสมดุลกับแรงทางแม่เหล็ก

$$e[v_d \times B] + eE_H = 0 \quad (2.19)$$

หลังจากนี้พาหะที่เคลื่อนที่ในแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองจะเคลื่อนที่ในแนวขนานกับแกน x ซึ่งเหมือนกับมีแรงทางไฟฟ้าภายนอกกระทำเพียงอย่างเดียว สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส (E_H) ซึ่งถ่วงดุลกับแรงทางแม่เหล็กจะเรียกว่า “สนามไฟฟ้าฮอลล์”

$$E_H = -[v_d \times B] \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ $v_{dp} = \mu_p E_e$ และ $v_{dn} = \mu_n E_e$ เราจะได้สนามไฟฟ้าฮอลล์เป็น

$$E_{Hp} = -\mu_p [E \times B] \quad E_{Hn} = \mu_n [E \times B] \quad (2.21)$$

หากเขียนในรูปของขนาดในแต่ละแนวแกน

$$E_{Hp} = (0, 0, -\mu_p E_x B_y) \quad E_{Hn} = (0, 0, \mu_n E_x B_y) \quad (2.22)$$

ดังนั้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าและมีการตัดผ่านของสนามแม่เหล็ก ส่วนแม่เหล็กของแรงมีแนวโน้มที่จะดันไฟฟ้าไปชิดกับขอบด้านหนึ่งของตัวอย่าง (คำว่า “การดันกระแสไฟฟ้า” หรือ “pressing electricity” เป็นแนวคิดที่ถูกใช้โดยเอ็ดวิน ฮอลล์)

2.2.4 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)

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

$$V_H = \int_M^N E_H dz \quad (2.23)$$

และสำหรับแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p จะได้ (ในที่นี้เราจะแสดงเฉพาะขนาดโดยละเอียดเครื่องหมายลบไว้และ w หมายถึงความกว้างของแผ่นสารกึ่งตัวนำ)

$$V_{Hp} = \mu_p E_x B_y w \quad V_{Hn} = \mu_n E_x B_y w \quad (2.24)$$

การสร้างสนามไฟฟ้าฮอลล์และแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปมักจะเรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์ ในปรากฏการณ์ฮอลล์ยังมีคุณลักษณะพื้นฐานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งนั่นก็คือ มุมฮอลล์

2.2.5 มุมฮอลล์ (Hall angle)

เมื่อมีสนามแม่เหล็กตัดผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่เกิดในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าว $E = E_e + E_H$ จะไม่ได้อยู่ในแนวแกนเดียวกับสนามไฟฟ้าภายนอก E_e ในกรณีปกติ

กระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำจะถูกจำกัดทิศทางตามสนามไฟฟ้าภายนอก ทำให้ความหนาแน่นกระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในแกนเดียวกันกับสนามไฟฟ้าภายนอกดังในรูปที่ 2.6 เนื่องจากสนามไฟฟ้าลัพท์ไม่ได้มีทิศทางร่วมกับแนวแกนของความหนาแน่นกระแส (แนวแกนของสนามไฟฟ้าภายนอก) ดังนั้นปรากฏการณ์ฮอลล์ในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาวจะแสดงผ่านการเอียงของสนามไฟฟ้าลัพท์ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอกและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่าง มุมที่เกิดจากการเอียง θ_H จะเรียกว่า “มุมฮอลล์” จากรูปที่ 2.6 สามารถหามุมฮอลล์ได้จาก

$$\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E_e|} \quad (2.25)$$

จากสมการข้างต้นเราสามารถหามุมฮอลล์ได้ตามความสัมพันธ์ของทิศทางสนามไฟฟ้าทั้งหมด นอกจากนี้ยังอาจระบุมุมฮอลล์เป็นมุมเบี่ยงเบนของความหนาแน่นกระแส J ที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าลัพท์ E ตามรูปที่ 2.6 (เนื่องจากความหนาแน่นกระแสและสนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศทางเดียวกัน) ด้วยสมการ $E_{Hp} = -\mu_p [E \times B]$, $E_{Hn} = \mu_n [E \times B]$ และสมการ $\tan \theta_H = \frac{|E_H|}{|E_e|}$ เราสามารถระบุมุมฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเป็น

$$\tan \theta_{Hp} = \mu_p B_y \quad \tan \theta_{Hn} = -\mu_n B_y \quad (2.26)$$

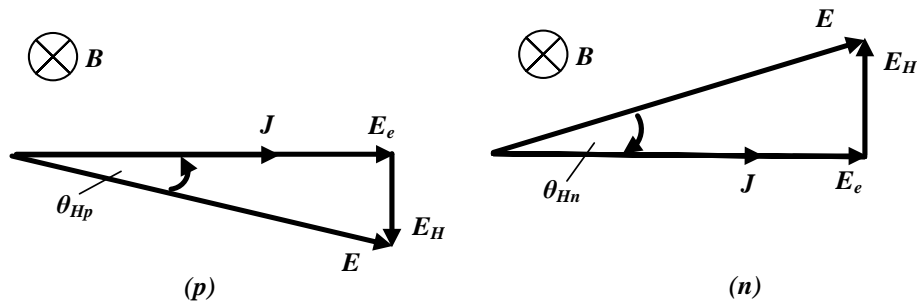
ค่าของมุมฮอลล์จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กและสภาพคล่องของประจุพาหะนั้นั้น เครื่องหมายของมุมฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของประจุพาหะในแผ่นสารกึ่งตัวนำ

2.2.6 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient)

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

$$E_{Hp} = -\frac{1}{qp} [J \times B] \quad E_{Hn} = \frac{1}{qn} [J \times B] \quad (2.27)$$

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



รูปที่ 2.7 แผนภาพเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสในแผ่นสารกึ่งตัวนำยาว

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

$$E_H = -R_H [J \times B] \quad (2.28)$$

ซึ่ง R_H คือตัวแปรที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ สมการข้างบนเป็นข้อสรุปจากการทดลองของฮอลล์

สัมประสิทธิ์ฮอลล์เป็นตัวแปรทางวัสดุ (material parameter) ที่อธิบายลักษณะความเข้มข้นและเครื่องหมายของปรากฏการณ์ฮอลล์ในวัสดุเฉพาะ หน่วยของสัมประสิทธิ์ฮอลล์คือ $VmA^{-1}T^{-1}$ (โวลต์ เมตรต่อแอมแปร์เทสลา) ซึ่งบางครั้งจะแสดงในรูปแบบที่กะทัดรัดมากขึ้นเป็น ΩmT^{-1} (โอห์ม เมตรต่อเทสลา) หรือเทียบเท่ากับ m^3T^{-1} (ลูกบาศก์เมตรต่อเทสลา)

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

เราสามารถหาสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของแผ่นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดเป็น

$$R_{Hp} = \frac{1}{qp} \quad R_{Hn} = -\frac{1}{qn} \quad (2.29)$$

เครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ฮอลล์จะสอดคล้องกับเครื่องหมายของพาหะข้างมาก และขนาดของสัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรผกผันกับความเข้มข้นของพาหะข้างมาก สำหรับการนำไปใช้จริงนั้น แรงดันไฟฟ้าฮอลล์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของตัวแปรสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้โดยอาศัยสมการ

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

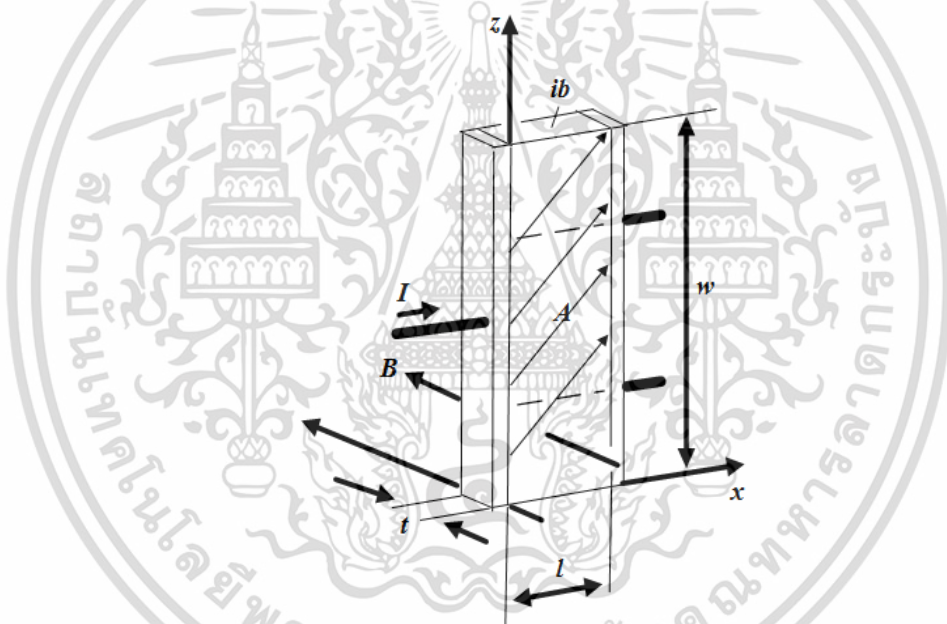
$$V_H = \frac{R_H}{t} IB_{\perp} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.2.7 ปราณุกการณ์การเบี่ยงเบนกระแส (Current deflection effect)

พิจารณาปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้นในแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น แผ่นสารกึ่งตัวนำตัวอย่างสำหรับการทดลองนี้จะเรียกว่าสั้นก็ต่อเมื่อขนาดตามทิศทางกระแสมีค่าน้อยกว่าขนาดตามทิศทางแรงที่กระทำต่อพาหะ ตัวอย่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นจะแสดงในรูปที่ 2.8 โดยใช้ระบบพิกัดและสัญลักษณ์เหมือนกับรูปที่ 2.6 ด้วยความที่เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำสั้น $l \ll w$ ทำให้รูปร่างของแผ่นสารกึ่งตัวนำคล้ายกับแซนวิชที่ประกบกันระหว่างขั้วไฟฟ้า ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังกล่าวปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดในรูปแบบซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส



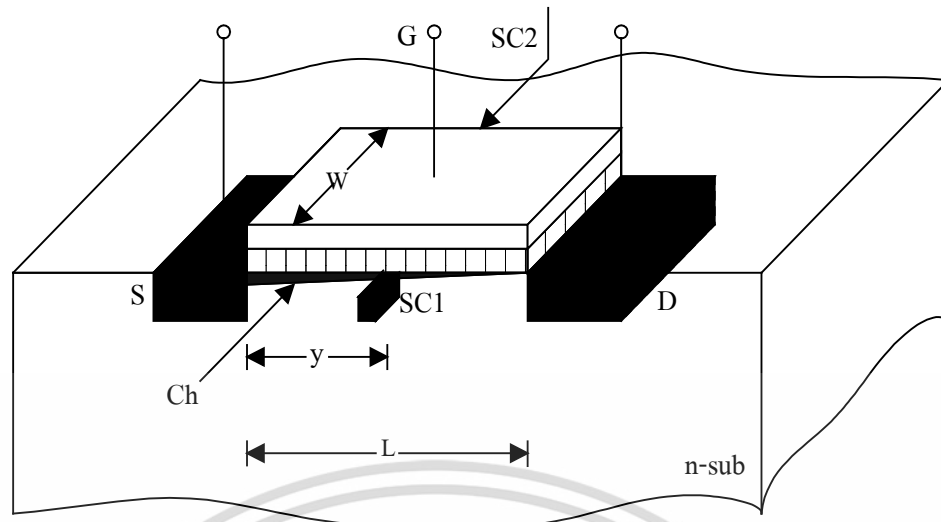
รูปที่ 2.8 แผ่นสารกึ่งตัวนำสั้นซึ่งมีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าระยะระหว่างขอบที่เป็นฉนวน (insulating boundaries, ib)

2.3 อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโครงสร้างมอสเฟต

2.3.1 MOS Hall Plate

อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบมอสฮอลล์เพลทได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการศึกษาค้นคว้าตรวจจับสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์นี้ใช้ช่องทางเดินกระแสใต้เกตของมอสเฟตเป็นฮอลล์เพลทที่มีความบางมากๆ มอสเฟตจะถูกออกแบบให้มีพื้นที่เกตใหญ่ ค่าแรงดันจะถูกวัดออกมาโดยขั้วพิเศษอยู่ระหว่างช่องทางเดินกระแส ผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของอุปกรณ์มอสฮอลล์เฟลท

โครงสร้างของมอสฮอลล์เฟลท แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นว่าเป็นอุปกรณ์มอสเฟลทที่มีความกว้าง และความยาว ช่องทางเดินกระแสคือ W และ L ตามลำดับ บริเวณซอส และ ฐานรองจะต่อรวมกัน สิ่งพิเศษที่ปรากฏในรูปที่ 2.9 ขั้ว SC_1 และ SC_2 ที่อยู่บริเวณช่องทางเดินกระแสใต้เกต มีระยะห่างจากบริเวณซอสคือ y ขั้วทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นตัววัดค่าแรงดันฮอลล์ออกมา กระแสใต้เกต มีระยะห่างจากบริเวณซอสคือ y ขั้วทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นตัววัดค่าแรงดันฮอลล์ออกมา

หลักการการทำงานของอุปกรณ์ คือ ใช้หลักการทำงานของฮอลล์เฟลท โดยฮอลล์เฟลทจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแสใต้เกตด้วยแรงดัน V_G ที่มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T (threshold voltage) ขณะที่แรงดัน V_G น้อยกว่า V_T อุปกรณ์จะไม่ทำงาน และไม่มีฮอลล์เฟลทเกิดขึ้น ชนิดของฮอลล์เฟลท จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกับซอสเดรน กระแสจะไหลผ่านฮอลล์เฟลทไปยังขั้วซอสเดรนที่ได้รับการไบอัส V_{DS} เพื่อให้มอสเฟลททำงาน ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งย่านอิมิตัว และย่านไม้อิมิตัว เมื่อมีสนามแม่เหล็กในแนวตั้งตั้งฉากกับพื้นผิวเกต มอสฮอลล์เฟลทจะทำงานเหมือนอุปกรณ์ฮอลล์ปกติโดยทั่วไป แรงดันฮอลล์จะปรากฏขึ้นระหว่างขั้ว SC_1 และ SC_2 และทิศทางสนามแม่เหล็กจะส่งผลให้ค่าแรงดันมีขั้วแตกต่างกัน ความหนาแน่นประจุที่ช่องทางเดินกระแส $Q_{ch} = C_{ox}(V_G - V_T)$ ซึ่ง C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ที่เกต ซึ่งค่านี้เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ฮอลล์ก็คือความหนาแน่นประจุ qpt ในเนื้อสาร ชนิดพี โดยที่ p คือความหนาแน่นโฮล และ t คือความหนาของฮอลล์เฟลท ค่าแรงดันฮอลล์ในที่นี้คือ

$$V_H = G I_D B r_{pch} / Q_{ch} \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

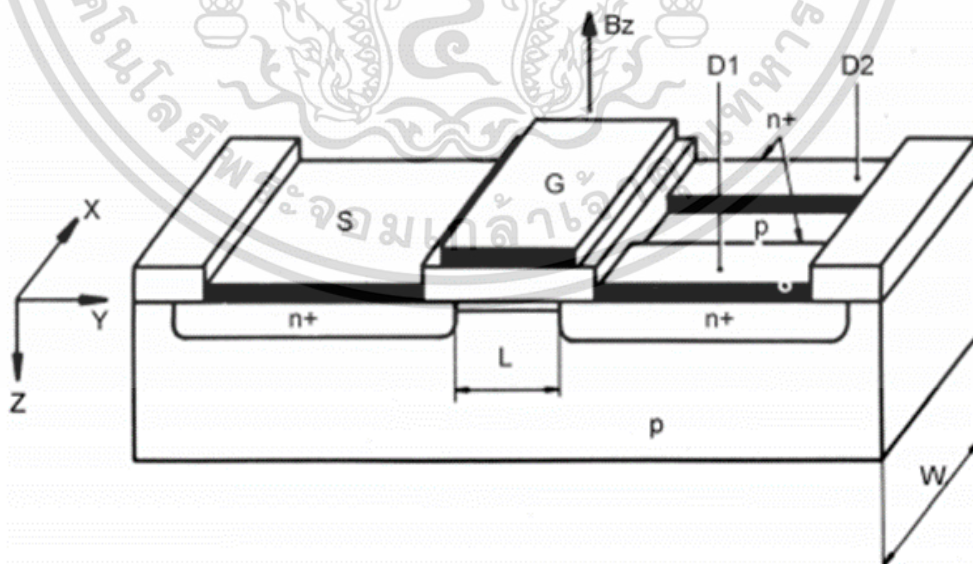
ซึ่ง r_{pch} คือแฟคเตอร์การสแคทเทอริงในชั้นฮอลล์ I_D คือกระแสไบอัส G คือค่าแฟคเตอร์ทางเรขาคณิต ซึ่งในทางอุดมคติมีค่าเป็น 1 B คือค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก ซึ่งค่าความไว S ของอุปกรณ์คือ

$$S = Gr_{pch}/Q_{ch} = Gr_{pch}/(V_G - V_T) \quad (2.32)$$

ดังนั้น โครงสร้างมอสเฟตที่ออกแบบบริเวณพื้นที่เกทอย่างเหมาะสม สามารถที่จะนำมาใช้เป็น อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์ ช่องทางเดินกระแสจะทำให้ที่เป็นฮอลล์เพลทที่บาง และตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในแนวตั้งด้านบน จากผลการทดลอง การไบอัสมอสเฟตที่เหมาะสม สามารถให้ผลตอบสนองที่ดี แนวโน้มการทำงานในช่วงไม่อิ่มตัว จะให้แรงดันฮอลล์ที่ดีกว่าในช่วงการทำงานอิ่มตัว อุปกรณ์ชนิดนี้มีวิธีการสร้างที่ง่าย ซึ่งใช้วิธีการสร้างมอสเฟตแบบธรรมดา โดยไม่มีกระบวนการพิเศษแต่อย่างใด และอุปกรณ์สามารถทำงานร่วมกับวงจรรวมได้เป็นอย่างดี

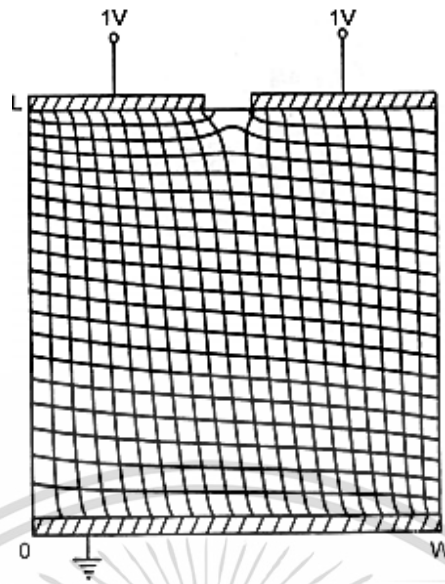
2.3.2 Split Drain MAGFET

แมกเฟต (MAGFET) เป็นโครงสร้างของมอสเฟต ที่มีขั้วเดรนแยกออกเป็น D_1 และ D_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 อุปกรณ์จะทำงานเหมือนมอสเฟตปกติ โดยหลักการทำงานเริ่มจากการจ่ายแรงดันที่ขั้วเกทและขั้วซอสคือแหล่งจ่ายกระแสคิงที่ เมื่อมีสนามแม่เหล็กแนวตั้ง (B_z) ทำให้เกิดแรง Lorentz ที่ตั้งฉากกับชั้นผกผันทำให้เกิดความไม่สมดุลในโหนดกระแส $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ ระหว่างขั้วเดรนทั้งสอง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์สัมพันธ์กับรูปทรงเรขาคณิต โดยค่าความไวสัมพันธ์ขึ้นอยู่กัค่าความแตกต่างของกระแสต่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก [15]



รูปที่ 2.10 มอสเฟตแบบเดรนแยกส่วน (Split Drain MAGFET)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลอง MAGFET แบบเดรนแยกส่วน

จากรูปที่ 2.11 หน้าสัมผัสที่ต่อลงกราวด์ถึงซอร์ส และหน้าสัมผัสด้านบนเป็นช่องเดรนสองทาง เส้นที่เชื่อมต่อคือเส้นกระแส ที่เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็ก เส้นกระแสเบี่ยงเบนไปทางเดรนด้านซ้าย ดังนั้นกระแสของเดรนด้านซ้ายจึงเพิ่มขึ้นด้วย การหาค่าความไวสัมพัทธ์แสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการนี้

$$S_I = \left| \frac{1}{I_D} \frac{\Delta I_D}{B \perp} \right| \quad (2.33)$$

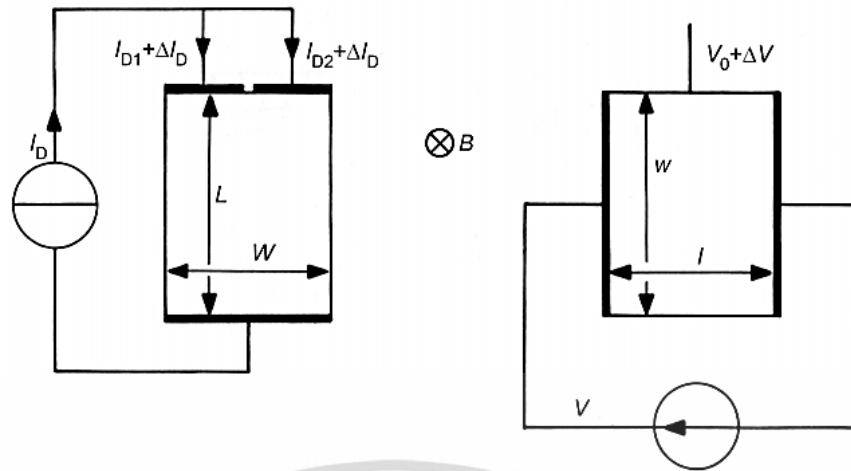
รูปที่ 2.12 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ในโหมดกระแส และโหมดแรงดัน เนื่องจากอุปกรณ์ Split-drain มีสามขั้วสัญญาณเอาต์พุตในอุปกรณ์ โดยรูป(ก) และรูป(ข) แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $V_0 + \Delta V$ โดยแสดงความสัมพันธ์ดังสมการด้านล่าง

$$\Delta I_D = \frac{I_H}{2} = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H I_D B \quad (2.34)$$

จัดสมการใหม่ได้ดังสมการนี้

$$\Delta I_D = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H I_D B \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) อุปกรณ์ฮอลล์ที่ทำงานในโหมดกระแส (ข) อุปกรณ์ฮอลล์ที่ทำงานในโหมดแรงดัน
รูปที่ 2.12 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์ในโหมดกระแส และโหมดแรงดัน

$w/l = L/W$ ดังรูปที่ 2.12 หมายถึง การเคลื่อนที่ของพาหะในแชลแนล และ G_H คือค่าแฟคเตอร์เชิงเรขาคณิต เราพบความสัมพันธ์ความไวของอุปกรณ์ Split-drain แสดงดังสมการด้านล่าง

$$S_I = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H \quad (2.36)$$

เมื่ออุปกรณ์ Split-drain ทำงานนอกช่วงเชิงเส้น การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ไม่สามารถแสดงผลออกมาได้อย่างชัดเจน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อโหมดการทำงานของอุปกรณ์เปลี่ยนจาก linear เป็น saturation

ความไว (Sensitivity)

ความไว หมายถึง อัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตหรือการตอบสนองของอุปกรณ์วัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต หรือค่าที่ถูกวัด เราสามารถระบุความไว (Sensitivity) ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในโหมดแรงดันได้ตามสมการ ความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก คือค่าที่บอกความสามารถของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สามารถเปลี่ยนสนามแม่เหล็กไปเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตหรือกระแสเอาต์พุตได้มากน้อยแค่ไหน

$$S_H = \frac{\Delta V_H}{\Delta B} \quad (V/T) \quad (2.37)$$

ในกรณีที่เราใช้อุปกรณ์ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่จะทำให้เราสามารถระบุความไวที่สัมพันธ์กับกระแสที่ไบอัส (current-related sensitivity) ได้ตามสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{H_i} = \frac{\Delta V_H}{I(\Delta B)} \quad (V/AT) \quad (2.38)$$

ในกรณีที่ไบอัสอุปกรณ์ด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ เราสามารถระบุความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันเป็น

$$S_{H_v} = \frac{\Delta V_H}{V(\Delta B)} \quad (V/AT) \quad (2.39)$$

หากวัดความไวการตอบสนองของอุปกรณ์ฮอลล์ในโหมดกระแสเราอาจจะระบุความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแสเป็น

$$S_{AI} = \frac{\Delta I}{\Delta B} \quad (A/T) \quad (2.40)$$

อาจจะระบุในรูปแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการนำตัวต้านทานไปต่อที่ขั้วกระแสที่ถูกแบ่งออกเป็นสองขั้ว (D_1 และ D_2) แล้ววัดผลต่างของแรงดันที่เกิดจากความแตกต่างกระแส

$$S_{AI} = \frac{\Delta V_{AI}}{\Delta B} \quad (V/T) \quad (2.41)$$

ดังนั้นความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของโหมดกระแสที่สัมพันธ์กับกระแสไบอัสสามารถระบุได้ตามสมการ

$$S_{AI_i} = \frac{\Delta I}{I(\Delta B)} \quad (A/AT) \quad (2.42)$$

และความไวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับแรงดันสามารถระบุได้ตามสมการ

$$S_{AI_v} = \frac{\Delta I}{V(\Delta B)} \quad (A/VT) \quad (2.43)$$

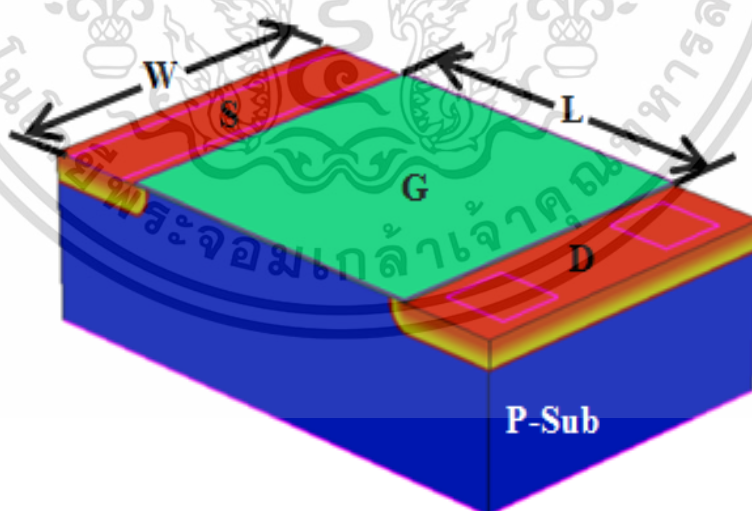
ดังนั้น Spilt-drain MAGFET จึงเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กประเภทหนึ่งที่น่าสนใจสามารถสร้างได้ด้วยมาตรฐานเทคโนโลยี CMOS ในวงจรรวมที่ใช้พลังงานต่ำ ซึ่งปัจจุบัน ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน ยกตัวอย่างงานวิจัยด้านไบโอเซนเซอร์ จะนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับและตรวจสอบเม็ดแม่เหล็กเดี่ยว หรือประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการนำส่งยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 Non-Split Drain MAGFET

โครงสร้างอุปกรณ์มอสเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรนหรือเรียกว่า Non-Split Drain MAGFET ดังรูปที่ 2.13 ถูกออกแบบให้ไม่มีระยะห่างขั้วเดรนของโครงสร้างแมกเฟตที่มีผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์การเบี่ยงเบนของกระแส โดยทั่วไปควรรออกแบบช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 ให้ค่าต่ำสุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้ได้ค่าความไวสูงสุด ซึ่งวิธีการนี้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับกระบวนการสร้าง แต่โครงสร้าง Non-Split Drain MAGFET จะออกแบบให้ไม่มีช่องว่างระหว่าง D_1 และ D_2 แต่ยังคงมีหน้าสัมผัสแยกเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับขั้วเดรนที่แตกต่างกัน การออกแบบใหม่นี้จะไม่มีช่องว่างของขั้วเดรนเลย ซึ่งได้ความไวสูงสุดและเข้าใกล้สภาวะที่เหมาะสมโดยไม่มีการสูญเสียจากช่องว่าง

งานวิจัยนี้ศึกษาโครงสร้าง Non-Split Drain MAGFET ซึ่งลักษณะการออกแบบไม่แยกเดรนนี้ให้ค่าความไวสูงสุดตามอุดมคติ ทำงานในโหมดกระแสใช้พลังงานแรงดันไฟฟ้าต่ำ อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษามีโครงสร้าง Split-Drain MAGFET ที่ถูกออกแบบให้ไม่มีช่องว่างระหว่างเดรน จึงไม่มีการสูญเสียจากช่องว่าง โดยมีคอนแทคแยกเป็น 2 คอนแทคในขั้วเดรนเดียวกันเพื่อแสดงความแตกต่างของกระแสที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก การเปรียบเทียบความไวสัมพัทธ์ของแต่ละช่องว่างระหว่างเดรนที่แตกต่างกันทั้งหมด ซึ่งผลการทดลอง ได้ผลลัพธ์ว่าช่องว่างระหว่างเดรนไม่มีความจำเป็นสำหรับโครงสร้างแมกเฟต ซึ่งเป็นวิธีใหม่ในการออกแบบแมกเฟต ที่มีประสิทธิภาพดีกว่า ได้ความไวสูงสุด ไม่เกิดการสูญเสียจากช่องว่างและไม่ขึ้นกับเทคโนโลยีการสร้าง เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแม่เหล็กสมัยใหม่



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

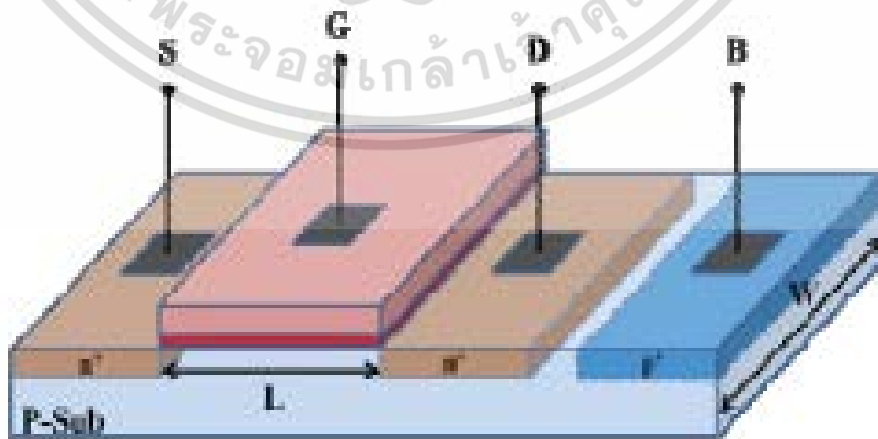
กระบวนการสร้างและการจำลองแบบ

เนื้อหาของบทนี้ จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์มอสเฟต รวมถึงเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ Non-Split Drain MAGFET โดยเครื่องมือ Sentaurus TCAD ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านสารกึ่งตัวนำที่ถูกใช้โดยบริษัทชั้นนำในด้านนี้ อย่างเช่น GlobalFoundries, Qualcomm, Microsemi, ON Semiconductor เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ เราเลือกใช้การจำลองแบบเพื่อลดระยะเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งตัวเครื่องมือยังมีข้อดีในด้านที่สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ได้ในเชิงลึก ซึ่งการวัดจริงไม่สามารถทำได้

3.1 กระบวนการสร้างอุปกรณ์มอสเฟต

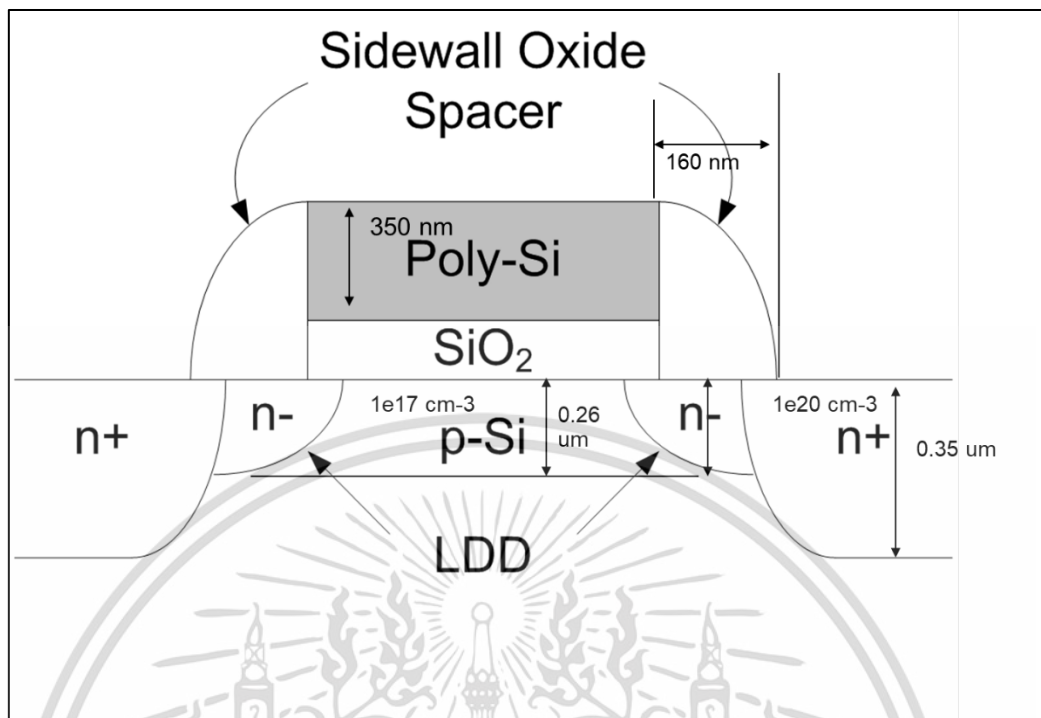
3.1.1 N-MOSFET

N-MOSFET ถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการ CMOS มาตรฐาน $0.8\ \mu\text{m}$ แผนภาพหน้าตัดของอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 3.2 ฐานรองเป็นชนิด p ที่มีความเข้มข้น $4 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ Drain และ Source คือ N^+ เจือด้วยฟอสฟอรัสและสารหนูที่มีความเข้มข้น $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ ขนาด Gate กว้าง $20\ \mu\text{m}$ และยาว $1.2\ \mu\text{m}$ ความหนาของ Gate ออกไซด์คือ $17\ \text{nm}$ รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย Mask อุปกรณ์ของ N-MOSFET แสดงรูปแบบหน้ากอกและโพลีโทลิโทกราฟีมุมมองด้านบนของอุปกรณ์ มีความแตกต่างจากรูปที่ 3.1 คือหน้าสัมผัสของขั้ว B ไม่อยู่หลังบริเวณขั้ว D แสดงในรูปที่ 3.1 อย่างไรก็ตามขั้ว D และ B อยู่ในด้านเดียวกัน และขั้ว G และ S อยู่อีกด้านหนึ่ง ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็ก

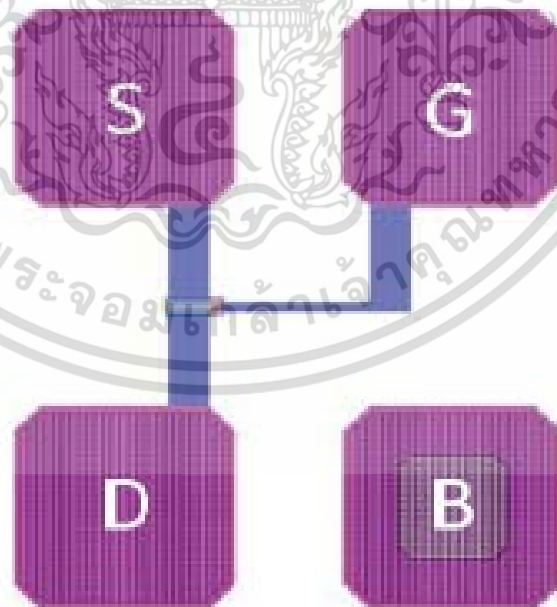


รูปที่ 3.1 โครงสร้างทั่วไปของ N-MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางของ N-MOSFET



รูปที่ 3.3 ภาพถ่าย Mask อุปกรณ์ของ N-MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 TCAD Device Model

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

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

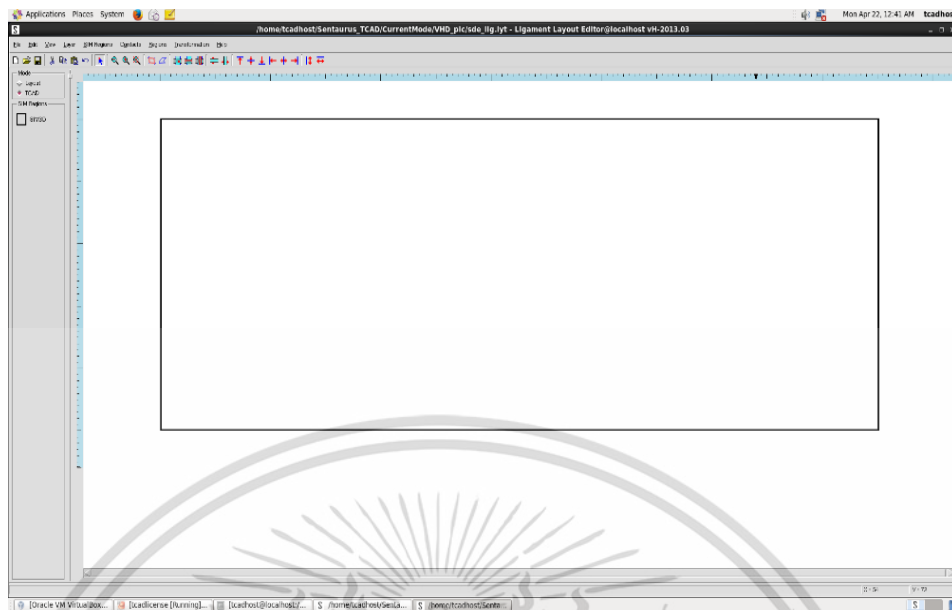
การจำลองแบบด้วย TCAD ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความซับซ้อนมากและมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนที่สูง ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ที่แก้ไขและป้องกันข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตรวมทั้งการวิเคราะห์และออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จึงนิยมใช้ TCAD เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความน่าเชื่อถือในกระบวนการผลิตและออกแบบ

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

3.3 การออกแบบอุปกรณ์โครงสร้าง MOSFET มาตรฐาน

3.3.1 การออกแบบ layout ของอุปกรณ์

ในการออกแบบ layout ของอุปกรณ์ ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการออกแบบ layout ให้ตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่วน layout จะสร้างโดยใช้ Ligament Layout Editor ที่อยู่ในเครื่องมือ Sentaurus เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้เพื่อประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 layout ของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ถูกสร้างด้วย Ligament Layout Editor

Structure Editor การออกแบบ layout เป็นการจำลองการสร้างลวดลายบนกระจกต้นแบบ (Mask) สำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) หลังจากเข้าสู่ Ligament Layout Editor แล้ว อันดับแรกเราจะกำหนดบริเวณที่จะจำลองแบบเป็น 3 มิติ รูปที่ 3.4 บริเวณนี้จะใช้กำหนดขนาดของตัวอุปกรณ์ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่แทนฐานรองของตัวอุปกรณ์ หลังจากกำหนด layer และวาดโครงสร้างของแต่ละ layer ลงบน layout ก็เป็นอันเสร็จขั้นตอนการออกแบบ layout สำหรับอุปกรณ์ (layout ที่ได้จากการออกแบบจะถูกนำไปใช้ในส่วนของ pattern ของ Ligament Flow Editor ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป)

3.3.2 การกำหนดลำดับกระบวนการสร้างอุปกรณ์

เมื่อทำการออกแบบ layout เสร็จเรียบร้อยแล้วต่อมาเราจะต้องกำหนดขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์โดยใช้ Ligament Flow Editor ซึ่งในส่วนนี้เราสามารถเลือกใช้กระบวนการต่างๆ มากำหนด process flow เพื่อสร้างอุปกรณ์ขึ้นมา โดยลำดับกระบวนการที่ใช้สร้างอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งใน Ligament Flow จะมีรายละเอียดคร่าวๆ ดังต่อไปนี้

Environment เป็นส่วนที่กำหนดชื่อของอุปกรณ์, กำหนดบริเวณจำลองแบบ 3 มิติซึ่งต้องตรงกับชื่อที่กำหนดใน Ligament Layout (SIM3D), กำหนดเครื่องมือที่จะใช้จำลองแบบ (เรากำหนดให้จำลองผ่าน Sentaurus Structure Editor (SDE)), และยังสามารถกำหนดความหนาของแผ่นนารองได้อีกด้วย (กำหนดให้หนา 200 ไมโครเมตร) ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

environment

Arguments

Name	Type	Value	Unit
(*) title	String	Magnetic Sensor	
(*) save	Boolean	true	
(*) grid	Boolean	true	
(*) debug	Boolean	false	
(*) checkId	Boolean	false	
(*) analytical	Boolean	false	
(*) simulator	Simulator	sde	
(*) mask	Mask		
(*) region	String	SIM3D	
(*) coordinate_shift	Boolean	true	
(*) output	String	n@node@	
(*) node	String	@node@	
(*) side	Side	front	
(*) graphics	Boolean	true	
(*) depth	Distance	200	um
(*) user_grid	Grid	default	
(*) grid_refinement	GridRef		
(*) tsuprem4_delta_vertical	Distance	0.5	um
(*) tsuprem4_delta_horizontal	Distance	0.5	um
(*) tsuprem4_min_vertical	Distance	0.1	um
(*) tsuprem4_min_horizontal	Distance	0.1	um

รูปที่ 3.5 ส่วน Environment สำหรับกำหนดตัวแปรและเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโครงสร้าง

Substrate เป็นส่วนที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองอย่างเช่น ชนิดของวัสดุ (material), สารเจือ (dopant), ความเข้มข้น (concentration), สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) และระนาบผลึก (orientation) ซึ่งเราใช้วัสดุฐานรองเป็นซิลิคอน (silicon) ที่ถูกเจือด้วยฟอสฟอรัส (phosphorus) เพื่อทำเป็นฐานของชนิด n โดยฐานรองจะถูกกำหนดให้มีความเข้มข้น 1×10^{15} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ค่าจะเปลี่ยนแปลงตามการทดลอง) ด้วยระนาบผลึก (100) (เนื่องจากเรากำหนดฐานรองในรูปแบบความเข้มข้นเพราะฉะนั้นส่วนของสภาพต้านทานไฟฟ้าจึงไม่จำเป็นต้องกำหนดเพราะตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอยู่แล้ว) ดังรูปที่ 3.6

substrate

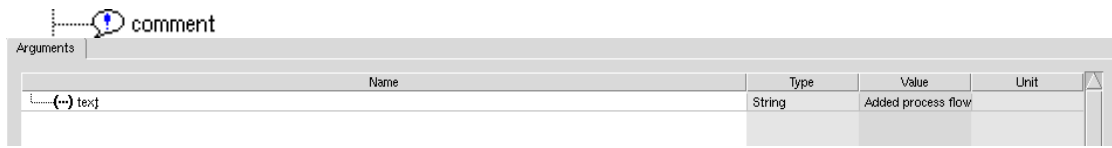
Arguments

Name	Type	Value	Unit
(*) material	String	Silicon	
(*) dopant	String	phosphorus	
(*) concentration	Concentration	1e15	/cm3
(*) resistivity	Resistivity	0	ohm-cm
(*) orientation	Number	100	
(*) type	Type	default	

รูปที่ 3.6 ส่วน Substrate ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง

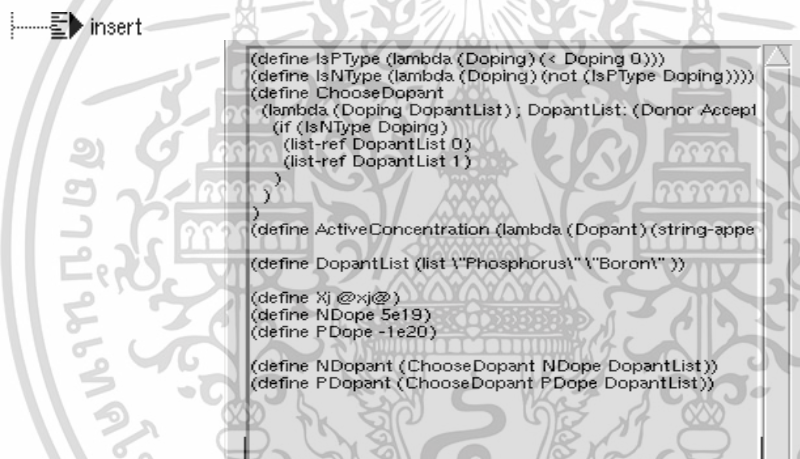
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Comment* เป็นส่วนที่ใช้ระบุข้อความต่าง ๆ ซึ่งจะพิมพ์ลงไปหรือไม่พิมพ์ลงไปก็ได้ รูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ส่วน Comment ที่ใช้ระบุข้อความ

Insert ส่วนแรกเป็นส่วนที่ใช้เขียนคำสั่งสำหรับระบุความเข้มข้นของสารเจือและความลึกของรอยต่อ ซึ่งเรากำหนดให้ความเข้มข้นสารเจือฟอสฟอรัสที่จะถูกเจือมีค่าเท่ากับ 5×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อที่จะสร้างเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูง (N^+) ส่วนความลึกของรอยต่อ เราจะประกาศเป็นตัวแปร x_j ใน Sentaurus Workbench ซึ่งกำหนดให้มีความลึก 1 ไมโครเมตร รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุชนิด, วัสดุ, ความเข้มข้นของสารเจือ, และความลึกรอยต่อ

Insert ส่วนต่อมาเป็นส่วนที่ใช้เขียนคำสั่งระบุรูปแบบการเจือ (doping profile) โดยเราเลือกรูปแบบเกาส์เซียน (Gaussian profile) ซึ่งเป็นการกระจายตัวในลักษณะการแพร่ที่สมมาตร และมีการระบุประเภทของการเจือเป็นการเจือสารชนิด n โดยใช้ชื่อการเจือเป็น “DP.IMP2” (ActiveConcentration NDopant) มีค่าความเข้มข้นสูงสุดเป็น 5×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (PeakVal) (เอามาจากส่วนที่ประกาศใน *Insert* ส่วนแรก) ตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงสุด (PeakPos) ถูกกำหนดเป็น 0 นั่นคือความเข้มข้นสูงสุดที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองในบริเวณที่ถูกเจือ ค่าความเข้มข้นที่ค่าความลึกรอยต่อ (ValueAtDepth) จะถูกกำหนดให้เท่ากับความเข้มข้นของฐานรอง ซึ่งความลึกของรอยต่อจะกำหนดตามตัวแปรที่ประกาศไปในส่วนของ *Insert* ก่อนหน้า (x_j) และส่วนสุดท้ายเรากำหนดให้แฟกเตอร์การกระจายแบบเกาส์เซียนเป็น 0.8 ดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

(sdedr:define-gaussian-profile
  \"DP.IMP2\"      (ActiveConcentration NDopant)
  \"PeakPos\"     0
  \"PeakVal\"     (abs NDope)
  \"ValueAtDepth\" 1e15
  \"Depth\"       Xj
  \"Erf\" \"Factor\" 0.8)

(sdedr:define-gaussian-profile
  \"DP.IMP1\"     (ActiveConcentration PDopant)
  \"PeakPos\"     0
  \"PeakVal\"     (abs PDope)
  \"ValueAtDepth\" 1e15
  \"Depth\"       Xj
  \"Erf\" \"Factor\" 0.8)

```

รูปที่ 3.9 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุรูปแบบการเจือสาร

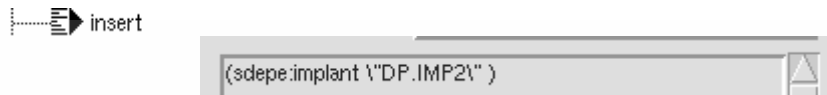
Pattern เป็นส่วนการกำหนดลวดลายของหน้ากากในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยอ้างอิงลวดลายจาก layout ที่ได้ออกแบบไว้ใน Ligament Layout Editor ตอนต้น โดยจะเริ่มจาก layout ที่เป็น layer ของ IMP2 ซึ่งเป็นบริเวณที่จะทำการเจือสารลงไป ในส่วนนี้สามารถกำหนดประเภทของหน้ากากหรือ layout (ตรงส่วน polarity)ว่าจะให้เป็นแบบ light field หรือ dark field ในการสร้างลวดลายตาม layout ที่เราออกแบบมาจะมีการสร้างชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวก จากนั้นฉายแสงและกัดน้ำยาไวแสงออกจนเกิดเป็นลวดลาย (หลังจบบันทึกตอนนี้จะเกิดลวดลายขึ้นบนชั้นน้ำยาไวแสง) นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความหนา (thickness) ของชั้นน้ำยาไวแสงและด้าน (side) ที่จะทำการสร้างลวดลายได้ด้วย ดังรูปที่ 3.10

Name	Type	Value	Unit
(*) layer	String	IMP2	
(*) polarity	Polarity	dark_field	
(*) thickness	Distance	2	um
(*) side	Side	front	
(*) type	Type	default	

รูปที่ 3.10 ส่วน Pattern สำหรับกำหนดบริเวณที่จะถูกเจือสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Insert เป็นการเขียนคำสั่งให้ยิงฝังประจุพาหะด้วยสารเจือชนิด n ความเข้มข้น 5×10^{19} อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปยังแผ่นฐานรองที่ถูกสร้างลวดลายตามขั้นตอนก่อนหน้า (อ้างอิงตามการประกาศชื่อการเจือ DP.IMP2) ดังนั้นบริเวณที่มีชั้นไวแสงปกคลุมอยู่จะทำตัวเป็นชั้นป้องกันการเจือสารให้กับฐานรอง ส่วนบริเวณที่ชั้นไวแสงถูกกัดออกก็จะถูกเจือตามที่เรารต้องการ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ส่วน Insert ที่ใช้ระบุการยิงฝังประจุ

Anneal เป็นการอบแผ่นด้วยความร้อน โดยเราตั้งให้มีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 900°C นาน 30 นาที ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm เพื่อให้โครงสร้างผลึกที่ถูกทำลายหลังการยิงฝังประจุเกิดการจับตัวขึ้นมาใหม่ ดังรูปที่ 3.12

Name	Type	Value	Unit
(-- time	Time	30	min
(-- temperature	Temperature	900	degC
(-- pressure	Pressure	1	atm
(-- nitrogen	Gas	0	l/min
(-- hydrogen	Gas	0	l/min
(-- oxygen	Gas	0	l/min
(-- hcl	Gas	0	l/min
(-- n2o	Gas	0	l/min
(-- steam_temperature	Temperature	0	degC
(-- watersteam	Gas	0	%
(-- pyrosteam	Gas	0	%
(-- side	Side	both	
(-- type	Type	default	

รูปที่ 3.12 ส่วน Anneal สำหรับกระบวนการแอนนิลหลังยิงฝังประจุ

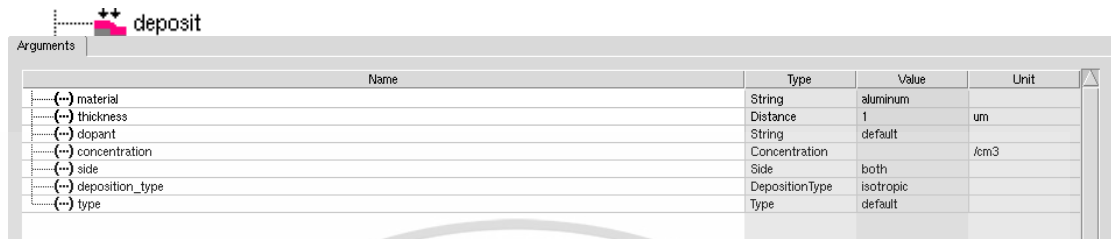
Etch เป็นการกัดชั้นน้ำยาไวแสง (Resist) ที่อยู่บนผิวฐานรองทั้งหมดออก (strip) เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวรอกกระบวนการขั้นต่อไป ดังรูปที่ 3.13

Name	Type	Value	Unit
(-- material	String	resist	
(-- thickness	Distance	default	
(-- etch_type	EtchType	strip	
(-- overetch	Number	0	
(-- etchstop	String	default	
(-- side	Side	both	
(-- type	Type	default	

รูปที่ 3.13 ส่วน Etch สำหรับกำหนดการกัดชั้นน้ำยาไวแสงก่อนสร้างชั้นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deposit เป็นการสร้างชั้นโลหะโดยกระบวนการ deposition ซึ่งเราจะสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมหนา 1 ไมโครเมตร เพื่อสร้างการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.14



Name	Type	Value	Unit
(-- material)	String	aluminum	
(-- thickness)	Distance	1	um
(-- dopant)	String	default	
(-- concentration)	Concentration		/cm3
(-- side)	Side	both	
(-- deposition_type)	DepositionType	isotropic	
(-- type)	Type	default	

รูปที่ 3.14 ส่วน Deposit ที่ใช้สำหรับการสร้างชั้นโลหะ

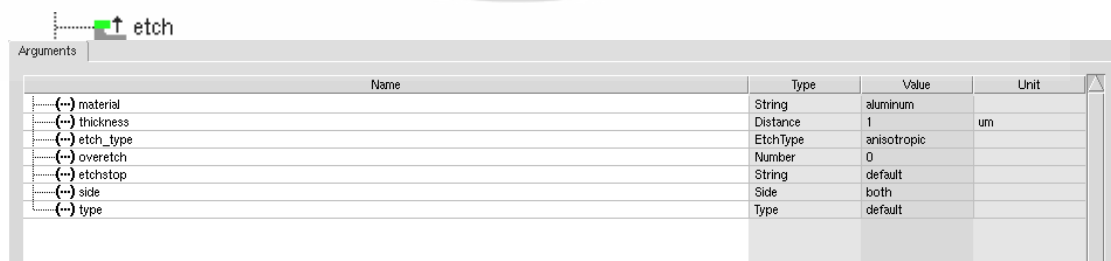
Pattern เป็นการสร้างลวดลายตาม layer ที่จะใช้สร้างชั้นโลหะ (M1) โดยใช้ porality ประเภท light field ดังรูปที่ 3.15



Name	Type	Value	Unit
(-- layer)	String	M1	
(-- polarity)	Polarity	light_field	
(-- thickness)	Distance	2	um
(-- side)	Side	front	
(-- type)	Type	default	

รูปที่ 3.15 ส่วน Pattern สำหรับการสร้างขั้วไฟฟ้า

Etch เป็นการกัดชั้นโลหะตามลวดลาย (Pattern) ที่ประกาศไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า ดังรูปที่ 3.16



Name	Type	Value	Unit
(-- material)	String	aluminum	
(-- thickness)	Distance	1	um
(-- etch_type)	EtchType	anisotropic	
(-- overetch)	Number	0	
(-- etchstop)	String	default	
(-- side)	Side	both	
(-- type)	Type	default	

รูปที่ 3.16 ส่วน Etch ที่ใช้กัดชั้นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Etch ส่วนสุดท้ายเป็นการกัดชั้นน้ำยาไวแสงที่ผิวออกทั้งหมดดังรูปที่ 3.17

Name	Type	Value	Unit
(... material	String	resist	
(... thickness	Distance	default	
(... etch_type	EtchType	strip	
(... overetch	Number	0	
(... etchstop	String	default	
(... side	Side	both	
(... type	Type	default	

รูปที่ 3.17 ส่วน Etch ชั้นสุดท้ายสำหรับกัดชั้นน้ำยาไวแสงที่ผิวออกทั้งหมด

หลังจากกำหนดขั้นตอนใน Ligament Flow Editor และดำเนินการ (Run) จนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผลที่ได้จะปรากฏโครงสร้างพร้อมกับข้อผิดพลาดตามที่เรานำได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.17 โดยโครงสร้างที่ได้จะยังไม่ปรากฏ contour ของการเจือสารในบริเวณที่เราได้ทำการเจือลงไป เนื่องจากเรายังไม่ได้กำหนดส่วนของ mesh นั้นเอง ขั้นตอนถัดไปเราจะทำการสร้างโครงตาข่าย (mesh) และกำหนดหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าหรือข้อผิดพลาด (contact) ให้กับตัวอุปกรณ์

3.3.3 การจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

หลังจากได้โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วย Sentaurus Device ซึ่งการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จะต้องระบุโมเดลทางฟิสิกส์ที่จะถูกนำมาใช้จำลองพฤติกรรมต่างๆ โดยโมเดลทางฟิสิกส์สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์แวนดิงที่ถูกใช้คือ โมเดลโครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงาน (energy band structure and band gap) โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (mobility), โมเดลการผสมกลับของพาหะ (recombination) และโมเดลทางแม่เหล็ก (galvanomagnetic)

3.2 การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

การจำลองกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor process simulation) คือการสร้างแบบจำลองเลียนแบบกระบวนการผลิตจริงของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เช่นทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวเก็บประจุ เป็นต้น เป้าหมายสำคัญของการจำลองกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คือการคาดคะเนการกระจายตัวของสารเจือที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

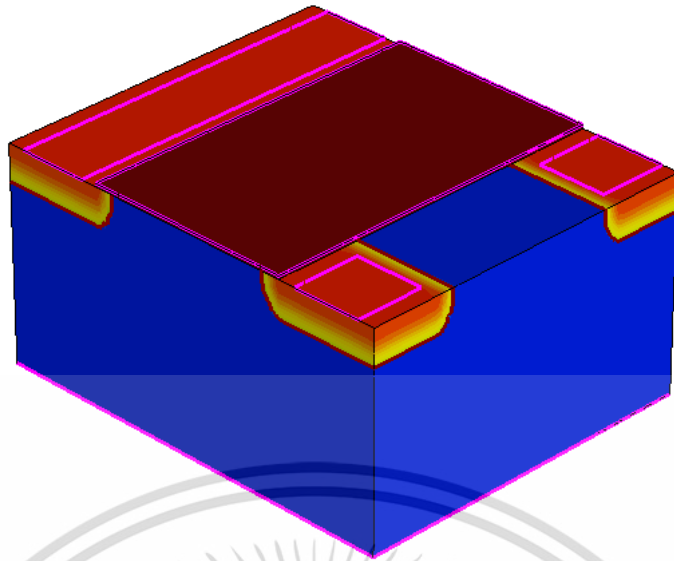
กระจายไปตามความเข้มข้นของสารเจือและขึ้นอยู่กับรูปทรงของอุปกรณ์ การจำลองกระบวนการจะเป็นวิธีหรือขั้นตอนหนึ่งในเบื้องต้นที่จะสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป ในการออกแบบวงจรรวมจะมีลำดับการออกแบบเริ่มจากออกแบบฟังก์ชันการใช้งานแล้วไปออกแบบวงจรแล้วแตกเป็นขั้นตอนย่อย ๆ เช่นการออกแบบทางตรรกะ ในการออกแบบก็จะมีทั้งที่ออกแบบเป็นตัวเดี่ยว และที่ประกอบเป็นวงจรขนาดใหญ่ ขั้นตอนการออกแบบในขบวนการผลิตจะประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย ๆ หลายขั้นตอนซึ่งการจำลองแบบก็ต้องทำไปตามลำดับเช่นเดียวกับของจริง อินพุตที่จะป้อนเข้าไปสำหรับการจำลองกระบวนการผลิตคือขั้นตอนการสร้างและขนาดมิติโครงสร้างของอุปกรณ์ที่จะสร้าง โดยส่วนใหญ่ก็จะใช้รูปหน้าตัดตามระนาบต่าง ๆ สำหรับการจำลองแบบ 2 มิติ หรือการใช้พื้นที่หน้าตัดแล้วสร้างขึ้นเป็นปริมาตรสำหรับการจำลองแบบ 3 มิติในการจำลองแบบก็ต้องการความแม่นยำที่สูงใกล้เคียงกับของจริงแต่ก็อาจจะต้องแลกกับเวลาที่ใช้นานขึ้น บางครั้งเมื่ออุปกรณ์มีขนาดที่เล็กมากการจำลองแบบก็ต้องแบ่งเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กละเอียดมากยิ่งขึ้นก็ยิ่งต้องใช้เวลานาน แต่ก็มีความจำเป็นเพราะต้องการผลที่ใกล้เคียงกับความจริงมากยิ่งขึ้น การจำลองแบบกระบวนการผลิตจะต้องปรับเปลี่ยนไปตามเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่พัฒนาไป นักวิจัยจึงต้องทำความเข้าใจกระบวนการผลิตและทำการปรับปรุงแบบจำลองโดยตลอดให้ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริงมากที่สุด

3.2.1 การจำลองแบบการสร้าง MAGFET

การจำลองแบบอุปกรณ์ MAGFET เป็นการจำลองแบบในทางอุดมคติ โครงสร้างของอุปกรณ์จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าสามขั้ว อธิบายได้โดยพิจารณาจาก ดังรูปที่ 3.18 อุปกรณ์ถูกสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ โดยจะทำการสร้างขั้วไฟฟ้าขึ้นมาสองขั้ว คือ ซอส (source) และเดรน (drain) พื้นที่ระหว่างกลางขั้วทั้งสองคือช่องนำไฟฟ้าหรือแชนแนล (channel) ซึ่งเป็นเส้นทางเดินของอิเล็กตรอน (ซึ่งก็คือสัญญาณไฟฟ้าหรือข้อมูล)บนช่องนำไฟฟ้าจะถูกปกคลุมโดยฉนวน (oxide) ก่อนที่จะมีขั้วโลหะเรียกว่าส่วนขั้วเกต (gate) มาซ้อนทับอีกต่อหนึ่ง เกทจะทำหน้าที่ในการในการควบคุมการส่งสัญญาณไฟฟ้าระหว่างซอสและเดรน โดยอาศัยหลักการดูดหรือผลักประจุ (อิเล็กตรอน) ในบริเวณแชนแนล

ในการจำลองแบบเราจะไปใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ให้กับตัวอุปกรณ์ เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานในโหมดกระแส ศึกษาความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีต่อตัวอุปกรณ์ โดยทำการป้อนสนามแม่เหล็กและให้แรงดันไฟฟ้าตกรวมตัวอุปกรณ์ การจำลองแบบอุปกรณ์ MAGFET ด้วยโปรแกรม TCAD เราจะแบ่งการดำเนินการเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นการขึ้นโครงสร้างและกำหนดโครงตาข่ายหรือ mesh ให้กับตัวอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือประเภท Structure Editor ส่วนต่อมาหลังจากขึ้นโครงสร้างเสร็จ เราจะทำการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือ Device simulation ซึ่งขั้นตอนการจำลองแบบสามารถอธิบายได้ตามหัวข้อต่อไปนี้ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 MAGFET

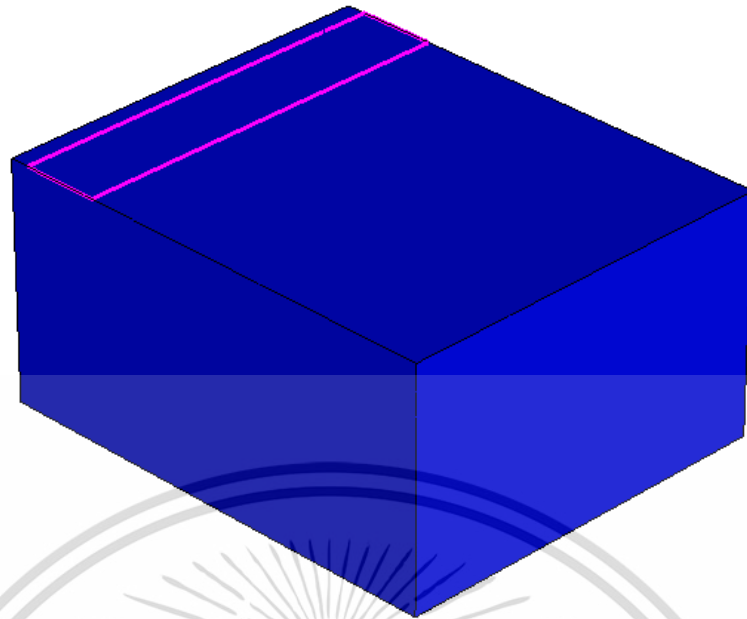
3.2.2 ขั้นตอนการสร้าง MAGFET

การจำลองแบบ กระบวนการสร้าง MAGFET เริ่มจากสร้างโครงสร้างฐานรอง ระบุขนาดของชิ้นงาน โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ฐานรองชนิด P-Type ดังรูปที่ 3.19 และสร้างขั้ว Source และ Drain ดังรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 ตามลำดับ

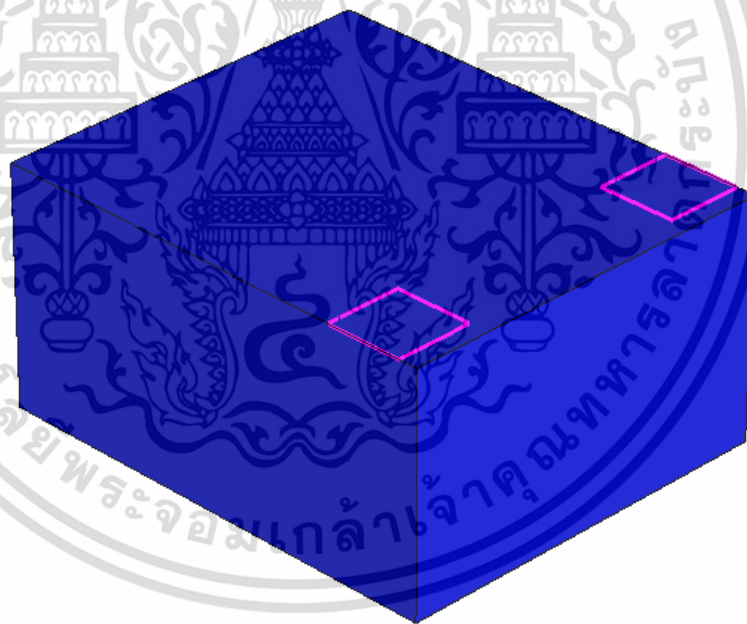


รูปที่ 3.19 การสร้างโครงสร้างฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



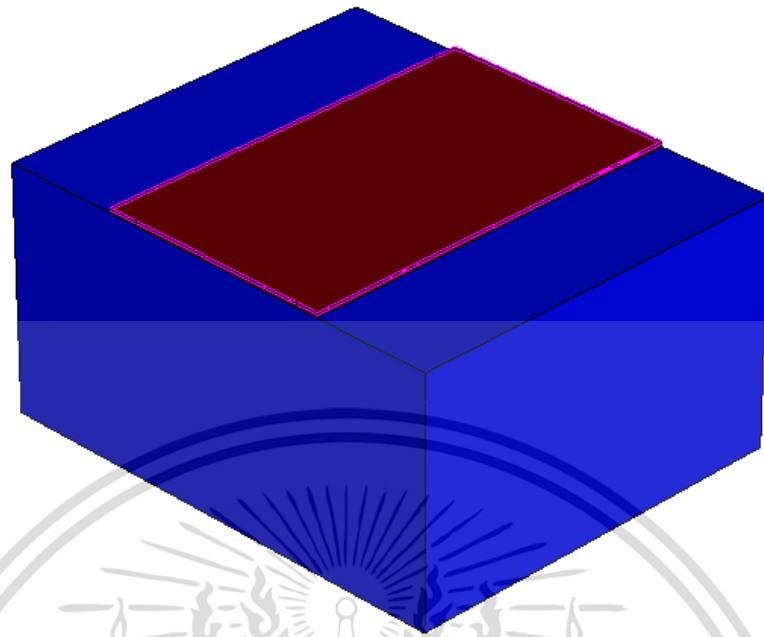
รูปที่ 3.20 การสร้างขั้ว Source



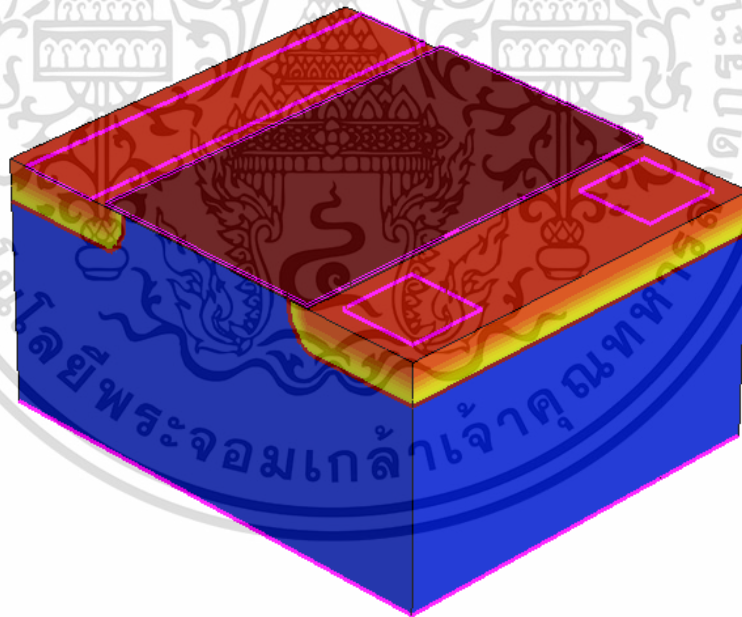
รูปที่ 3.21 การสร้างขั้ว Drain

โครงสร้างของแชนแนลใช้ Silicon ในการสร้างและทำการได้ขั้ว Source และ Drain ด้วยโบรอนทำให้ได้เป็นสารชนิด n-Type ช่องทางเดินของกระแสไฟฟ้า กำหนดให้มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ ตามรูปแบบโครงสร้างของ MAGFET โดยกระแสที่ไหลจะไหลผ่านในช่องทางเดินกระแส ซึ่งถูกควบคุมโดยสนามไฟฟ้าจากขั้วเกต ดังรูปที่ 3.22 การสร้าง Gate จะกำหนดค่า Gate Oxide โดยใช้ SiO_2 ในการได้ป ขนาดความหนา $T_{ox} = 17 \text{ nm}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



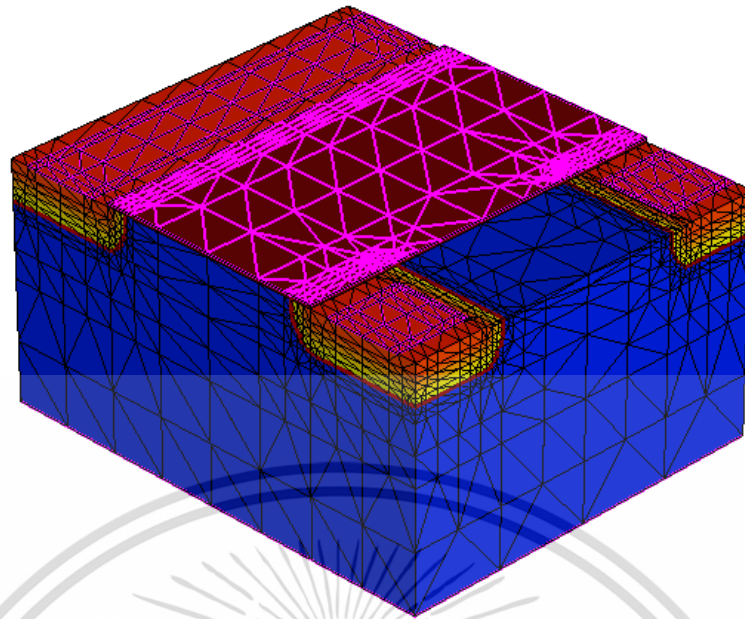
รูปที่ 3.22 การสร้าง Gate



รูปที่ 3.23 ทำการสร้างขั้วไฟฟ้า (Contact)

การสร้าง Contact ของชิ้นงาน ทำการกำหนดการได้ปดิ่งนี้ Gate ใช้ SiO_2 , Source และ Drain ใช้สารเจอร์เมเนียม หลังจากนั้นจะสร้างพิกัดขั้วไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การสร้าง Mesh

รูปที่ 3.24 เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างชิ้นงาน โดยจะทำการสร้าง Mesh คลุมชิ้นงานทั้งหมด ซึ่งจะใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณ ความหนาแน่นของ Mesh สามารถกำหนดเองได้ตามความเหมาะสมของชิ้นงาน หากกำหนด Mesh หนาแน่นมากเกินไปจะใช้เวลาในการคำนวณมากยิ่งขึ้น

3.2.3 การจำลองแบบและแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็ก

เมื่อได้โครงสร้างของตัวอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการจำลองแบบการทำงาน (Device simulation) ของแมกเพต โดยการกำหนดอุปกรณ์ประกอบใช้คำสั่งสร้างแหล่งจ่ายไฟเข้าที่ด้าน Input ซึ่งก็คือขั้วเกต (V_{GS}) และที่ด้าน Output ซึ่งก็คือขั้ว เดรน (V_{DS}) โดยมีขั้ว Souce เป็นจุดอ้างอิง (ground หรือ $V_S = 0$ V) กำหนดจุดการเชื่อมต่อวงจรเข้ากับอุปกรณ์ที่ได้มาจากขั้นตอนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Process simulation) เมื่อกำหนดการต่อวงจรเรียบร้อยแล้วก็นำไปกำหนดแบบจำลองทางฟิสิกส์ต่อไป

การการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วย Device simulator ซึ่งการจำลองแบบพฤติกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์จะต้องระบุโมเดลทางฟิสิกส์ที่จำเป็นพื้นฐานจะถูกนำมาใช้จำลองพฤติกรรมต่างๆ โดยโมเดลทางฟิสิกส์สำหรับแมกเพต โมเดลโครงสร้างแถบพลังงานและช่องว่างพลังงาน (energy band structure and band gap), โมเดลสภาพคล่องของพาหะ (mobility), โมเดลการผสมกลับของพาหะ (recombination) และโมเดลทางแม่เหล็ก (galvanomagnetic) ซึ่งในที่นี้จะขอ

กล่าวถึงโมเดลที่มีความเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กเท่านั้นคือโมเดลความหนาแน่นกระแสโฮลและอิเล็กตรอน ส่วนโมเดลอื่นเป็นโมเดลใช้ตามมาตรฐานโมเดลทางฟิสิกส์

โมเดลสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)

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

สำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เราจะใช้โมเดลการขนส่งพาหะแบบกัลวานิก (Galvanic transport model) ซึ่งเป็นโมเดลที่อาศัยสมการความหนาแน่นกระแสการแพร่-ลอยเลื่อนที่เพิ่มเทอมที่ขึ้นกับสนามแม่เหล็กเข้าไป โดยสิ่งที่กระทำต่อสมการขนส่ง (transport equations) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์นั้น เป็นผลมาจากแรงลอเรนซ์ที่มีต่อพาหะ [22-24] ด้วยเหตุนี้สมการความหนาแน่นกระแสจึงสามารถเขียนได้เป็น

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1 + (\mu_\alpha^* B)^2} \left[\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha) \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ $\alpha = n$ หรือ p

μ_α คือ สภาพคล่องของพาหะ

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

μ_α^* คือ สภาพคล่องพาหะของฮอลล์ (Hall mobility)

\vec{B} คือ เวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (magnetic induction vector)

B คือ ขนาดของเวกเตอร์เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

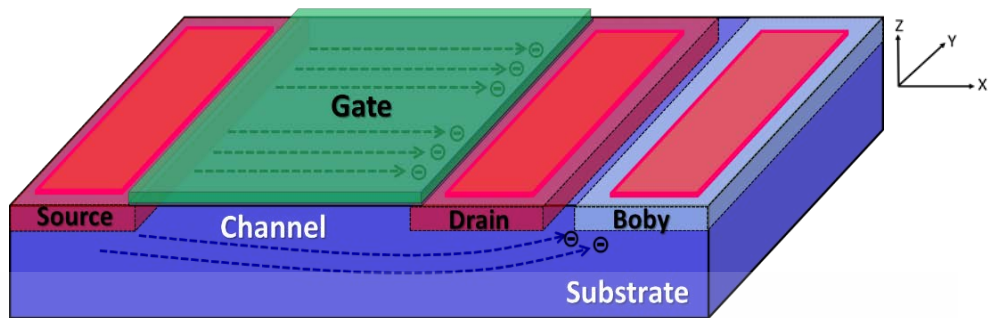
โดยสภาพคล่องของฮอลล์จะสัมพันธ์กับสภาพคล่องขณะลอยเลื่อน (drift mobility) ตามสมการ

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

3.3 สมมุติฐานในการจำลองแบบ

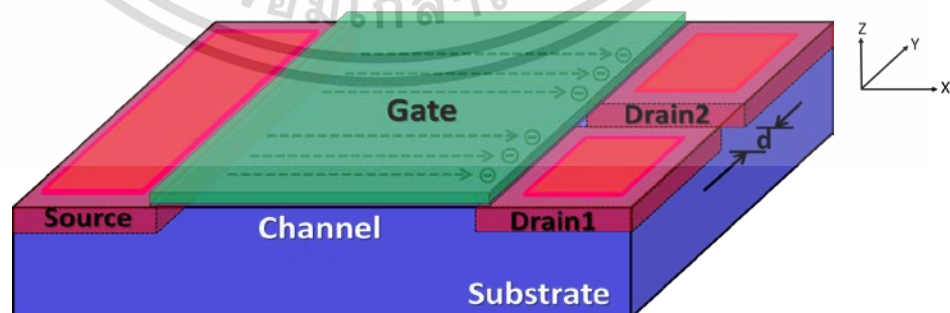
การจำลองแบบอุปกรณ์ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้เครื่องมือ Sentaurus TCAD เพื่อศึกษาคุณสมบัติการทำงานภายใต้ความเข้มสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 0.5 เทสลา มีการทดลองให้ทิศทางสนามแม่เหล็กทั้งในแนวตั้งและแนวนอนของแต่ละโครงสร้างอุปกรณ์ มีการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสม เช่นค่าการไบอัสของกระแส แรงดัน ค่าความต้านทาน ค่า L/W Ratio เป็นต้น สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์นี้ จะเป็นการทำงานของอุปกรณ์ในโหมดกระแสเท่านั้น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆเหล่านี้ มีผลต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็ก โดยสมมุติฐานของการจำลองแบบเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 โครงสร้างมอสเฟตทั่วไป

โครงสร้างมอสเฟตทั่วไป โดยปกติแล้วขั้วบอดี้หรือฐานรองจะอยู่ใกล้กับขั้วซอร์สเสมอ และจะเชื่อมขั้วซอร์สกับฐานรองเข้าด้วยกัน แต่ในกรณีนี้ จะออกแบบให้ขั้วเดรนและฐานรองอยู่ที่ด้านเดียวกันแต่จะไม่ได้เชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 3.25 โดยขั้วเกตจะทำหน้าที่สร้างช่องทางเดินกระแสจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง และขั้วซอร์สจะกำหนดให้อยู่ด้านหนึ่ง เมื่อทำการไบอัสแรงดันที่ขั้วเดรนและขั้วบอดี้ ขั้วซอร์สจะฉีดกระแสอิเล็กตรอนไปยังขั้วเดรนผ่านช่องทางเดินกระแสใต้เกต ซึ่งขั้วบอดี้กับขั้วเดรนจะถูกไบอัสและปรับค่าด้วยความต้านทานที่เหมาะสม เพื่อต้องการให้ค่ากระแสเดรนและกระแสฐานรองที่ใกล้เคียงกันและผลรวมของกระแสเดรนและกระแสฐานรองจะเท่ากับกระแสซอร์สเสมอ ดังนั้น เมื่อมีการให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวนอนหรือทิศ Y จะเกิดแรงลอเรนซ์ที่ทำให้กระแสอิเล็กตรอนที่อยู่ในช่องทางเดินกระแสเบี่ยงเบนมารวมกับกระแสอิเล็กตรอนในฐานรอง ทำให้ค่าเอาต์พุตของกระแสเดรนน้อยกว่ากระแสฐานรอง และในกรณีเดียวกัน ค่าเอาต์พุตของกระแสเดรนมากกว่ากระแสฐานรองเมื่อให้ทิศทางสนามแม่เหล็กในทิศ $-Y$ แนวทางนี้ทำให้สามารถนำโครงสร้างมอสเฟตทั่วไปมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับแม่เหล็กสำหรับแนวนอนได้

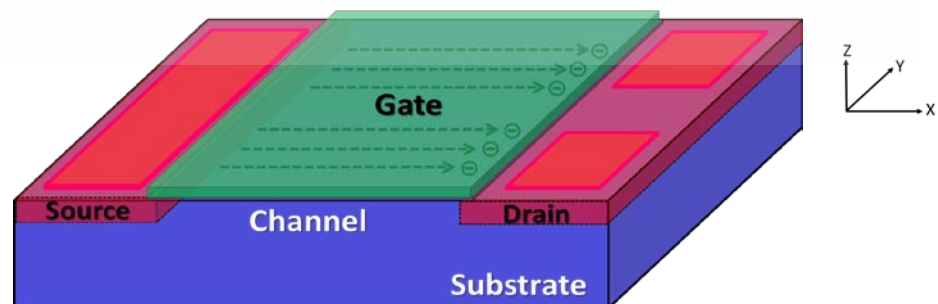


รูปที่ 3.26 โครงสร้างมอสเฟตแบบแยกขั้วเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างมอสเฟตแบบแยกขั้วเดรน จะประกอบไปด้วยขั้วซอร์ส เกท และเดรน โดยที่ขั้วของเดรนจะถูกแยกจากกันโดยมีระยะห่างระหว่างขั้วเดรน ทำให้แยกเป็นขั้วของ D_1 และ D_2 ดังรูปที่ 3.26 เมื่อทำการไบอัสให้มอสเฟตทำงานตามปกติ ขั้วซอร์สจะฉีดกระแสอิเล็กตรอนไปยังขั้วเดรนผ่านช่องทางเดินกระแสใต้เกท โดยที่ค่าผลรวมของกระแสเดรนทั้งสองที่ถูกแยกจะเท่ากับกระแสเดรนและจะเท่ากับกระแสซอร์สเสมอ สำหรับโครงสร้างนี้ ผลต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กจะเกิดในแนวตั้งเท่านั้น ดังนั้น เมื่อมีการให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวตั้งหรือทิศ Z จะเกิดแรงลอเรนซ์ที่ทำให้กระแสอิเล็กตรอนของขั้วซอร์สผ่านช่องทางเดินกระแส เกิดการเบี่ยงเบนจากขั้วเดรนขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง ทำให้ค่าเอาต์พุตของกระแสเดรนขั้วที่ 1 มากกว่ากระแสเดรนขั้วที่ 2 และในกรณีเดียวกัน ค่าเอาต์พุตของกระแสเดรนขั้วที่ 1 น้อยกว่ากระแสเดรนขั้วที่ 2 เมื่อให้ทิศทางสนามแม่เหล็กในทิศ $-Z$ แนวทางนี้ทำให้สามารถนำโครงสร้างมอสเฟตแบบแยกขั้วเดรน มาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับแม่เหล็กสำหรับแนวตั้งได้ และผลต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กในแนวตั้งจะดีขึ้นเมื่อออกแบบให้ระยะห่างของขั้วเดรนทั้งสองน้อยลง ซึ่งระยะยิ่งน้อยยิ่งทำให้ได้ความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแนวตั้งสูงขึ้น

รูปที่ 3.27 เป็นโครงสร้างมอสเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน จะประกอบไปด้วยขั้วซอร์ส เกท และเดรน ซึ่งโครงสร้างจะคล้ายกับโครงสร้างมอสเฟตแบบแยกขั้วเดรน แต่โครงสร้างนี้ ขั้วของเดรนจะมีคอนแทคแยกเป็น 2 คอนแทคในชั้นเดรนเดียวกัน เมื่อทำการไบอัสให้มอสเฟตทำงานตามปกติ ขั้วซอร์สจะฉีดกระแสอิเล็กตรอนไปยังขั้วเดรนผ่านช่องทางเดินกระแสใต้เกท โดยที่ค่าผลรวมของกระแสเดรนจากขั้วคอนแทคทั้งสองจะเท่ากับกระแสเดรนและจะเท่ากับกระแสซอร์สเสมอ สำหรับโครงสร้างนี้ ผลต่อการตอบสนองของสนามแม่เหล็กจะเกิดในแนวตั้งเท่านั้น ดังนั้น เมื่อมีการให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวตั้งหรือทิศ Z จะเกิดแรงลอเรนซ์ที่ทำให้กระแสอิเล็กตรอนของขั้วซอร์สผ่านช่องทางเดินกระแสเกิดการเบี่ยงเบนไปยังขั้วเดรนขั้วหนึ่งมาอีกขั้วหนึ่ง ทำให้ค่าเอาต์พุตของกระแสเดรนจากคอนแทคขั้วที่ 1 มากกว่ากระแสเดรนจากคอนแทคขั้วที่ 2 และในกรณีเดียวกัน ค่าเอาต์พุตของกระแสเดรนจากคอนแทคขั้วที่ 1 น้อยกว่ากระแสเดรนจากคอนแทคขั้วที่ 2 เมื่อให้ทิศทางสนามแม่เหล็กในทิศ $-Z$ และค่าความไวในการตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุด เมื่อออกแบบให้ไม่มีระยะห่างระหว่างขั้วเดรนหรือช่องว่างเท่ากับศูนย์



รูปที่ 3.27 โครงสร้างมอสเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

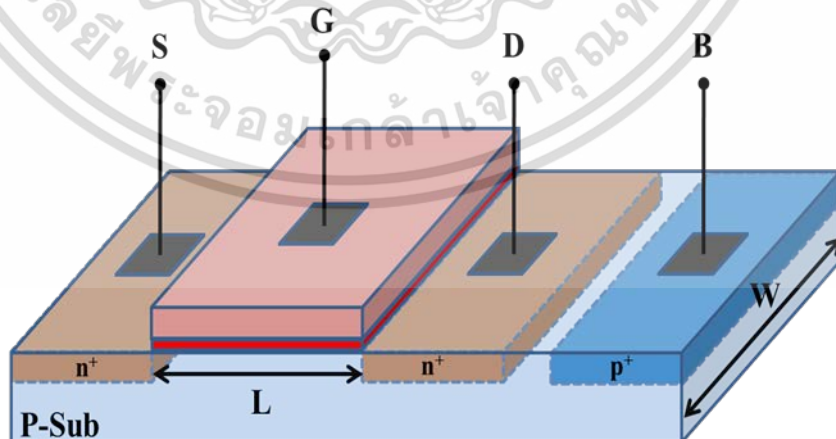
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองแบบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์ฮอลล์แนวตั้งที่ได้จากการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD ซึ่งผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะถูกวัดทั้งในรูปของแรงดันไฟฟ้าฮอลล์และความแตกต่างของกระแส หรือก็คือการทำงานของอุปกรณ์ในโหมดแรงดันและโหมดกระแสตามลำดับ โดยผลการจำลองแบบที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์และเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ทำงานในโหมดทั้งสอง นอกจากนี้จะมีการอธิบายผลที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีต่อการทำงานของโหมดทั้งสอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติและผลตอบสนองแม่เหล็กอุปกรณ์มอสเฟตมาตรฐาน

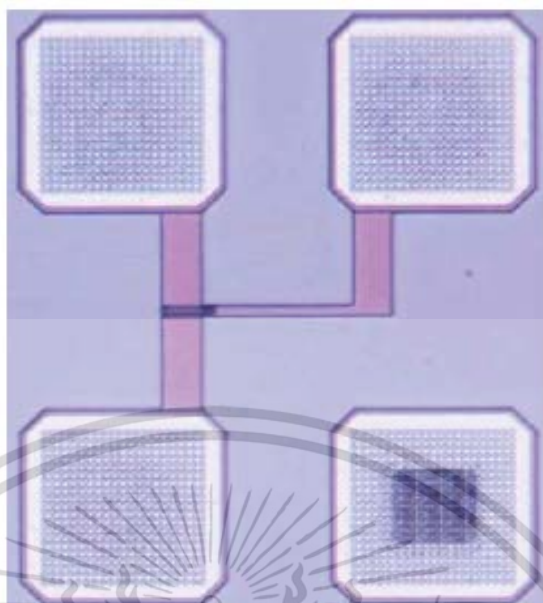
4.1.1 MOSFET แบบทั่วไป

มอสเฟต(MOSFET) เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญที่สุดในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์มอสเฟตนี้เป็นองค์ประกอบหลักสำหรับการออกแบบวงจรรวม CMOS ซึ่งมีการใช้พลังงานต่ำในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับโครงสร้างมอสเฟต มีขั้วพื้นฐาน 4 ขั้วคือเดรน เกท ซอร์สและบอดี้ การศึกษานี้จะเลือกใช้ขั้วของอุปกรณ์ปกติทั่วไป แต่จะออกแบบให้ขั้วบอดี้ อยู่ใกล้กับขั้วเดรน เพื่อประยุกต์ใช้ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างทั่วไปของ N-MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพด้านบนของ N-MOSFET



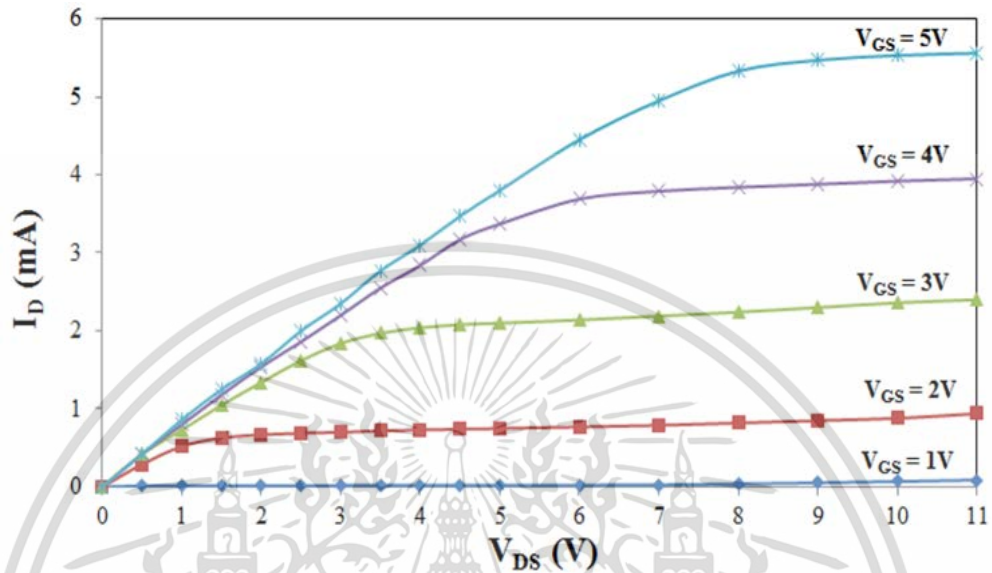
รูปที่ 4.3 ภาพอุปกรณ์จริงของ N-MOSFET จากการ Fabrication

จากรูปที่ 4.2 เป็นภาพถ่ายด้านบนของตัวอุปกรณ์ N-MOSFET จากการ Fabrication เมื่อผ่านกระบวนการสร้างแล้วเสร็จจะนำมาตรวจสอบโดยอาจจะตัดแบ่งออกมาจากแผ่น Silicon เมื่อได้ตัวที่สมบูรณ์ไม่ผิดพลาด จะนำไปบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ดังรูปที่ 4.3 อุปกรณ์ที่ได้ก็พร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดลองและผลลัพธ์ของกราฟคุณลักษณะ I-V

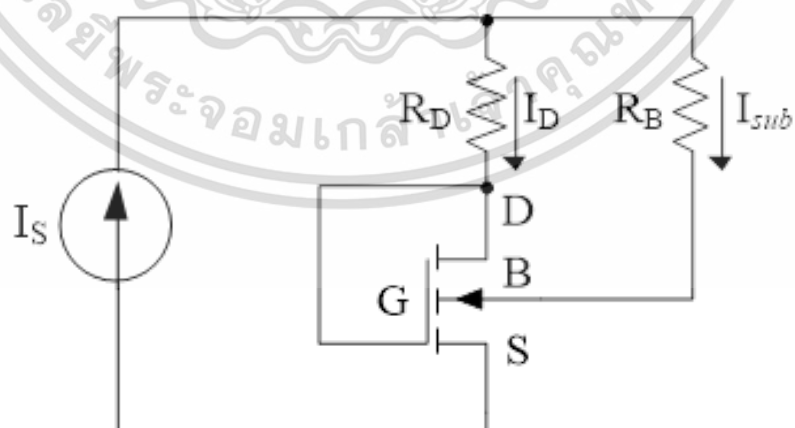
ลักษณะแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากการวัด ถูกแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็น N-MOSFET ปกติ จากนั้นจะถูกนำไปทดสอบการตอบสนองของแม่เหล็ก



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะกราฟ I-V ของ N-MOSFET

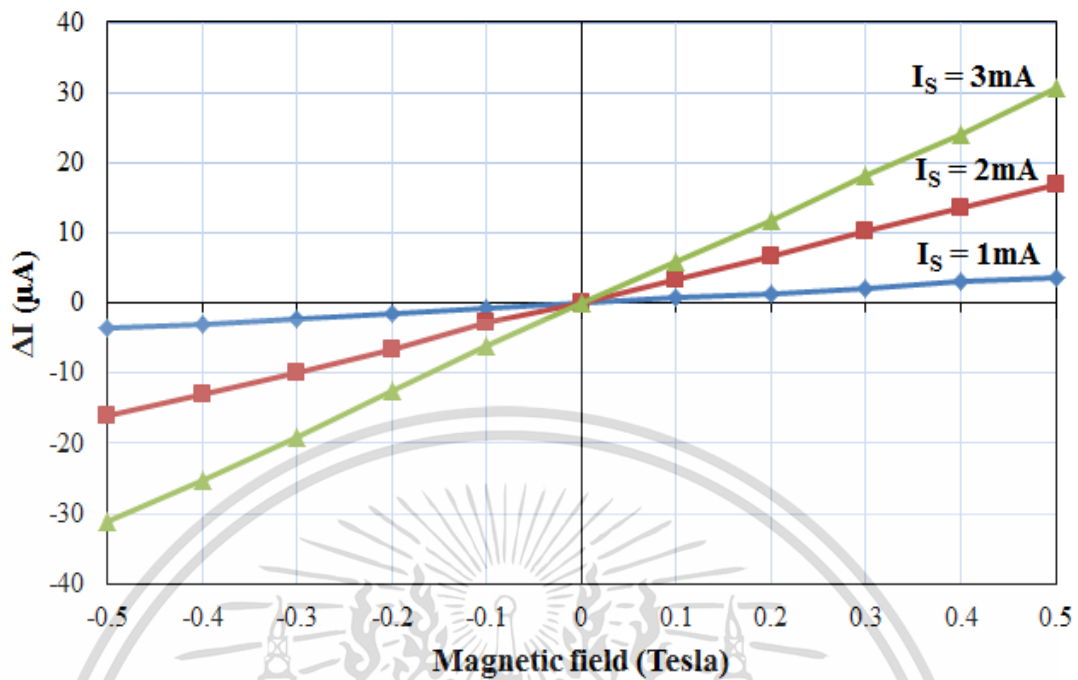
4.1.3 วงจรสำหรับไบอัสและผลการตอบสนองแม่เหล็ก

วงจรสำหรับวัดการตอบสนองแม่เหล็ก แสดงในรูปที่ 4.5 แหล่งจ่ายกระแสคงที่ใช้สำหรับควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า เพื่อหลีกเลี่ยงผลการมอดูเลตแม่เหล็ก กระแสของขั้วเดรนและฐานรวมกันเป็นกระแสคงที่ I_s ค่าความแตกต่างของกระแสมาจากการเบี่ยงเบนโดยแรงของลอเรนซ์



รูปที่ 4.5 วงจรไบอัสสำหรับวัดค่าการตอบสนองแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองต่อแม่เหล็กของอุปกรณ์จริง

การตอบสนองของแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 4.6 ไบอัสด้วยกระแสที่ 1, 2 และ 3 mA ผลลัพธ์คือความแตกต่างของกระแสที่เบี่ยงเบน ΔI ($I_{sub}-I_D$) จากเงื่อนไขเริ่มต้นที่ไม่มีการใช้สนามแม่เหล็ก ($\Delta I = 0$) การตอบสนองแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและกระแสที่แตกต่างกัน ค่าความไวสัมพัทธ์ ($\Delta I / I \cdot \Delta B$) คือ 0.0072, 0.0168 และ 0.02 T^{-1} ที่ 1, 2 และ 3 mA ตามลำดับ

4.1.4 การจำลองแบบและผลการตอบสนองแม่เหล็กในแนวนอน

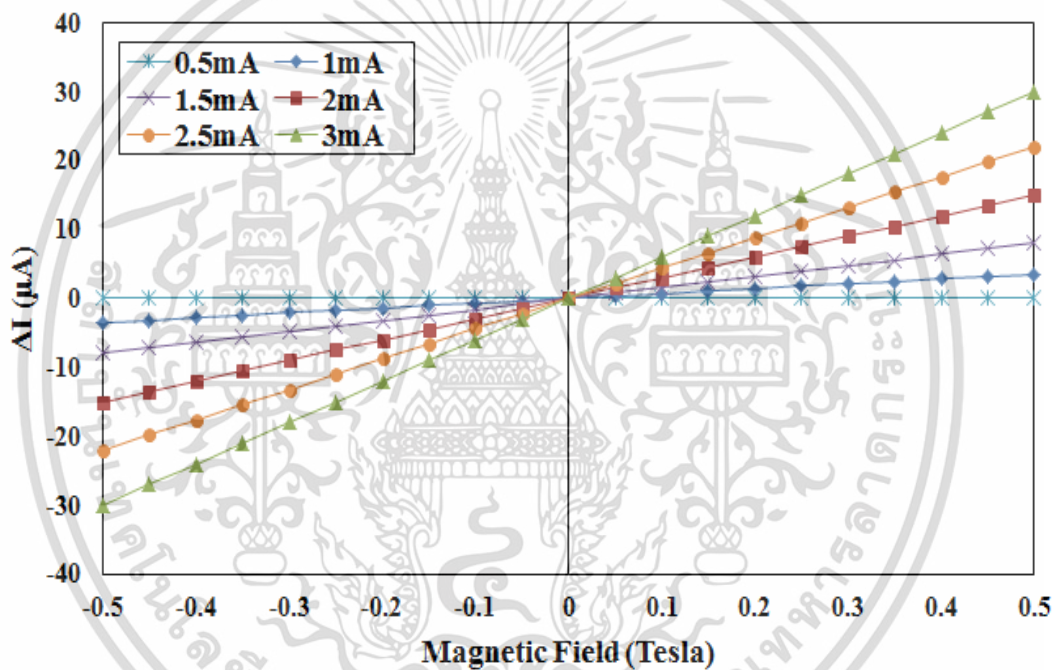
โครงสร้างมอสเฟตแบบปกติ จะมี 4 ขั้ว คือเดรน เกท ซอร์ส และบอดี โดยปกติ ขั้วซอร์สและบอดีจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการไบอัสของฐานรอง สำหรับการประยุกต์ใช้ตรวจจับแม่เหล็ก จะออกแบบให้ขั้วเดรนและบอดีอยู่ที่ด้านเดียวกัน ขั้วเกตจะทำหน้าที่สร้างช่องทางเดินกระแสจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง และขั้วซอร์สจะกำหนดให้อยู่ด้านหนึ่ง โดยที่ขั้วซอร์สจะฉีดกระแสอิเล็กตรอนไปยังขั้วเดรน ด้วยการไบอัสแรงดันที่ขั้วเกต และขั้วบอดีกับขั้วเดรนจะถูกไบอัสโดยให้มีค่ากระแสเดรนและกระแสบอดีที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสซอร์ส

N-MOSFET ถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการ CMOS มาตรฐาน 0.8 μm แผนภาพหน้าตัดของอุปกรณ์ ถูกแสดงในรูปที่ 4.2 Substrate เป็นชนิด p ที่มีความเข้มข้น $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ Drain และ Source คือ N^+ เจือด้วยฟอสฟอรัสและสารหนูที่มีความเข้มข้น 10^{20} cm^{-3} ขนาดของ Gate กว้าง 20 μm และยาว 1.2 μm ความหนาของ Gate Oxide คือ 17 nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงมุมมองด้านบนของอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างจากรูปที่ 4.1 คือ หน้าสัมผัสของขั้วบอดี้ ไม่อยู่หลังบริเวณขั้วเดรน อย่างไรก็ตามขั้วของเดรน และ บอดี้ อยู่ในด้านเดียวกันของเกต และขั้วซอร์สอยู่อีกด้านหนึ่ง ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานตรวจจับสนามแม่เหล็ก

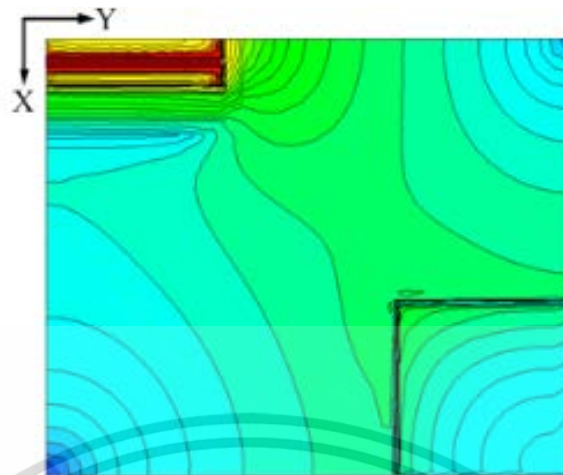
เงื่อนไขสำหรับการจำลองเป็นขนาดอุปกรณ์และความเข้มข้นสารเจือเดียวกับที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่สภาพอุปกรณ์จริงอย่างแน่นอนเนื่องจากในกระบวนการสร้างจริง ค่าพารามิเตอร์บางอย่างในระหว่างกระบวนการสร้างนั้นแตกต่างกันไป ผลการจำลองแบบเบื้องต้นนี้ ต้องการยืนยันกลไกและความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและผลการตอบสนอง รูปที่ 4.7 แสดงการตอบสนองทางแม่เหล็กของอุปกรณ์ที่ค่ากระแส 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 mA แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความไวสัมพัทธ์คือ 0.0071, 0.0152 และ 0.02 T⁻¹ ที่กระแส 1, 2 และ 3 mA ตามลำดับ



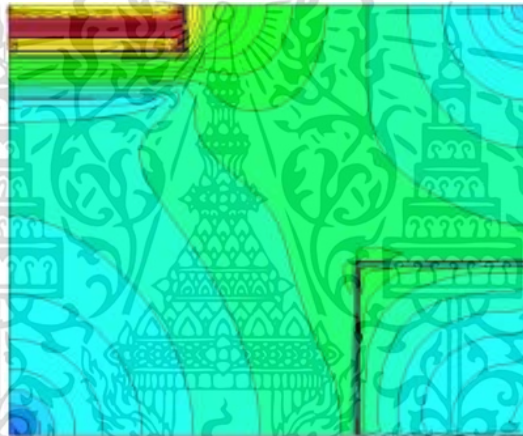
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองต่อแม่เหล็กของการจำลองแบบ

การกระจายความหนาแน่นกระแสจะแสดงในรูปที่ 4.8(ก) เป็นกรณีที่ไม่มีความหนาแน่นแม่เหล็ก เงื่อนไขเริ่มต้นกระแสเดรน (I_D) และกระแสฐานรอง (I_{Sub}) เท่ากัน เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางแกน y ค่าความหนาแน่น I_{Sub} จะเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่น I_D จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ข) ในทางกลับกัน เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในทิศทางแกน $-y$ ค่าความหนาแน่น I_D จะเพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่น I_{Sub} จะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ค) กระแสของซอร์สจะเท่ากับผลรวมของกระแสเดรนและกระแสฐานรอง ($I_D + I_{Sub} = I_S$) เสมอ

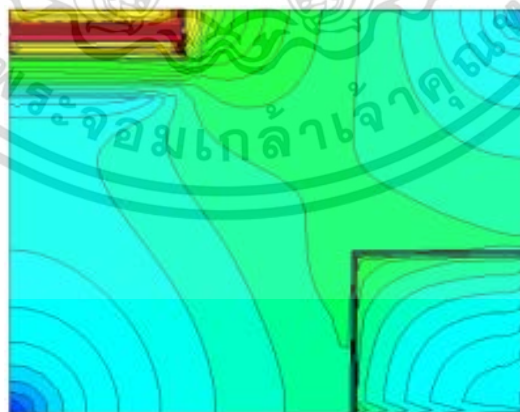
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก



(ข) สนามแม่เหล็กในทิศทาง Y



(ค) สนามแม่เหล็กในทิศทาง -Y

รูปที่ 4.8 การกระจายความหนาแน่นกระแสของการจำลองแบบ

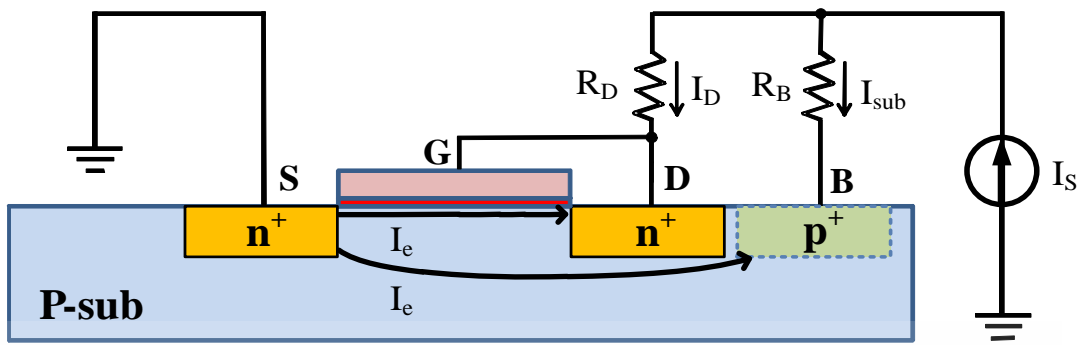
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวัดและการจำลองแบบ จะอธิบายดังรูปที่ 4.9 ซึ่งได้เสนอรูปแบบกลไกการทำงานของอุปกรณ์ รูปที่ 4.9(ก) เป็นอุปกรณ์ที่ยังไม่มีการให้ค่าสนามแม่เหล็ก ค่ากระแสที่แสดงในรูปคือกระแสอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นกระแสธรรมชาติจึงอยู่ตรงกันข้ามกัน โดยปกติแล้ว กระแสทั้งสองควรได้รับการปรับค่าให้เท่ากัน แต่โดยธรรมชาติแล้วจะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีแรงดันไฟฟ้าชดเชยระหว่างขั้วเดรนและบอดี ในการศึกษานี้ วัดความแตกต่างของค่ากระแส ΔI จากสภาพเริ่มต้นที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ค่ากระแสชอร์สคงที่ มีความสำคัญต่อการรักษาปริมาณกระแสให้คงที่ หมายความว่า กระแสที่เพิ่มขึ้นของด้านหนึ่งมาจากอีกด้านหนึ่ง ผลรวมกันของค่ากระแสเดรนและกระแสฐานรองจะคงที่ตลอดเวลา

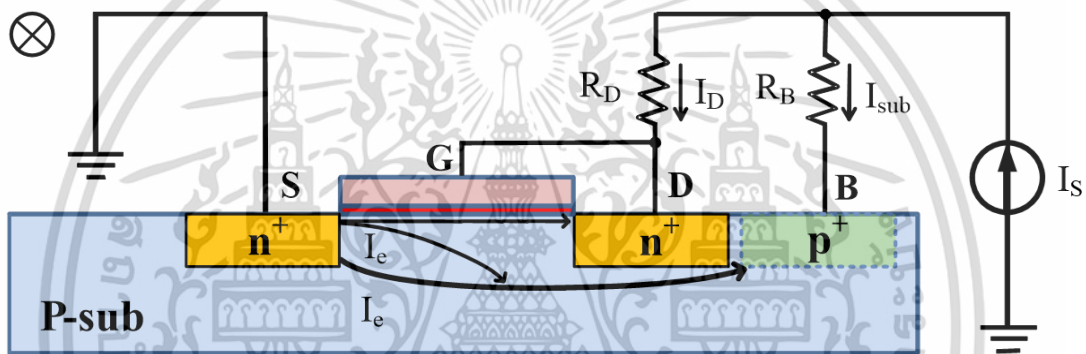
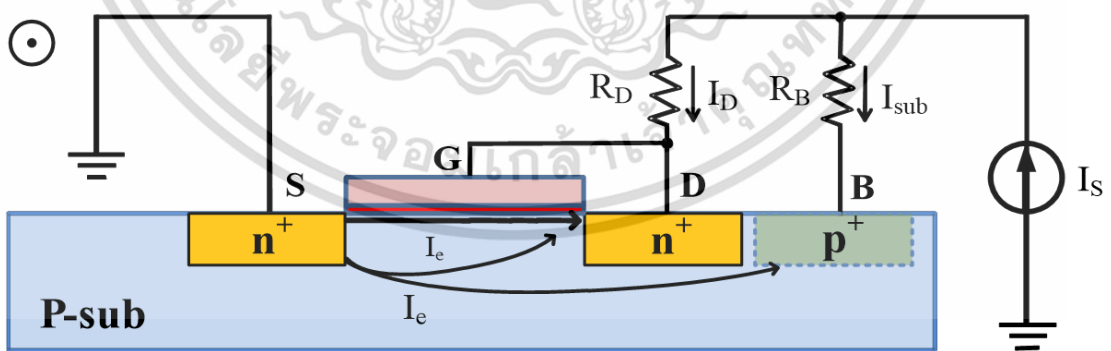
รูปที่ 4.9(ข) เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง y ทำให้แรงของลอเรนซ์ไปในทิศทาง $-z$ กระแสอิเล็กทรอนิกส์ของกระแสเดรน ถูกบังคับโดยแรงของลอเรนซ์ให้ไหลลงไปในฐานรองจำนวนมาก กระแสอิเล็กทรอนิกส์ของเดรน เบี่ยงเบนไปยังฐานรอง ทำให้ค่ากระแสอิเล็กทรอนิกส์ของฐานรองเพิ่มขึ้น $\Delta I/2$ ในขณะเดียวกันกระแสอิเล็กทรอนิกส์ของเดรนจะลดลง $\Delta I/2$ กระแสส่วนต่างทั้งหมดคือ ΔI การกระแสไบแอสที่เพิ่มขึ้น (กระแสเดรนและกระแสฐานรอง) ทำให้กระแสเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นและ ΔI ก็เพิ่มขึ้นด้วย

รูปที่ 4.9(ค) เมื่อให้สนามแม่เหล็กในทิศทาง y ทำให้แรงของลอเรนซ์ไปในทิศทาง $-z$ กระแสอิเล็กทรอนิกส์ของกระแส Drain ถูกบังคับโดยแรงของลอเรนซ์ให้ไหลไปที่ผิวด้านบน ทำให้ค่ากระแสอิเล็กทรอนิกส์ของ Substrate ลดลง $\Delta I/2$ ในขณะเดียวกันกระแสอิเล็กทรอนิกส์ของ Drain จะเพิ่มขึ้น $\Delta I/2$ กระแสส่วนต่างทั้งหมดคือ ΔI การกระแสไบแอสที่เพิ่มขึ้น (กระแสเดรนและกระแสฐานรอง) ทำให้กระแสเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นและ ΔI ก็เพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้น การประยุกต์ใช้มอสเฟต สำหรับการตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยโครงสร้างมอสเฟตแบบปกติ ซึ่งประกอบด้วยขั้วเดรน เกท ชอร์ส และบอดี อยู่ในด้านเดียวกันของเกตทิศทางกระแสเดียวกัน และชอร์ส จะอยู่อีกด้านหนึ่งสำหรับการฉีดพาหะอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์นี้ทำงานในโหมดกระแส และใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่ของขั้วชอร์ส สำหรับกระแสเดรนและกระแสฐานรอง โดยที่กระแสเดรน มาจาก Channel ของมอสเฟต และกระแสฐานรองมาจากรอยต่อ P-N ระหว่างฐานรอง และ ชอร์ส ในทิศทางไปข้างหน้า กลไกนี้ทำให้เกิดแรงของลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็ก แนวนอนเบี่ยงเบนกระแสระหว่างเดรนและกระแสฐานรอง ซึ่งทำให้เกิดความต่างของกระแส ΔI ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและทิศทาง โดยค่าความไวขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไบแอส



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก

(ข) สนามแม่เหล็กในทิศทาง Y (ค) สนามแม่เหล็กในทิศทาง $-Y$

รูปที่ 4.9 กลไกการทำงานของอุปกรณ์ของ N-MOSFET สำหรับการตรวจจับแม่เหล็กในแนวนอน

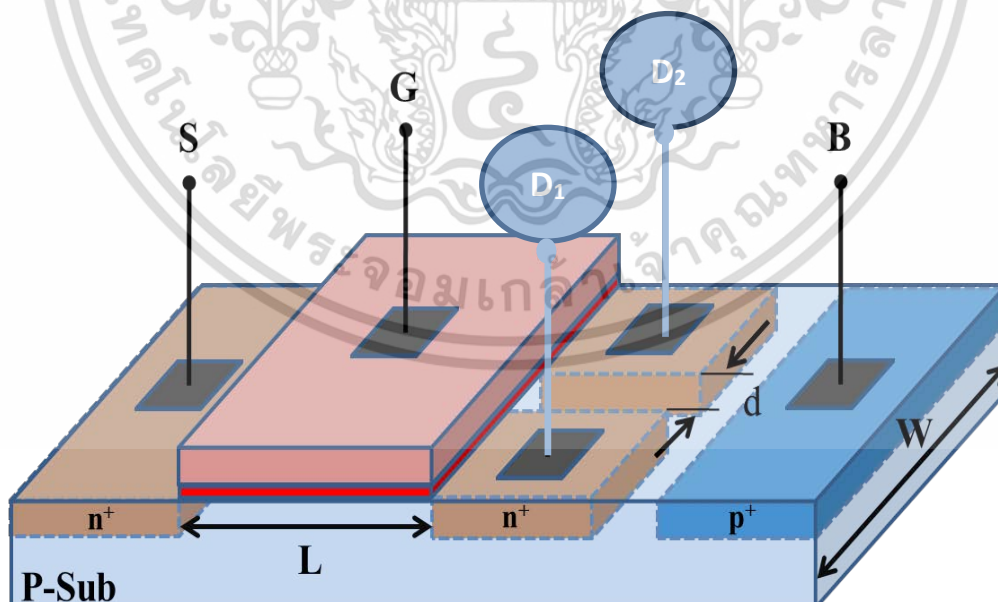
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอนสำหรับ โครงสร้างอุปกรณ์แมกเฟตแบบแยกขั้วเดรน (Split-Drain MAGFET)

การศึกษานี้ ได้เสนอวิธีการจำลองแบบโครงสร้างมอสเฟต เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับแม่เหล็กหรือแมกเฟต โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วมาประยุกต์ใช้งาน แรงของลอเรนซ์เป็นกลไกหลักในการตรวจจับสนามแม่เหล็กแนวตั้งและแนวนอน โครงสร้างแมกเฟตแบบแยกขั้วเดรนนี้ จะศึกษาการจำลองแบบ ด้วย TCAD Sentaurus ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

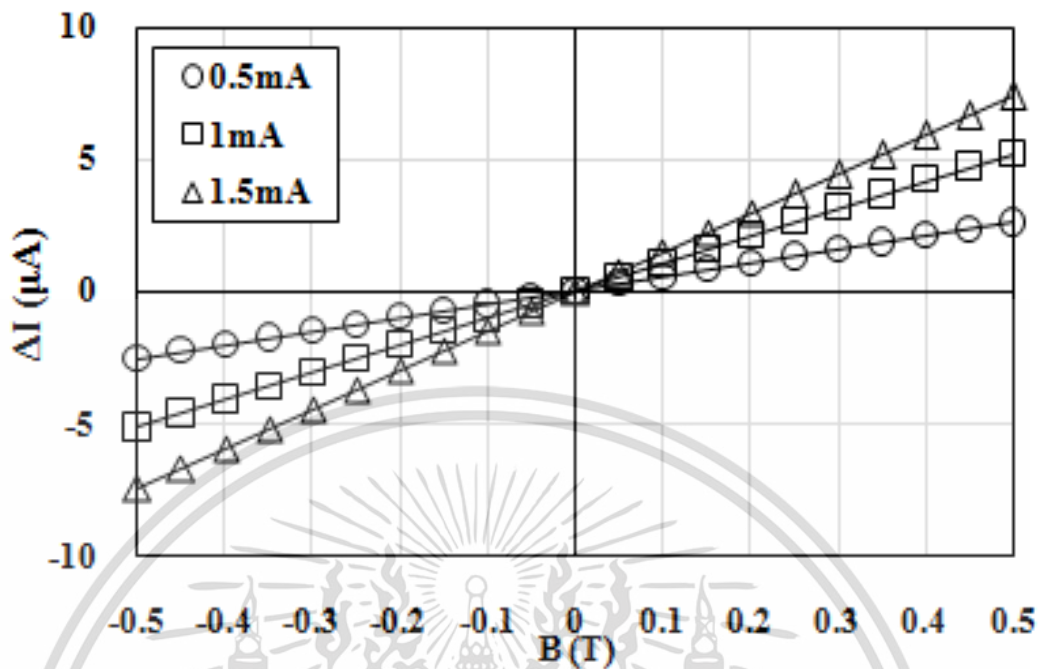
4.2.1 MAGFET แบบแยกขั้ว Drain

แมกเฟตแบบแยกขั้วเดรน เป็นโครงสร้างมอสเฟต ที่เดรนถูกแยกเป็นขั้ว D_1 และ D_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 อุปกรณ์ทำงานเหมือนอุปกรณ์มอสเฟตแบบปกติ โดยการไบอัสที่ขั้ว Gate-Substrate และกระแสเดรนมาจากแหล่งจ่ายแรงดันของ Drain-Source สนามแม่เหล็กแนวตั้งทำให้เกิดแรงของ Lorentz ที่ตั้งฉากทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระแส $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ ระหว่างขั้วเดรนทั้งสอง กระแสคงที่ของซอร์ส จะถูกแบ่งออกเป็นกระแสรวม I_D ทั้งหมด เพื่อหลีกเลี่ยงผลการมอดูเลตจากสนามแม่เหล็ก รูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของการตอบสนองแม่เหล็ก ค่าความไวสัมพันธ์ถูกกำหนดให้เป็นความแตกต่างของ I_D ต่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กต่อการไบอัสกระแส



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของแมกเฟตแบบแยกขั้วเดรน

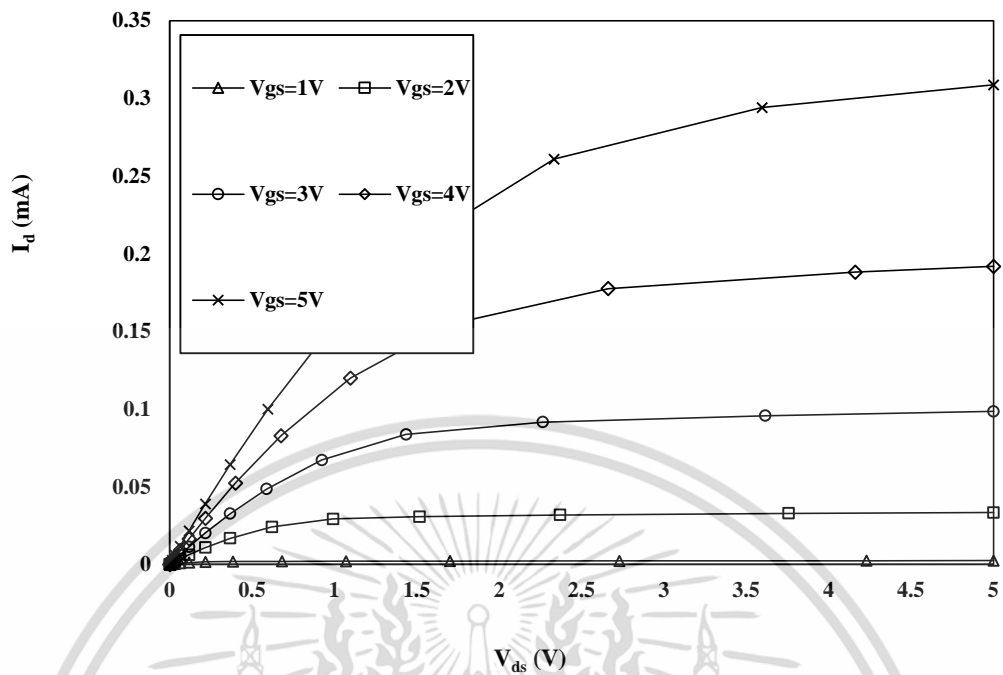
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



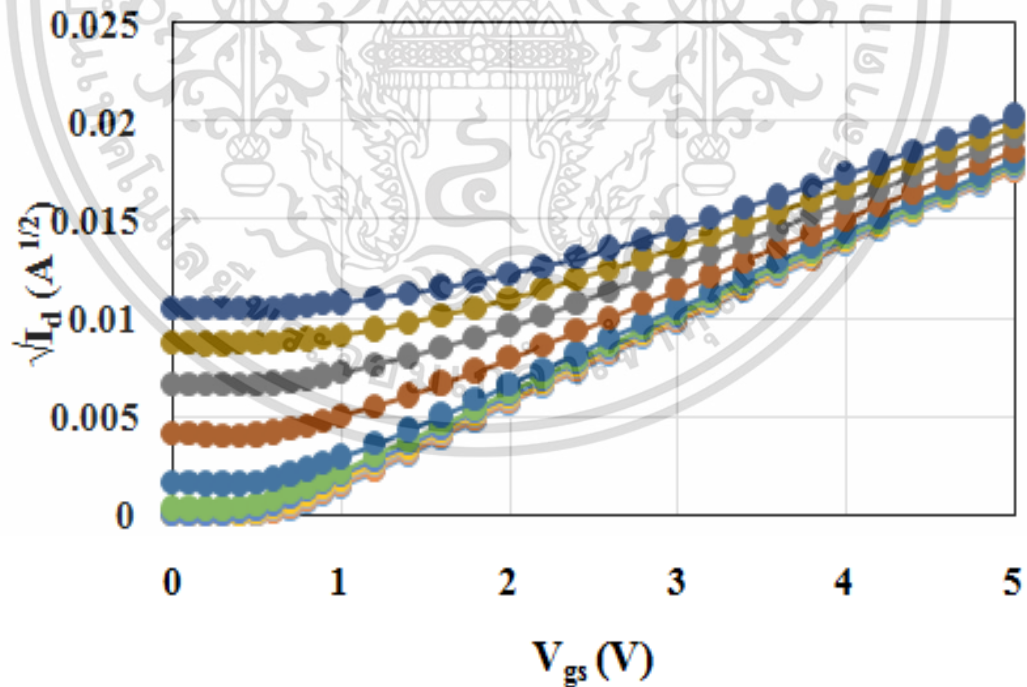
รูปที่ 4.11 กราฟคุณลักษณะ ΔI_D - B ของแมกเฟตแบบแยกขั้วเดรน

โดยที่ B คือความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก กราฟคุณลักษณะ ΔI_D - B มักจะแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นตัวอย่างของอุปกรณ์จริง แต่มีงานวิจัยอื่น ๆ อีกมากมายที่ให้ลักษณะเชิงเส้นเช่นนี้ แม้ว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นจะอยู่ในทฤษฎีพื้นฐานที่พัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดปัจจัยที่ไม่ใช่เชิงเส้นในอุปกรณ์ที่ใช้งานได้จริง สามารถทำงานได้ทั้งในโหมดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว มีการนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่นระบบวงจรหรืออุปกรณ์ต่างๆ

โครงสร้างอุปกรณ์มอสเฟตที่ได้ทำการศึกษาไว้ แสดงในรูปที่ 4.10 ความยาว L และความกว้าง W เท่ากับ $20 \mu\text{m}$ คุณลักษณะของกราฟ C-V จากการจำลองแบบ แสดงในรูปที่ 4.12 แสดงถึงการทำงานในโหมด Enhancement ของ n-channel ทั่วไป แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มและผลกระทบของการไบอัสแรงดันที่ฐานรอง แสดงในรูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มเทียบกับแรงดันฐานรอง น้อยกว่า 0.5 โวลต์ สำหรับการทำงานของโครงสร้างมอสเฟตที่ใช้เป็นแมกเฟต และทิศทางของกระแสของแหล่งจ่ายจะต้องไปในทิศทางไปข้างหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เป็นค่าระหว่างแรงดันขีดเริ่มและแรงดันฐานรอง และแรงดันไปข้างหน้าที่ลดลงในรอยต่อ p-n ของ V_{bs} และ V_{TH} จะลดลงจนกระทั่งแรงดันไบอัสเป็น 0.6 โวลต์และกลายเป็นค่าลบเมื่อแรงดันไบอัสมากกว่า 0.6 โวลต์ แสดงให้เห็นว่ามอสเฟตเปลี่ยนจากโหมด Enhancement เป็น Depletion

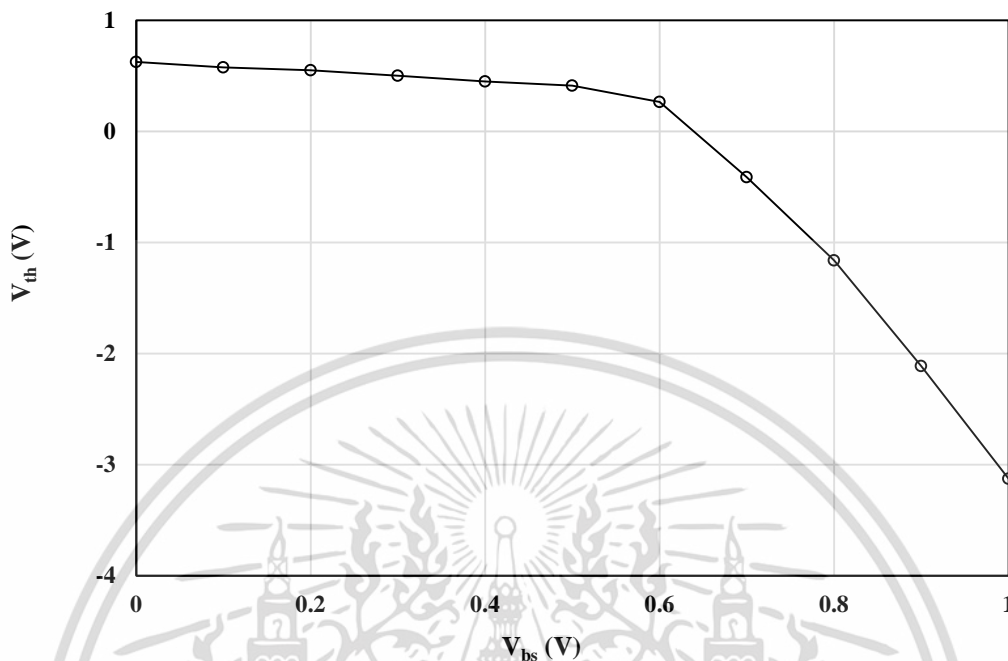


รูปที่ 4.12 กราฟคุณลักษณะ I-V ของ N-MOSFET ที่ใช้เป็น MAGFET



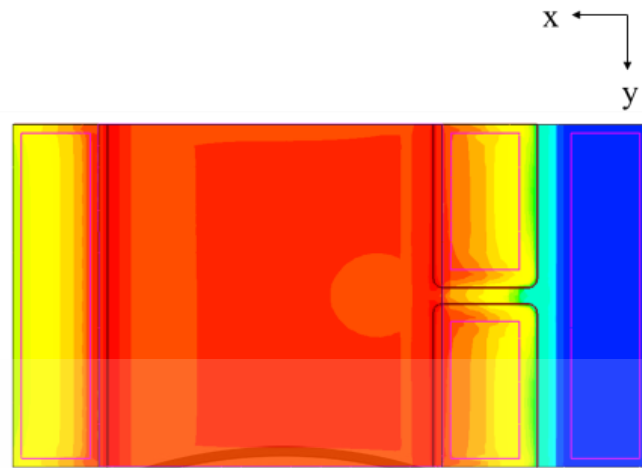
รูปที่ 4.13 ผลกระทบของการไบอัสแรงดันที่ฐานรองของ N-MOSFET ที่ใช้เป็นแมกเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

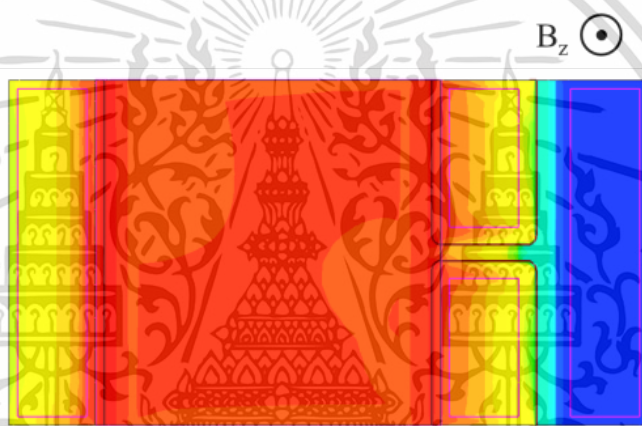


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของค่า V_{th} และ V_{bs}

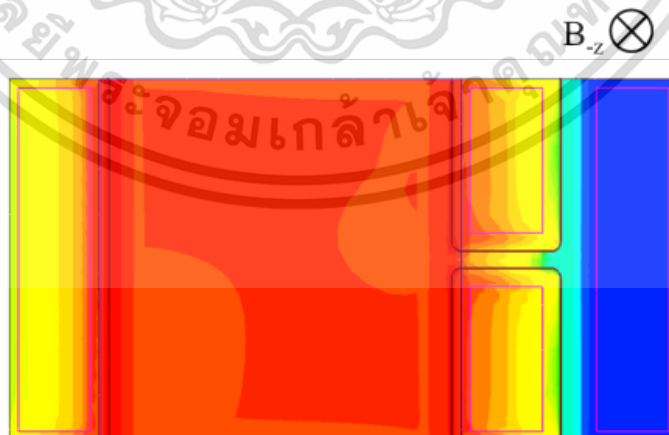
การจำลองแบบการตอบสนองของแม่เหล็กถูกทดสอบผ่านโครงสร้างแมกเฟต โครงสร้างของอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 4.15 อุปกรณ์มีคุณสมบัติการทำงานที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างมอสเฟตแบบปกติในโหมด Enhancement โดยมีค่ากระแสตรง ทั้งสองเท่ากัน สนามแม่เหล็กที่ใช้ในแนวตั้งฉากกำหนดเป็นทิศทางแกน z ซึ่งสนามแม่เหล็กจากพื้นผิวถึงพื้นผิวและ $-z$ เป็นทิศทางตรงกันข้าม การกระจายความหนาแน่นกระแสบนพื้นผิวแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงการเบี่ยงเบนของกระแสโดยแรงของลอเรนซ์ รูปที่ 4.15 (ก) แสดงความหนาแน่นของกระแส Drain ที่สมดุลเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก รูปที่ 4.15 (ข) และ (ค) เป็นกรณีของสนามแม่เหล็กที่ใช้ใน z และ $-z$ ตามลำดับ ความหนาแน่นกระแสไม่สมมาตรและโค้งงอไปตามทิศทางของแรงลอเรนซ์ ผลลัพธ์ของความแตกต่างของกระแสตรง และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B แสดงในรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นเหมือนในอุปกรณ์จริงดังแสดงในรูปที่ 4.16 ความไวจะเท่ากันทั้งสองทิศทางและขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นการพิสูจน์แบบจำลองที่ใช้งานเบื้องต้น เพียงพอสำหรับการศึกษาคำอธิบายการตรวจจับสนามแม่เหล็ก



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก

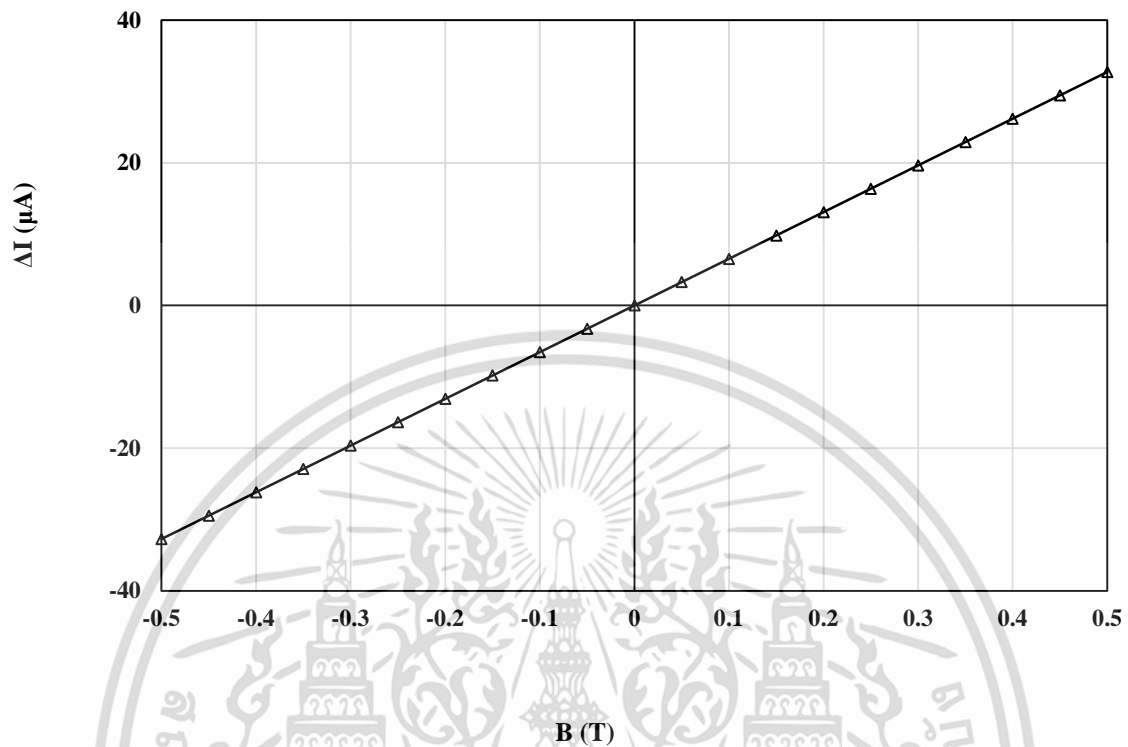


(ข) สนามแม่เหล็กในทิศทาง z



(ค) สนามแม่เหล็กในทิศทาง -z

รูปที่ 4.15 การจำลองแบบการกระจายตัวของกระแส เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง

รูปที่ 4.17 คือการกระจายตัวของความหนาแน่นกระแสของมอสเฟตที่ถูกไบอัส แสดงกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดจากขั้วซอร์สไปยังเดรนและฐานรอง กระแสทั้งสองถูกปรับสมดุลโดย R_D และ R_{sub} ได้ค่ากระแส 0.5, 1 และ 1.5 mA รูปที่ 4.17 (ก) แสดงความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนเมื่อไม่มีการให้ค่าสนามแม่เหล็ก จะเกิดความหนาแน่นของกระแสบริเวณช่องทางเดินกระแสและในฐานรองจำนวนมากจากรอยต่อ p-n เหมือนกัน รูปที่ 4.17 (ข) และ (ค) แสดงความหนาแน่นกระแสของกรณีของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในทิศทาง y และ $-y$ เมื่อแม่เหล็กถูกนำไปใช้ในทิศทาง y ความหนาแน่นกระแสของกระแสฐานรอง (I_{sub}) จะน้อยกว่ากระแสเดรน (I_D) สามารถสังเกตได้ว่าบริเวณสี่เหลี่ยมจำนวนมากมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กในรูปที่ 4.17 (a) ในทางกลับกัน กระแสของช่องทางเดินกระแสเดรนจะมากกว่ากระแสฐานรอง เมื่อสนามแม่เหล็กไปในทิศทาง $-y$ เป็นที่สังเกตว่าบริเวณสี่เหลี่ยมของฐานรอง น้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กในรูปที่ 4.17 (ก)

กราฟของความแตกต่างของกระแสระหว่างกระแสเดรนและกระแสฐานรอง ($\Delta I = I_D - I_{sub}$) เทียบกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตามช่วงการวัด ความไวสัมพัทธ์จากสมการ คือ 0.01 T^{-1} ความไวคงที่ในแต่ละกระแส แสดงการเบี่ยงเบนสมมาตรระหว่างกระแสช่องทางที่เหนี่ยวนำโดยผลกระทบของสนามแม่เหล็กและกระแสของรอยต่อ p-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก

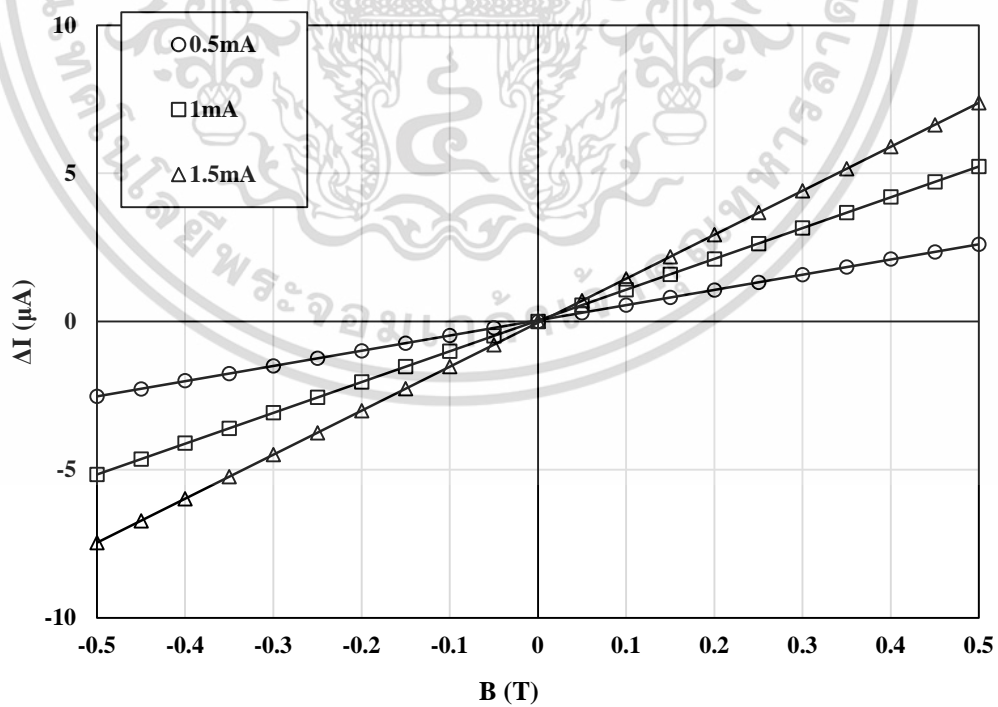


(ข) สนามแม่เหล็กในทิศทาง Y



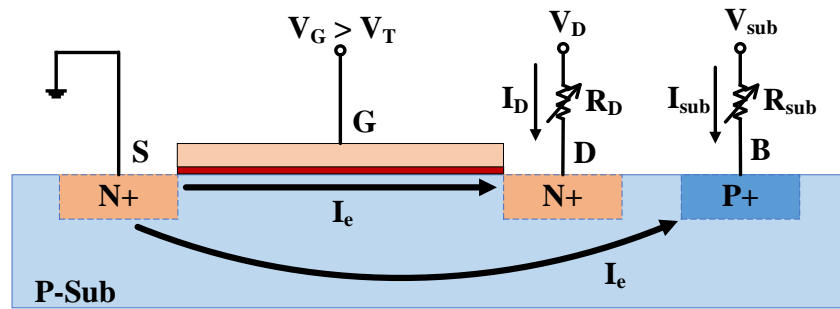
(ค) สนามแม่เหล็กในทิศทาง -Y

รูปที่ 4.17 การจำลองแบบของความหนาแน่นกระแสเมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวนอน

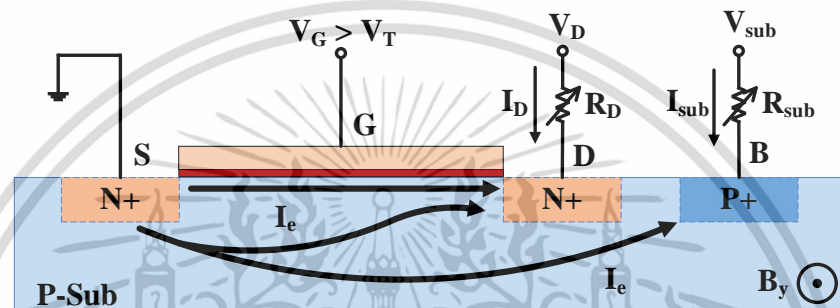
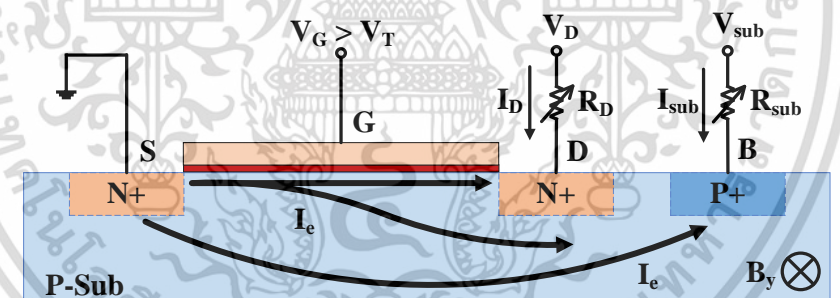


รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการตอบสนองสนามแม่เหล็กในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไม่มีสนามแม่เหล็ก

(ข) สนามแม่เหล็กในทิศทาง y (ค) สนามแม่เหล็กในทิศทาง $-y$

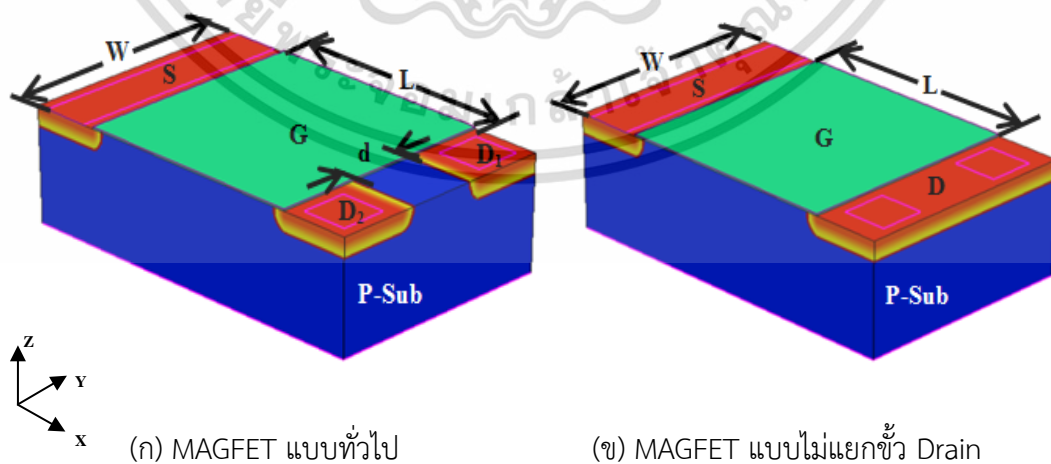
รูปที่ 4.19 กลไกการตรวจจับสนามแม่เหล็กในแวนอน

จากผลการจำลองแบบจะอธิบายได้ด้วยแผนภาพกลไกที่แสดงในรูปที่ 4.19 แสดงกระแสอิเล็กตรอนจากซอร์ส ไปยังเดรน โดยช่องทางเดินกระแส และจากซอร์ส ไปยังฐานรอง โดยการไบอัสวงจรรูปที่ 4.19 (ก) เป็นกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กที่กระแสสองกระแสเท่ากัน รูปที่ 4.19 (ข) เป็นกรณีของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในทิศทาง y แรงของลอเรนซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนไปยังพื้นผิว ซึ่งทำให้กระแสของเดรน มีค่ามากกว่ากระแสฐานรอง รูปที่ 4.19 (ค) เป็นกรณีของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในทิศทาง $-y$ แรงของลอเรนซ์จะกระทำต่ออิเล็กตรอนที่อยู่ด้านล่าง ดังนั้นกระแสฐานรอง จึงมากกว่ากระแสเดรน กลไกการเบี่ยงเบนของกระแส สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระโดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการจำลองแบบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแนวตั้งสำหรับโครงสร้างอุปกรณ์ แมกเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน(Non-Split Drain MAGFET)

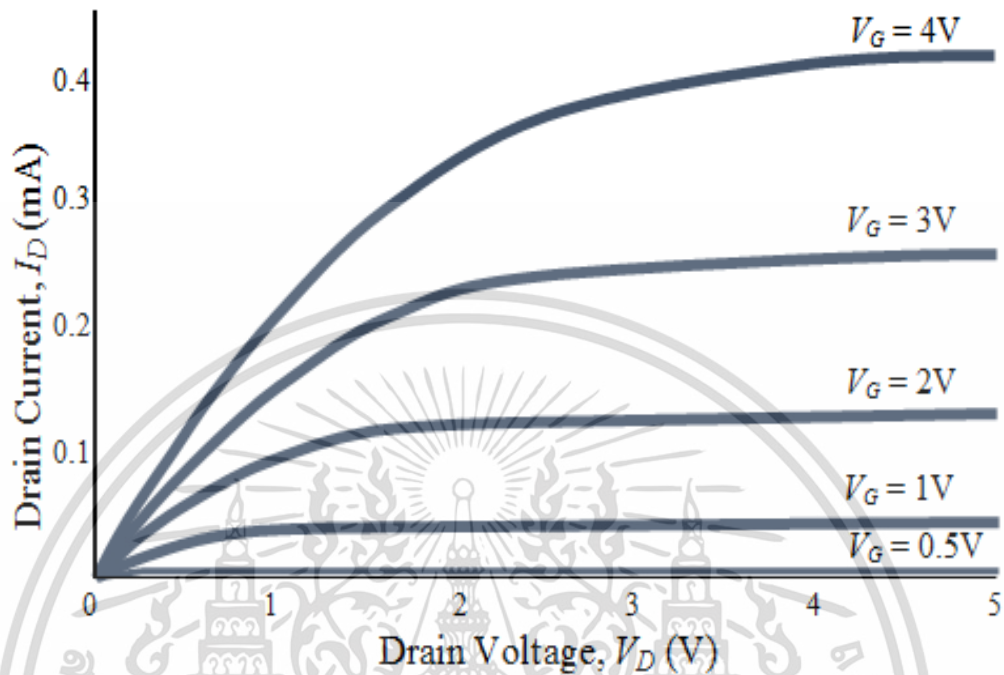
งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างใหม่สำหรับนำไปประยุกต์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีความไวสูง โดยการออกแบบโครงสร้างของแมกเฟต จะไม่มีช่องว่างระหว่างเดรน หรือเรียกว่า Non Split-Drain MAGFET ยังคงมีหน้าสัมผัสสองหน้าในเดรนเดียว เพื่อใช้วัดค่าเอาต์พุตกระแสที่แตกต่างกันตามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก โดยทั่วไป ความไวที่ดีนั้น จะออกแบบให้ช่องว่างระหว่างขั้วเดรน มีระยะห่างน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีใหม่ แต่การออกแบบที่ระบายแบบไม่แยกขั้วเดรน จะไม่ได้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี เพราะไม่มีช่องว่างและออกแบบได้ง่าย อีกทั้งได้ค่าความไวสูงสุดของอุปกรณ์ประเภทเดียวกัน

โครงสร้างอุปกรณ์ของแมกเฟตทั่วไปและแมกเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน แสดงในรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) ตามลำดับ แมกเฟตทั่วไปคือ มอสเฟตที่มีเดรนแยกสองส่วนเป็น D_1 และ D_2 โดยมีช่องว่าง (d) ระหว่างกัน ส่วน Non Split-Drain MAGFET คือ แมกเฟตที่ไม่มีช่องว่างของเดรน มีค่าความยาว (L) และความกว้าง (W) แสดงในรูปที่ 4.20 ช่องว่างของเดรน จะออกแบบให้แตกต่างกันที่ 3, 2, 1 และ 0 μm อัตราส่วน (L/W) ที่มีระยะห่างต่ำสุด 1 μm จะแตกต่างกันที่ 0.2, 0.6 และ 1 ฐานรองเป็นซิลิคอนชนิด n ที่มีความเข้มข้น 10^{15} cm^{-3} ความเข้มข้นของสารเจือชนิด n ใน ซอร์สและเดรนคือ 10^{18} cm^{-3} และค่าความหนาของชั้น SiO_2 มีความหนา 17 nm. มีหน้าสัมผัส 2 ขั้ว ใน 2 เดรน สำหรับแมกเฟตทั่วไปและแมกเฟตที่มีช่องว่างเป็นศูนย์ในรูปที่ 4.20 (ข) จะมีหน้าสัมผัสสองขั้วในเดรนเดียวกัน



รูปที่ 4.20 โครงสร้างอุปกรณ์ MAGFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

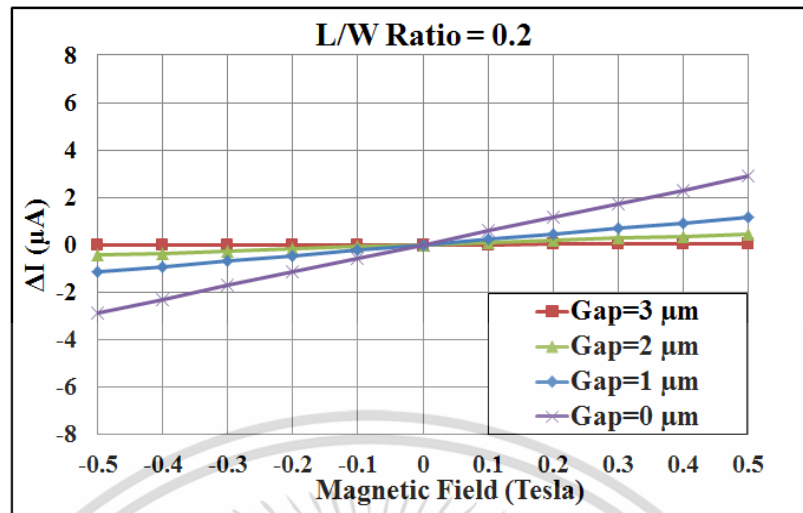
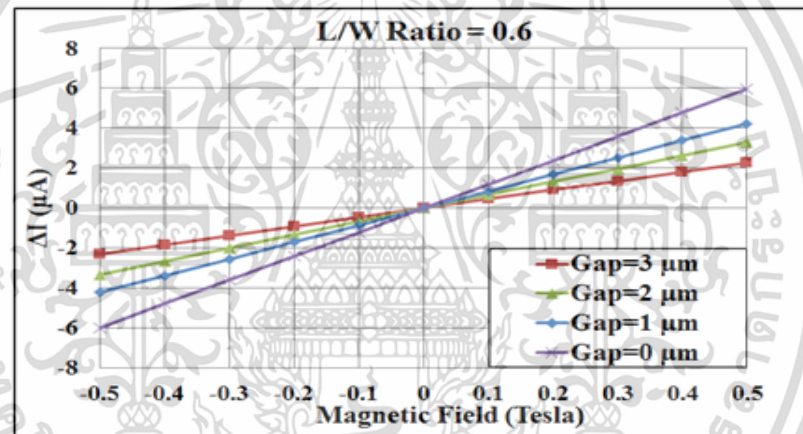
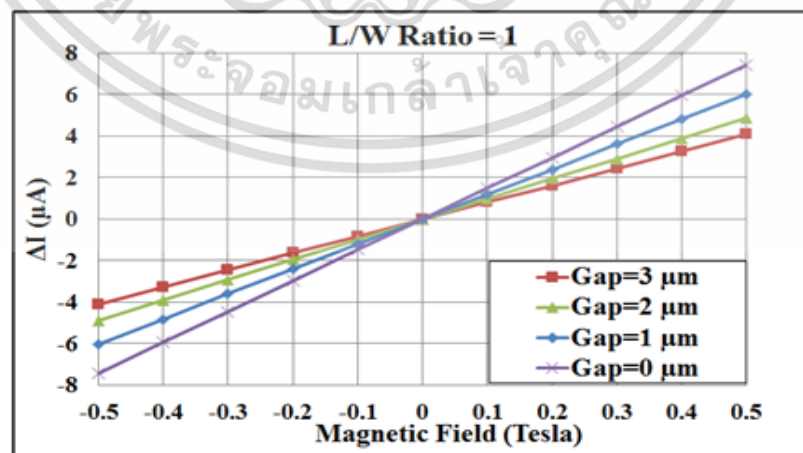


รูปที่ 4.21 ลักษณะแรงดันกระแสของแมกเฟต

การวัดคุณลักษณะกระแส - แรงดันของอุปกรณ์ในรูปที่ 4.21 เพื่อยืนยันว่าทำงานเป็น มอสเฟตปกติ ขั้วเดรนสองส่วนจะถูกเชื่อมต่อเป็นเดรนเดี่ยวระหว่างกรวัด คุณลักษณะของกระแส - แรงดันของอุปกรณ์ $L/W = 1$ แสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะที่ดี โดยมีแรงดันไฟฟ้า V_T ประมาณ 0.5 V กระแสอิ่มตัวตามฟังก์ชันการทำงาน $(V_G - V_T)^2$ ซึ่งเป็นไปตามหลักงานทำงานของมอสเฟตช่องทางยาวปกติ

แหล่งจ่ายกระแสคงที่จะดึงกระแสจากขั้วซอร์สไปยังฐานรอง การไบอัสค่ากระแสจะถูกควบคุมโดยแหล่งจ่ายกระแสคงที่เพื่อหลีกเลี่ยงกระแสที่แตกต่างของเอาต์พุตจากการมอดูเลตสนามแม่เหล็กโดยปกติเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก I_{D1} และ I_{D2} จะเท่ากัน ซึ่งอาจจะมีการปรับค่าชดเชยบางส่วนจากกระบวนการสร้างกระแสรวมทั้งหมดของ I_D คือผลรวมของค่ากระแส $I_{D1} + I_{D2}$ ซึ่งเป็นไปตามแหล่งจ่ายกระแสคงที่ การตอบสนองของเอาต์พุตคือความแตกต่างของค่ากระแส ($\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$) ที่เกิดจากแรงของลอเรนซ์ตามขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กแนวตั้ง รูปที่ 4.22 (ก), (ข) และ (ค) แสดงการตอบสนองของอัตราส่วนอุปกรณ์ 0.2, 0.6 และ 1 ตามลำดับ ช่องว่างจะแตกต่างกันที่ 3, 2, 1 และ 0 μm ในแต่ละอุปกรณ์ คุณลักษณะทั้งหมด ($\Delta I - B$) จะเป็นกราฟเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) $L/W = 0.2$ (ข) $L/W = 0.6$ (ค) $L/W = 1$

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างของกระแสและผลตอบสนองแม่เหล็ก

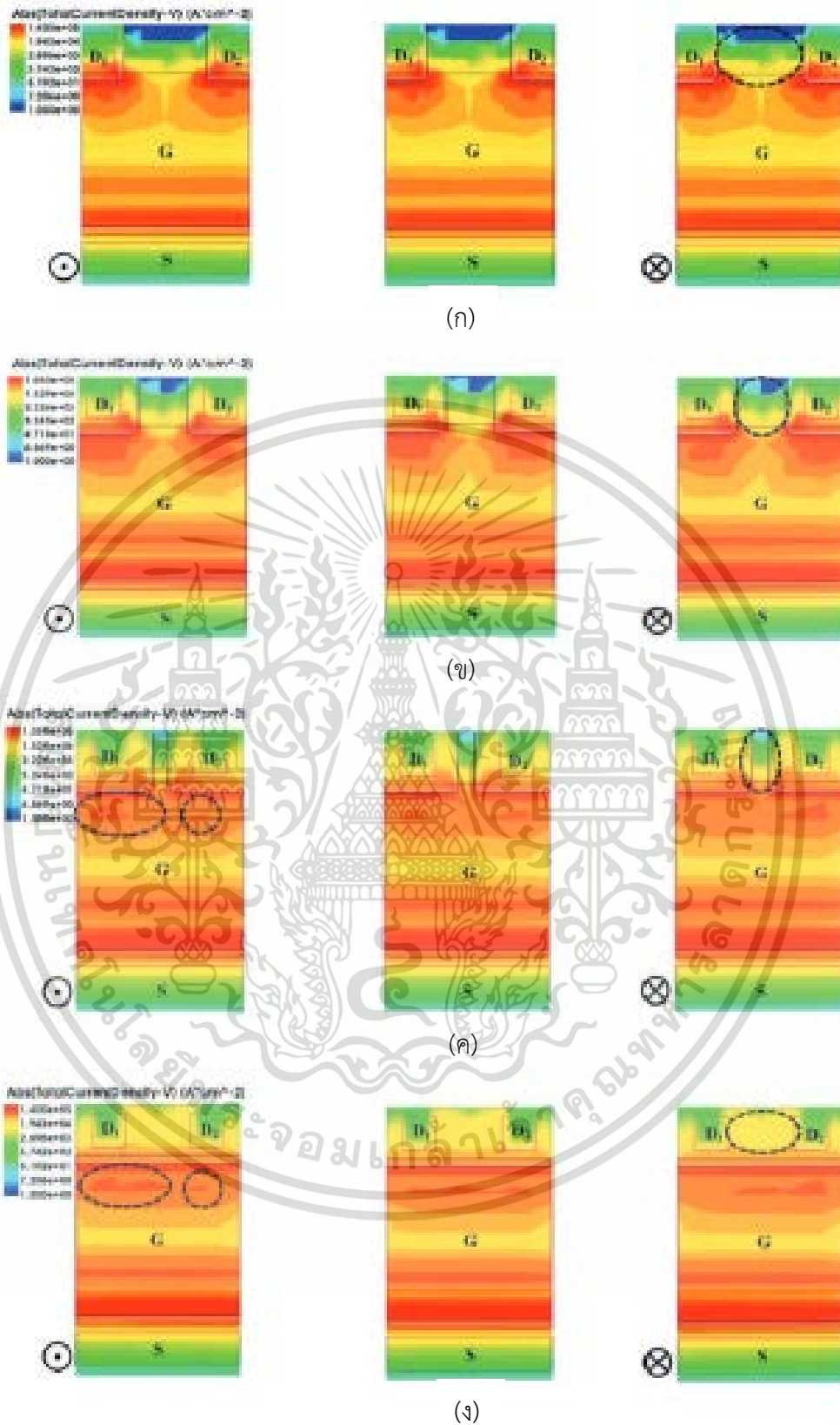
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟ $\Delta I - B$ ที่มีการตอบสนองแม่เหล็กของแมกเฟต โดยให้สนามแม่เหล็กมีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 T ในแนวตั้งที่ตั้งฉากกับระนาบของอุปกรณ์ ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของกระแส ΔI และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก B มีลักษณะเป็นเชิงเส้น แหล่งจ่ายแรงดัน V_D และ V_G คือ 1 V และแหล่งจ่ายกระแสคงที่คือ 0.25 mA ค่าความไวสัมพัทธ์ ($S_r = \Delta I / \Delta B \cdot I$) ของ $L / W = 0.2$ แสดงในรูปที่ 4.22 (ก) โดยมีระยะช่องว่างที่ $3, 2, 1$ และ 0 μm คือ $0.0003, 0.0036, 0.0092$ และ 0.0231 T^{-1} ตามลำดับ การตอบสนองแม่เหล็กของอัตราส่วน $L/W = 0.6$ แสดงในรูปที่ 4.22 (ข) ในเงื่อนไขเดียวกัน ความไวสัมพัทธ์ S_r คือ $0.0182, 0.0264, 0.0338$ และ 0.0479 T^{-1} ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันการตอบสนองทางแม่เหล็กของอัตราส่วน $L/W = 1$ แสดงในรูปที่ 4.22 (ค) และความไว S_r คือ $0.0326, 0.0389, 0.0481$ และ 0.0595 T^{-1} ตามลำดับ จะเห็นว่าความไวที่สูงขึ้นนั้นช่องว่างก็ยิ่งน้อยลง ทั้งหมดนี้ช่องว่างเป็นศูนย์หรือโครงสร้าง Drain แบบไม่แยกขั้ว ให้ความไวสูงสุด ความไวจะเพิ่มขึ้นตามความยาวช่องที่ยาวขึ้น L หรือ L/W ที่ใหญ่ขึ้น ความไวสัมพัทธ์ S_r ของอัตราส่วนทั้งหมดที่กระแสไบแอส 0.25 mA สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความไวสัมพัทธ์ ที่ 0.25 mA ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.5 T

L/W Ratio	Gap (μm)			
	3	2	1	0
0.2	0.0003	0.0036	0.0092	0.0231
0.6	0.0182	0.0264	0.0338	0.0479
1	0.0326	0.0389	0.0481	0.0595

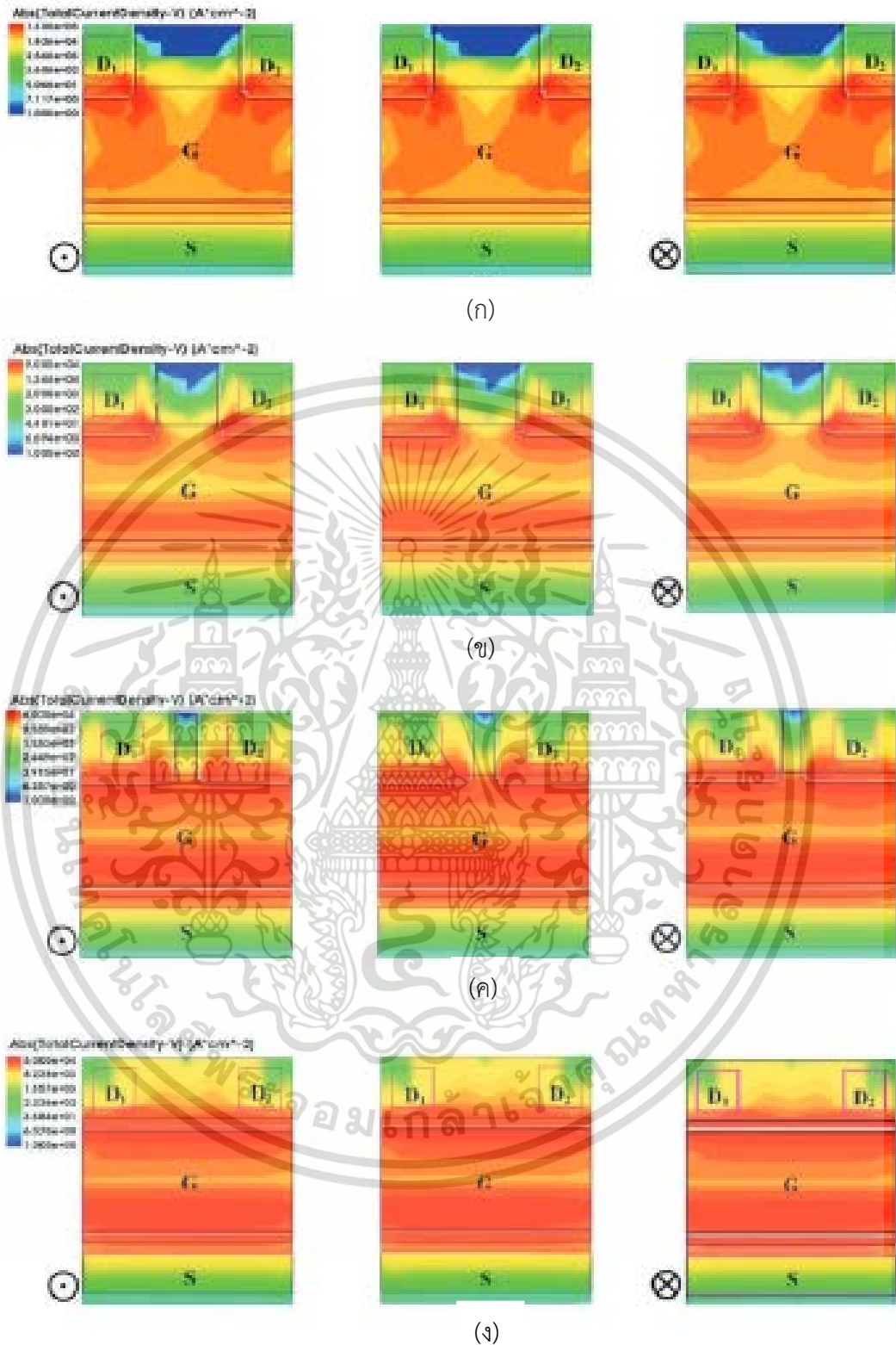
การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกเฟต ของอัตราส่วนอุปกรณ์ $L/W = 1$ ที่สนามแม่เหล็ก 0.5 T ในทิศทาง z และ $-z$ แสดงในรูปที่ 4.23 ในกรณีที่ไม่มีความหนาแน่นกระแสอยู่ตรงกลางของรูปที่ 4.23 ความหนาแน่นกระแส ไกล่กับหน้าสัมผัสเดรน มีความสม่ำเสมอและสมมาตรในทุกช่องว่าง ความหนาแน่นกระแสถูกอัดแน่นใกล้กับการสัมผัสที่เดรนทั้งสองและที่บริเวณช่องใกล้เดรน เมื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กแนวตั้ง ในทิศทาง z แรงของลอเรนซ์จะถูกเหนี่ยวนำในทิศทางไปทางซ้ายมือทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่ขั้วเดรน ด้านซ้าย D_1 มากกว่าขั้วเดรน ด้านขวา D_2 ในกรณีนี้กระแสผลต่างเอาต์พุต ΔI เป็นบวก สามารถสังเกตได้ชัดเจนที่ช่องว่างเล็ก ๆ ซึ่งมีขนาด 1 และ 0 μm ดังที่แสดงในวงกลมดังตัวอย่างทางด้านซ้ายของรูปที่ 4.23 (ค) และ (ง) เมื่อสนามแม่เหล็กถูกนำไปใช้ในทิศทาง $-z$ แรงของลอเรนซ์จะถูกเหนี่ยวนำในทิศทางไปทางด้านขวาของช่องทำให้ความหนาแน่นของกระแสบนเดรน ด้านขวา D_2 มากกว่าด้านซ้าย D_1 ในกรณีนี้กระแสเอาต์พุต ΔI เป็นลบ การกระจายความหนาแน่นกระแสรหว่างหน้าสัมผัสในเดรนจะสม่ำเสมอสำหรับเดรนแบบไม่แยกขั้ว สามารถสังเกตความหนาแน่นพื้นที่ในวงกลมระหว่างหน้าสัมผัสทางด้านขวาของรูปที่ 4.23 (ง) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกเฟต ที่ $L/W = 1$ และ $B_{z,z} = 0.5 \text{ T}$

(ก) Gap = $3 \mu\text{m}$, (ข) Gap = $2 \mu\text{m}$, (ค) Gap = $1 \mu\text{m}$ และ (ง) Gap = $0 \mu\text{m}$.

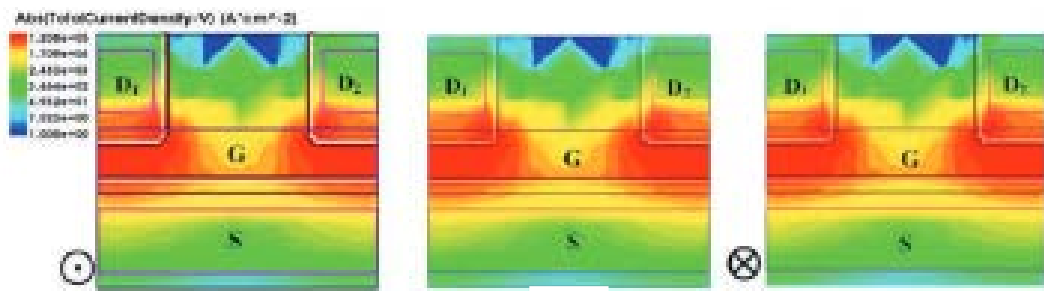
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



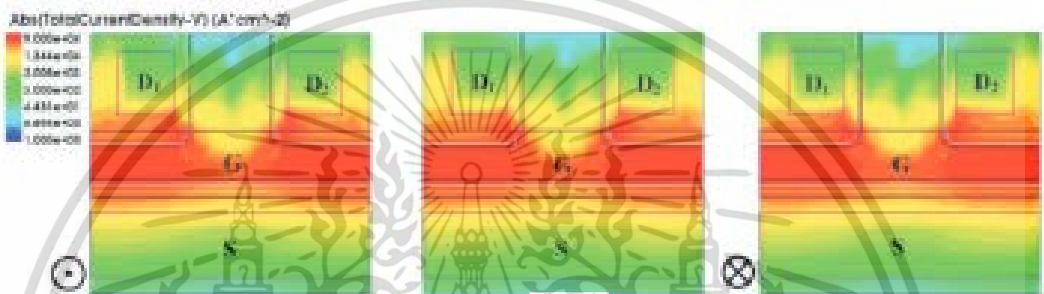
รูปที่ 4.24 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกเฟต ที่ $L/W = 0.6$ และ $B_{z,z} = 0.5 T$

(ก) Gap = 3 μm , (ข) Gap = 2 μm , (ค) Gap = 1 μm และ (ง) Gap = 0 μm .

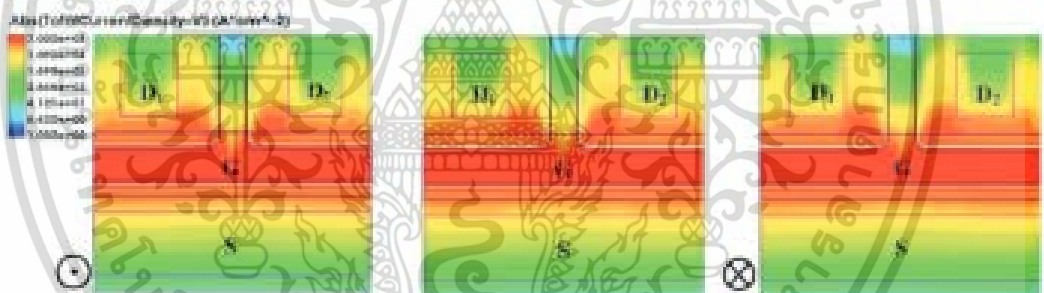
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



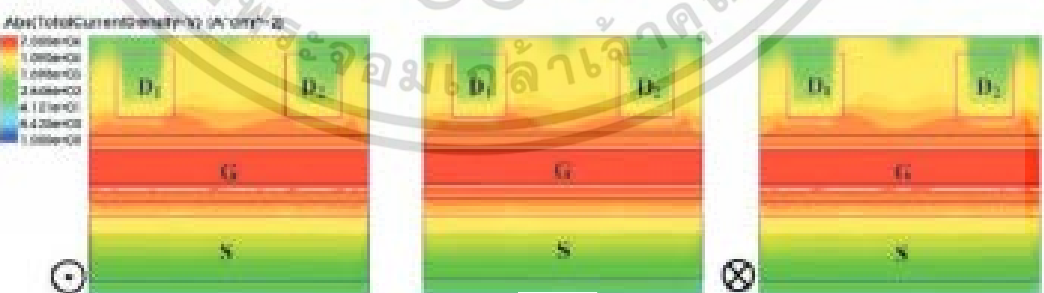
(ก)



(ข)



(ค)



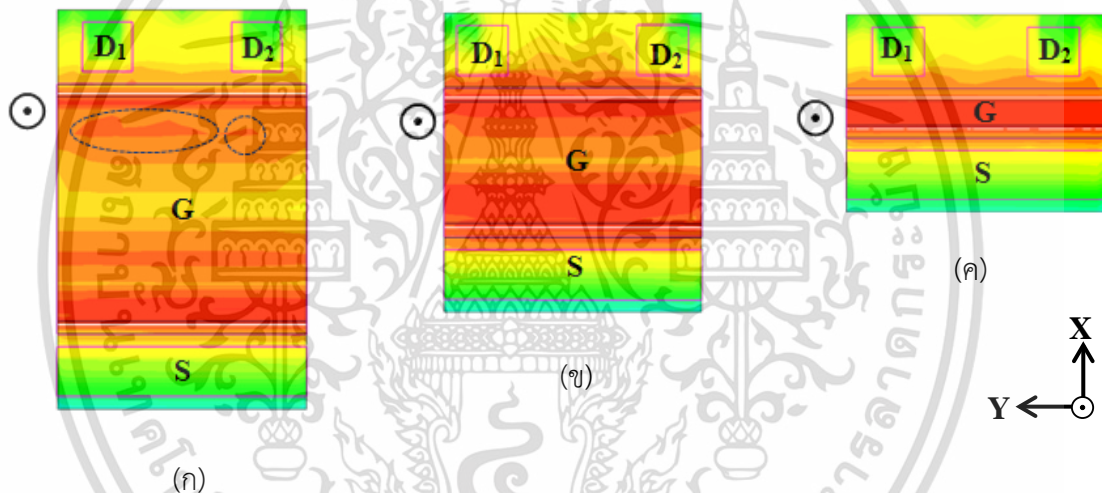
(ง)

รูปที่ 4.25 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกเฟต ที่ $L/W = 0.2$ และ $B_{z,z} = 0.5$ T

(ก) Gap = 3 μm , (ข) Gap = 2 μm , (ค) Gap = 1 μm และ (ง) Gap = 0 μm .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของเดรนแยก ในรูปที่ 4.23 (ก) - (ค) การกระจายความหนาแน่นกระแสระหว่างเดรนทั้งสองจะไม่สม่ำเสมอโดยมีความหนาแน่นกระแสต่ำกว่าเมื่อระยะทางอยู่ไกลจากช่องตั้งแสดงในวงกลมระหว่างหน้าสัมผัส ดังตัวอย่างทางด้านขวาของรูปที่ 4.23 (ก), (ข) และ (ค) การกระจายความหนาแน่นกระแสไม่สม่ำเสมอยิ่งหมายถึงการเบี่ยงเบนของกระแสที่ไม่ต่อเนื่องสำหรับการกระจายความหนาแน่นกระแสของ $L/W = 0.6$ และ 0.2 แสดงในรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.23 ตามลำดับ แสดงผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกับในกรณีของ $L/W = 1$ แต่แทบจะไม่สังเกตเห็นความแตกต่างในปัจจุบันตามที่อธิบายไว้ในรูปที่ 4.23 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความยาวช่องหรืออัตราส่วน L/W ลดลง ทำให้ความยาวของช่องสัญญาณยาวขึ้นความไวสูงขึ้น ในรูปที่ 4.24 อาจสังเกตความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสได้ แต่ไม่ชัดเจนนักเมื่อช่องว่างอยู่ที่ 3 และ $2 \mu\text{m}$ และแทบจะไม่แยกความแตกต่างของกระแสเมื่อช่องว่างเป็น 1 และ $0 \mu\text{m}$ ซึ่งแตกต่างจากกรณีของ $L/W = 1$ ในรูปที่ 4.23 สำหรับรูปที่ 4.23 เป็นกรณีของช่องที่สั้นที่สุดของการศึกษานี้ และความแตกต่างของความหนาแน่นกระแสนั้นจะสังเกตได้ยากกว่าเงื่อนไขการออกแบบช่องว่างทั้งหมด



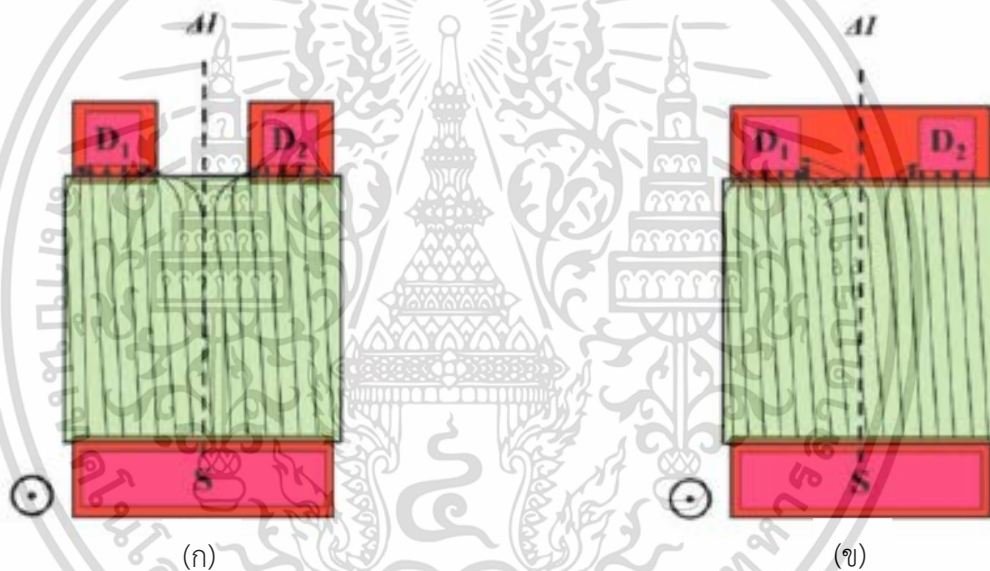
รูปที่ 4.26 การกระจายความหนาแน่นกระแสของแมกเฟต (ก) $L/W = 1$, (ข) $L/W = 0.6$ และ (ค) $L/W = 0.2$

รูปที่ 4.26 แสดงการกระจายความหนาแน่นกระแสของโครงสร้าง Non Split-Drain MAGFET ที่อัตราส่วน L/W คือ 1 , 0.6 และ 0.2 กำหนดให้ความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ที่ 0.5 T ในทิศทาง $+z$ สามารถสังเกตการกระจายกระแสที่ต่างกันใกล้กับหน้าสัมผัสเดรนดังแสดงในวงกลมของรูปที่ 4.22 (ก) ในกรณีนี้ความไวจะสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ก่อนหน้านี้ ความหนาแน่นกระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนลดลงหรือระยะ W สั้นกว่าระยะ L ดังที่เห็นในรูปที่ 4.26 (ข) และ (ค) แทบจะไม่สังเกตเห็นความแตกต่างของกระแสใกล้เดรน เมื่ออัตราส่วนลดลงจาก 1 เป็น 0.2 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ค่าความไวจะลดลงเมื่ออัตราส่วน L/W ลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าความไวและอัตราส่วนเป็นไปตามสมการมาตรฐานของแมกเฟตดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_I = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H \quad (4.1)$$

โดยที่ μ_{ch} คือความคล่องตัวของช่องทางเดินกระแส ระยะ L คือความยาวของ Gate ระยะ W คือความกว้างของ Gate และ G_H คือปัจจัยทางเรขาคณิต โดยปกติ G_H จะน้อยกว่า 1 ขึ้นอยู่กับรูปทรงของอุปกรณ์ที่มีระยะช่องว่าง แต่หากไม่มีระยะช่องว่างหรือช่องว่างมีค่าเป็นศูนย์ จะช่วยยกระดับให้ค่า G_H เข้าใกล้ค่าในอุดมคติ จากผลลัพธ์ของรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.26 สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบโครงสร้างของแมกเฟต ไม่จำเป็นต้องออกแบบให้มีระยะช่องว่างของเดรน ซึ่งโครงสร้างของ Non Split-Drain MAGFET ที่ไม่มีระยะช่องว่างนี้ จะยกระดับการทำงานของแมกเฟตให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบระหว่าง (ก) MAGFET ทั่วไป และ (ข) Non Split-Drain MAGFET

จากผลการทดลอง ที่ได้เสนอแบบจำลองไปนั้น เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น รูปที่ 4.27 จะแสดงผลการจำลองแบบเปรียบเทียบระหว่างแมกเฟตทั่วไปและ Non Split-Drain MAGFET ที่แสดงให้เห็นว่า ระยะห่างของช่องว่างจะทำให้เกิดการสูญเสียได้อย่างไร ดังรูปที่ 4.27 (ก) แสดงกรณีของการออกแบบทั่วไปที่มีระยะช่องว่าง กระแสอิเล็กตรอนจะเบี่ยงเบนโดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไปทางซ้ายมือตามทิศทางสนามแม่เหล็ก ทำให้ค่าความหนาแน่นของกระแส I_{D1} มากกว่า I_{D2} ดังที่แสดงในรูปที่ 4.27 (ก) เส้นทางกระแสอิเล็กตรอนบางส่วนในช่องว่างตรงกลางที่ควรเบี่ยงเบนใน D_1 ไม่สามารถเบี่ยงเบนและหมุนกลับไป D_2 ได้ มันจะทำให้การสูญเสียและค่าความไวบางส่วนจะลดลง เมื่อช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น หากสังเกตที่สภาวะเดียวกันของโครงสร้างที่ออกแบบให้ไม่มีระยะช่องว่าง ในรูปที่ 4.27 (ข) การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบี่ยงเบนของกระแสอิเล็กตรอนจะไหลไปตามช่องทางเดินกระแสและไหลต่อไปภายในบริเวณพื้นที่ของ Drain สามารถเปรียบเทียบและสังเกตความสอดคล้องของแบบจำลองนี้กับผลลัพธ์ของการกระจายความหนาแน่นกระแสระหว่างหน้าสัมผัสในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 กับรูปที่ 4.25 อีกด้วย จำนวนของการเบี่ยงเบนของกระแสอิเล็กตรอนจาก D_2 ถึง D_1 ของการออกแบบโครงสร้างที่ไม่มีระยะช่องว่างใหม่จะมากกว่าการออกแบบโครงสร้างให้มีระยะช่องว่าง

สำหรับการออกแบบโครงสร้างแมกเพตโดยไม่มีระยะช่องว่างหรือ Non Split-Drain MAGFET จะมีความไวสูงที่สุดตามอุดมคติของโครงสร้างแมกเพต เนื่องจากไม่มีการสูญเสียจากระยะช่องว่าง โดยปัจจุบัน อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับโหนดเซ็นเซอร์แม่เหล็กแบบไร้สาย ซึ่งสามารถใช้เพื่อตรวจสอบสถานะของยานพาหนะเช่นการตรวจสอบจำนวนพื้นที่ในที่เกิดรถตรวจจับ การตรวจจับยานพาหนะในโซนที่กำหนดไว้ล่วงหน้าหรือตรวจสอบข้อมูลความหนาแน่นของการจราจรแบบ Real-Time และยังสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ อีกมากมาย



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ เสนอโครงสร้างมอสเฟตแบบปกติจากการสร้างจริงและการจำลองแบบ ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กหรือเรียกว่าแมกเฟต(MAGFET) ในแนวนอน(ทิศทางแกน y) โดยโครงสร้างของมอสเฟต ประกอบด้วยขั้วเดรน(Drain) เกท(Gate) ซอส(Source) และ ฐานรอง(Substrate) กลไกการตรวจจับแม่เหล็กของอุปกรณ์คือปรากฏการณ์ Hall Effect ที่ทำงานในโหมดกระแสระหว่างช่องทางเดินกระแสของเดรนและกระแสฐานรอง ในทิศทางแกน x กลไกนี้ทำให้เกิดแรงของลอเรนซ์จากสนามแม่เหล็กแนวนอนเบี่ยงเบนกระแสระหว่างขั้วเดรนและขั้วฐานรอง ซึ่งทำให้เกิดความต่างของกระแส ΔI ที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและทิศทาง ค่าความไวขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไบอัส มีขนาดของช่องทางเดินกระแสคือ กว้าง $20 \mu\text{m}$ และยาว $20 \mu\text{m}$ ค่ากระแสเดรนและกระแสฐานรองจะถูกปรับให้สมดุลกัน ที่ $0.5, 1$ และ 1.5 mA และจากผลการจำลองแบบโดย TCAD sentaurus ค่าความไวสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นคือ 0.01 T^{-1} ในทิศทางแกน y และ $-y$ ตามลำดับ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า โครงสร้างมอสเฟตแบบทั่วไปนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับแม่เหล็กสำหรับแนวนอนได้

โครงสร้างแมกเฟตโดยทั่วไป จะออกแบบให้ขั้วเดรนแยกกันเป็น D_1 และ D_2 เรียกโครงสร้างนี้ว่า Split Drain MAGFET โดยออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ค่าความไวสูงสุด ดังนั้น กระบวนการสร้างจะขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าของเทคโนโลยี แต่สำหรับโครงสร้างแมกเฟตแบบไม่แยกขั้วเดรน (Non Split-Drain MAGFET) ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการเสนอแนวทางใหม่ที่ไม่มีช่องว่างระหว่างขั้วเดรน การออกแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ ซึ่งทำให้การตรวจจับสนามแม่เหล็ก มีค่าความไวสูงสุดในอุดมคติในอุปกรณ์ประเภทเดียวกัน การทำงานด้วยโหมดกระแสที่ใช้พลังงานน้อยและแรงดันไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากไม่มีช่องว่างระหว่างขั้วเดรน แต่มีหน้าสัมผัสสำหรับแยกความแตกต่างของกระแสที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก การเปรียบเทียบความไวสัมพัทธ์ระหว่างช่องว่างทั้งหมดคือ $3, 2, 1$ และ $0 \mu\text{m}$ อัตราส่วน L/W คือ $1, 0.6$ และ 0.2 ที่ไบอัสค่ากระแส 0.25 mA ผลการจำลองแบบ แสดงให้เห็นว่า โครงสร้าง Non Split-Drain MAGFET ให้ค่าความไวสูงสุด การศึกษานี้ กำหนดที่อัตราส่วน $L/W = 1, 0.6$ และ 0.2 มีค่าความไวคือ $0.0595, 0.0479$ และ 0.0231 T^{-1} ตามลำดับ เป็นไปตามสมการที่ 5.1 ซึ่งเป็นแนวคิดการออกแบบที่ต้องการให้ค่า G_H เข้าใกล้ 1 หรืออุดมคติมากที่สุด ซึ่งพิสูจน์แล้วว่าช่องว่างของเดรน ไม่จำเป็นสำหรับ ซึ่งเป็นวิธีใหม่ในการออกแบบแมกเฟตอย่างง่ายเพื่อให้ได้ค่าความไวสูงสุด

$$S_I = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "**Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,**" *Future generation computer systems*, vol. 29, pp. 1645-1660, 2013.
- [2] X. Liu, K. Lam, K. Zhu, C. Zheng, X. Li, Y. Du, *et al.*, "**Overview of spintronic sensors with internet of things for smart living,**" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, pp. 1-22, 2019.
- [3] J. Manyika, M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, R. Dobbs, J. Bughin, *et al.*, "**The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype,**" 2015.
- [4] Neamen, D. A., "**Electronic circuit analysis and design**", McGraw-Hill New York, 2001.
- [5] Chih-Tang, "**Evolution of the MOS transistor-from conception to VLSI,**" *Proceedings of the IEEE* 76(10): 1280-1326., 1988.
- [6] O. Kanoun and H. Trankler, "**Sensor technology advances and future trends,**" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, pp. 1497-1501, 2004.
- [7] J. E. Lenz, "**A review of magnetic sensors,**" *Proceedings of the IEEE*, vol. 78, pp. 973-989, 1990.
- [8] J. Clarke and R. H. Koch, "**The impact of high-temperature superconductivity on SQUID magnetometers,**" *Science*, vol. 242, pp. 217-223, 1988.
- [9] J. E. Lenz, G. L. Mitchell, and C. D. Anderson, "**Fiber Optic Magnetometer Design,**" in *Fiber Optic and Laser Sensors II*, 1984, pp. 86-90.
- [10] F. Bucholtz, K. Koo, A. Kersey, and A. Dandridge, "**Fiber optic magnetic sensor development,**" in *Fiber Optic and Laser Sensors IV*, 1987, pp. 56-65.
- [11] F. Colegrove, L. Scheerer, and G. Walters, "**Polarization of He 3 gas by optical pumping,**" *Physical Review*, vol. 132, p. 2561, 1963.
- [12] J. H. W. Göpel, JN Zemel, "**Sensors, Magnetic Sensors,**" ed: VCH, Weinheim, 1989.
- [13] T. McGuire and R. Potter, "**Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys,**" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 11, pp. 1018-1038, 1975.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] R. Hebbert and L. Schwee, "Thin film magnetoresistance magnetometer," *Review of Scientific Instruments*, vol. 37, pp. 1321-1323, 1966.
- [15] K. Kuijk, W. Van Gestel, and F. Gorter, "The barber pole, a linear magnetoresistive head," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 11, pp. 1215-1217, 1975.
- [16] U. Dibbern, "Sensors based on the magnetoresistive effect," *Sensors and Actuators*, vol. 4, pp. 221-227, 1983.
- [17] U. Dibbern, "Magnetic field sensors using the magnetoresistive effect," *Sensors and Actuators*, vol. 10, pp. 127-140, 1986.
- [18] H. Wen-hui, Y. Guo-zheng, and G. Xu-dong, "The Application of Magnetoresistive Sensor in Detecting the Capsule's Localization in GI," in *2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2006, pp. 2762-2765.
- [19] P. Ripka, "Review of fluxgate sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 33, pp. 129-141, 1992.
- [20] F. Primdahl, "The fluxgate magnetometer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 12, p. 241, 1979.
- [21] T. Seitz, "Fluxgate sensor in planar microtechnology," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 22, pp. 799-802, 1990.
- [22] S. Kawahito, Y. Sasaki, H. Sato, T. Nakamura, and Y. Tadokoro, "A fluxgate magnetic sensor with micro-solenoids and electroplated permalloy cores," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 43, pp. 128-134, 1994.
- [23] M. Schneider, S. Kawahito, Y. Tadokoro, and H. Baltes, "High sensitivity CMOS microfluxgate sensor," in *International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest*, 1997, pp. 907-910.
- [24] P. Ripka, "Magnetic sensors for industrial and field applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 42, pp. 394-397, 1994.
- [27] L. Ristic, H. Baltes, T. Smy, and I. Filanovsky, "Suppressed sidewall injection magnetotransistor with focused emitter injection and carrier double deflection," *IEEE electron device letters*, vol. 8, pp. 395-397, 1987.

- [28] L. Ristic, T. Smy, and H. Baltes, "A lateral magnetotransistor structure with a linear response to the magnetic field," *IEEE transactions on electron devices*, vol. 36, pp. 1076-1086, 1989.
- [29] M. Metz, M. Schneider, A. Haberli, and H. Baltes, "Analysis and reduction of CMOS magnetotransistor offset," in *28th European Solid-State Device Research Conference*, 1998, pp. 184-187.
- [30] C. Leepattarapongpan, T. Phetchakul, N. Penpondee, P. Pengpad, A. Srihapat, W. Jeamsaksiri, *et al.*, "A merged magnetotransistor for 3-axis magnetic field measurement based on carrier recombination-deflection effect," *Microelectronics Journal*, vol. 45, pp. 565-573, 2014.
- [31] M. Metz, M. Schneider, A. Haberli, and H. Baltes, "Offset reduction in multicollector magnetotransistors," in *International Electron Devices Meeting. Technical Digest*, 1996, pp. 537-540.
- [32] V. Stafeev, "Modulation of diffusion length as a new principle of operation of semiconductor devices," *Soviet Physics-Solid State*, vol. 1, pp. 763-768, 1959.
- [33] E. S. Karakushan, VI, "Magnetodiodes," *Soviet Physics-Solid State*, vol. 3, pp. 493-498, 1961.
- [34] R. Popovic, H. P. Baltes, and F. Rudolf, "An integrated silicon magnetic field sensor using the magnetodiode principle," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 31, pp. 286-291, 1984.
- [35] G. W. Day and A. H. Rose, "Faraday effect sensors: the state of the art," in *Fiber Optic and Laser Sensors VI*, 1989, pp. 138-150.
- [36] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, *et al.*, "Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices," *Physical review letters*, vol. 61, p. 2472, 1988.
- [37] C. H. Smith and R. W. Schneider, "Expanding the horizons of magnetic sensing: GMR," *Proceedings Sensors Expo Boston*, pp. 139-144, 1997.
- [38] R. Popović, "Hall-effect devices," *Sensors and Actuators*, vol. 17, pp. 39-53, 1989.

- [39] R. Nakachai, T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai, "**Simulation of MOSFET as horizontal magnetic mosfet (MAGFET)**," in *2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST)*, 2017, pp. 19-23.
- [40] R. Nakachai, S. Poonsawat, C. Sutthinet, A. Ruangphanit, A. Poyai, and T. Phetchakul, "**Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure**," in *2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, 2018, pp. 1-4.
- [41] R. Nakachai, A. Poyai, and T. Phetchakul, "**Non-Split Drain MAGFET**," in *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 2019, pp. 1-4.
- [42] N. Rezaei, R. Dehghani, A. Jalili, and A. Mosahebfard, "**CMOS magnetic sensor with MAGFET**," in *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2013, pp. 1-5.
- [43] C. Pamonchom, R. Nakachai, C. Sutthinet, A. Poyai, and T. Phetchakul, "**Magnetic FinFET (MAGFinFET)**," in *2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2019, pp. 230-233.
- [44] R. S. Popovic, "**Hall effect devices**," ed: CRC Press, 2003.
- [45] E. H. Hall, "**On a new action of the magnet on electric currents**," *American Journal of Mathematics*, vol. 2, pp. 287-292, 1879.
- [46] M. Crescentini, M. Biondi, A. Romani, M. Tartagni, and E. Sangiorgi, "**Optimum design rules for CMOS hall sensors**," *Sensors*, vol. 17, p. 765, 2017.
- [47] E. Ramsden, "**Hall-effect sensors: theory and application**," ed: Elsevier, 2011.
- [49] D. J. W. C, "**Hall Effect Device**," *U.S. patent no. US2725504A*, 29 November 1955.
- [50] M. J. Ross, "**Hall Effect Device**," *U.S. patent no. US2980860A*, 18 April 1961.
- [55] T. Phetchakul, S. Poonsawat, and A. Poyai, "**The effect of deviation current to 5-contacts vertical Hall device**," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-4.
- [56] S. Poonsawat, T. Phetchakul, and A. Poyai, "**Effect of substrate depth to 5-contact vertical hall**," in *2017 14th International Conference on Electrical*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2017, pp. 620-623.
- [57] R. Popovic, "**The vertical Hall-effect device**," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 5, pp. 357-358, 1984.
- [58] J. W. Gardner, "**Microsensors: principles and applications**," 1994.
- [59] Y.-C. Wu, Jhan, Yi-Ruei, "**3D TCAD Simulation for CMOS Nanoeletronic Devices**," ed: Springer Nature, 2018.
- [60] S. Li and S. Li, "**3D TCAD Simulation for Semiconductor Processes, Devices and Optoelectronics**," ed: Springer Science & Business Media, 2011.
- [62] J. Slotboom and H. De Graaff, "**Bandgap narrowing in silicon bipolar transistors**," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 24, pp. 1123-1125, 1977.
- [63] D. Klaassen, J. Slotboom, and H. De Graaff, "**Unified apparent bandgap narrowing in n-and p-type silicon**," *Solid-State Electronics*, vol. 35, pp. 125-129, 1992.
- [64] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi, "**Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon**," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 30, pp. 764-769, 1983.
- [65] C. Canali, G. Majni, R. Minder, and G. Ottaviani, "**Electron and hole drift velocity measurements in silicon and their empirical relation to electric field and temperature**," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 22, pp. 1045-1047, 1975.
- [66] D. M. Caughey and R. Thomas, "**Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field**," *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 2192-2193, 1967.
- [67] H. Goebel and K. Hoffmann, "**Full dynamic power diode model including temperature behavior for use in circuit simulators**," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*, 1992, pp. 130-135.
- [68] A. Schenk, "**A model for the field and temperature dependence of Shockley-Read-Hall lifetimes in silicon**," *Solid-State Electronics*, vol. 35, pp. 1585-1596, 1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [69] A. Schenk and U. Krumbein, "**Coupled defect-level recombination: Theory and application to anomalous diode characteristics,**" *Journal of applied physics*, vol. 78, pp. 3185-3192, 1995.
- [70] G. Hurkx, D. Klaassen, M. Knuvers, and F. O'hara, "**A new recombination model describing heavy-doping effects and low-temperature behaviour,**" in *International Technical Digest on Electron Devices Meeting*, 1989, pp. 307-310.
- [71] R. Häcker and A. Hangleiter, "**Intrinsic upper limits of the carrier lifetime in silicon,**" *Journal of Applied Physics*, vol. 75, pp. 7570-7572, 1994.
- [72] W. Lochmann and A. Haug, "**Phonon-assisted Auger recombination in Si with direct calculation of the overlap integrals,**" *Solid State Communications*, vol. 35, pp. 553-556, 1980.
- [73] L. Huldt, N. Nilsson, and K. Svantesson, "**The temperature dependence of band-to-band Auger recombination in silicon,**" *Applied Physics Letters*, vol. 35, pp. 776-777, 1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
คุณสมบัติทั่วไปของซิลิคอน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Band structure properties	Value	Units
Energy Gap E_g at ca. 0 K (Minimum Indirect Energy Gap at 0K)	1.17 (at 0 K)	eV
Minimum Direct Energy Gap at 300 K	3.4	eV
Energy separation (E_{Γ_1})	4.2	eV
Intrinsic Debye length	24	um
Intrinsic carrier concentration	$1 \cdot 10^{10}$	cm^{-3}
Intrinsic resistivity	$3.2 \cdot 10^5$	$\Omega \cdot \text{cm}$
Auger recombination coefficient C_n	$1.1 \cdot 10^{-30}$	cm^6 / s
Auger recombination coefficient C_p	$3 \cdot 10^{-31}$	cm^6 / s

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electron thermal velocity		$2.3 \cdot 10^5$	m/s
Electronegativity		1.8	Pauling's
Hole thermal velocity		$1.65 \cdot 10^5$	m/s
Optical phonon energy		0.063	eV
Density of surface atoms		(100) 6.78	$10^{14}/\text{cm}^2$
		(110) 9.59	$10^{14}/\text{cm}^2$
		(111) 7.83	$10^{14}/\text{cm}^2$
Work function (intrinsic)		4.15	eV
Ionization Energies for Various Dopants	<i>Donors</i>		
	Sb	0.039	eV
	P	0.045	eV
	As	0.054	eV
	<i>Acceptors</i>		
	B	0.045	eV
	Al	0.067	eV
	Ga	0.072	eV
	In	0.16	eV
<hr/>			
Mechanical properties		Value	Units
Bulk modulus of elasticity		$9.8 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
Density		2.329	g/cm^3
Hardness		7	Mohs scale
Surface microhardness (using Knoop's pyramid test)		1150	kg/mm^2
Elastic constants		$C_{11} = 16.60 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
		$C_{12} = 6.40 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
		$C_{44} = 7.96 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
Bulk modulus of elasticity		$9.8 \cdot 10^{11}$	dyn/cm^2
Young's Modulus (E)	[100]	129.5	GPa
	[110]	168.0	GPa
	[111]	186.5	GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

คำสั่งในการจำลองแบบด้วย Sentaurus TCAD

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

1. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดขั้นตอนกระบวนการสร้าง (Process simulation)

```

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

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

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

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

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

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

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

```

2. คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดค่า mesh และขั้วไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง

```

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

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

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

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

;-----

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

;-----

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

;-----

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

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

;-----

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

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

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

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

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

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

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

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

;-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

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

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

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

;-----

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

;-----

(sdedr:define-refinement-window "RW.Cathode"

```

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

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

```
-----
```

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

```
-----
```

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

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

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

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

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

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

```
; Save BND file
```

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

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (MUT) เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

```
;
```

3. คำสั่งจำลองการทำงานและกำหนดพฤติกรรมทางไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์

```
;
```

```
----- Title: MAGFET Split Drain -----
```

```
;
```

```
Electrode {
  { Name="Gate" Voltage=@Va@ }
  { Name="Drain1" Voltage=0.0 }
  { Name="Drain2" Voltage=0.0 }
}
```

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

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

  Set ( "Anode" mode Current )

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

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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

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

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

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

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

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

# Polarization/Vector
}

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

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

  Set ( "Cathode" mode Current )

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

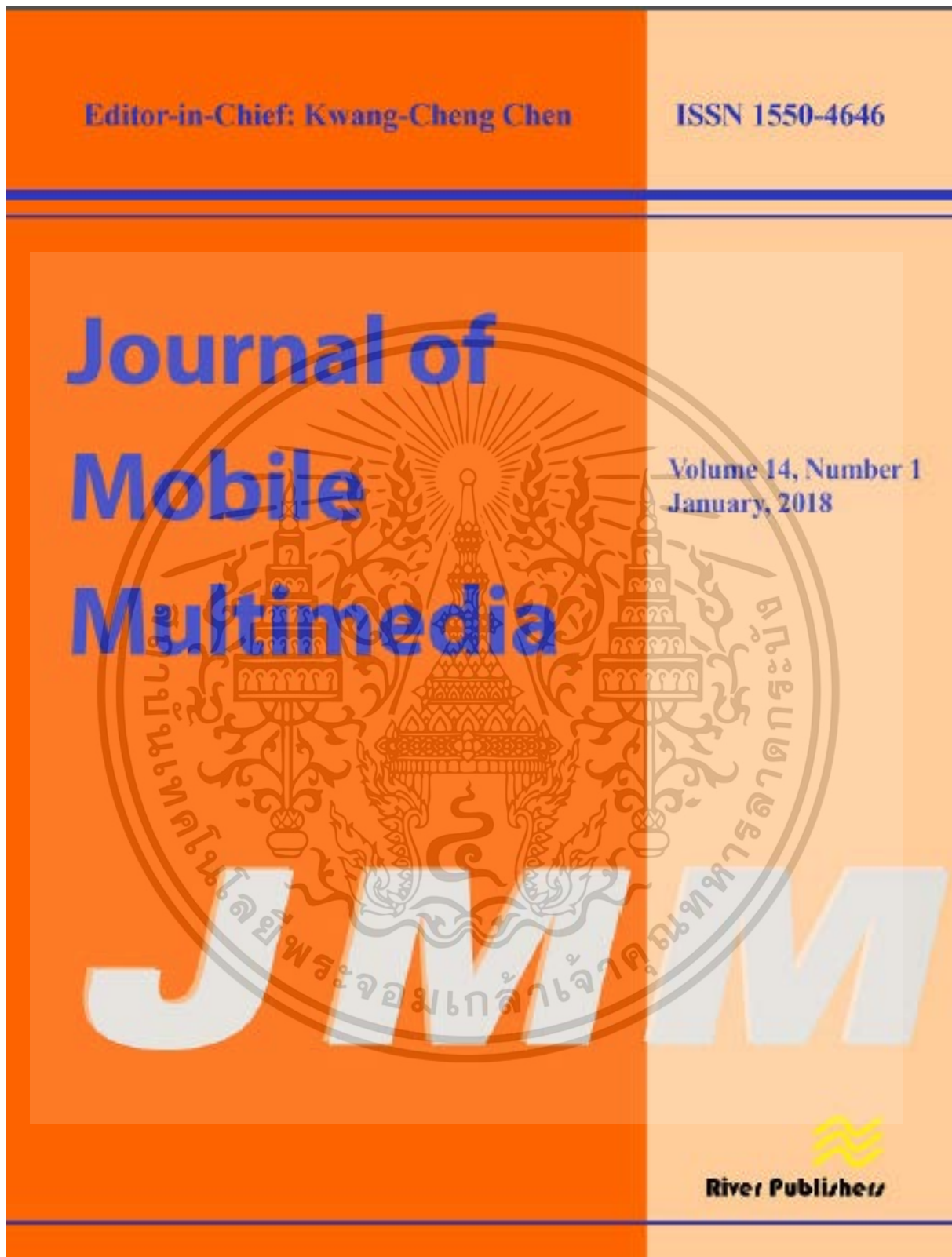
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Rattapong Nakachai, Amporn Poyai and Toempong Phetchakul “High Sensitivity Non-Split Drain MAGFET for Wireless Sensor Networks” Journal of Mobile Multimedia, Vol. 16_1-2, 45-64.
2. Rattapong Nakachai, Amporn Poyai and Toempong Phetchakul “Non-Split Drain MAGFET” The 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2019), July 2-5, 2019, Luang Prabang, Laos.
3. Rattapong Nakachai, Sawatdipong Poonsawat, Chalin Sutthinet, Toempong Phetchakul and Amporn Poyai “Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure” The 6th International Electrical Engineering Congress (IEECON 2018), March 7-9, 2018, Krabi, Thailand.
4. Rattapong Nakachai, Toempong Phetchakul, Sawatdipong Poonsawat and Amporn Poyai “Simulation of MOSFET as Horizontal Magnetic MOSFET” The 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST 2017), April 14-16, 2017, Shenzhen, China.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High Sensitivity Non-split Drain MAGFET for Wireless Sensor Networks

Rattapong Nakachai¹, Amporn Poyai², and Toempong Phetchakul^{1,*}

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

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

*E-mail: R.nakachai@gmail.com; Amporn.poyai@nectec.or.th;
Toempong.ph@kmitl.ac.th*

** Corresponding Author*

Received 30 April 2020; Accepted 17 May 2020;
Publication 17 August 2020

Abstract

The non-split drain MAGFET proposed in this paper is aspossess an ideal, highest sensitivity in the same type of device, current mode for low power, and low voltage that can be embedded within a system for wireless sensor networks application. It is a split-drain MAGFET that is designed to have no gap between drains so that there is no loss from the gap. There are two split contacts in one drain to represent the split drains for current difference that induced from due to magnetic field. The relative sensitivity comparison among all the gaps (3, 2, 1, and 0 μm) with all aspect ratio of width (W)/length (L) ($L/W = 1, 0.6, \text{ and } 0.2$) at biased current 0.25 mA shows that the zero gap or the non-split drain MAGFET structure gives the highest sensitivity. The sensitivities of the non-split drain at the aspect ratios $L/W = 1, 0.6, \text{ and } 0.2$ in this study are 0.0595, 0.0479, and 0.0231 T^{-1} , respectively. It is proved that the gap is not necessary for the MAGFET. It is a new, smart way to design the MAGFET for the highest sensitivity and gap lossless for modern sensor applications.

Journal of Mobile Multimedia, Vol. 16_1-2, 45–64.

doi: 10.13052/jmm1550-4646.16123

© 2020 River Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

46 *R. Nakachai et al.*

Keywords: Non-split drain, MAGFET, TCAD, magnetic sensor, Lorentz's force.

1 Introduction

Future trends of increasing the efficiency of magnetic field detectors will focus on continuously improving to a smaller size, low power consumption, and high sensitivity, suitable for application in various environments [1]. Nowadays, there is a proposal to apply magnetic sensors to check the position of the vehicle, including, developing algorithms as wireless magnetic sensor networks for real-time traffic flow monitoring and data processing for a road network [2–4]. For smart systems, the sensor can be integrated within the processor chip which as all of them are work efficiently even in low voltage and low power operation. The sensor device should be in current mode for signal processing. The small size of them needs requires the a high high-performance device such as a device that is capable of the reducing the subthreshold swing in MOSFET for increasing the ON state current/OFF state current ratio of for the gain of the device.

The split-drain MAGFET is a kind of magnetic sensor that detects the vertical magnetic field perpendicular to drain current [5]. It is the MOSFET that is specially designed by the split drain into two symmetry symmetrical parts D_1 and D_2 for receiving current difference from Lorentz's force that linearly depends on magnitude and direction of vertical magnetic field density [6]. The MAGFET is a low power device compatible to with modern CMOS technology for low power and low voltage integrated circuit [7–9].

This study introduces a new design of the MAGFET for high sensitivity. The split-drain MAGFET generally should be designed such that the gap between drains would be kept as a minimum value as possible as we can for realizing high sensitivity. This activity depends directly on fabrication technologies. The non-split drain MAGFET has no gap between split drains but there are still split contacts into a single drain for differential output current according to magnitude and direction of the vertical magnetic field. This new design has no gap; so, it does not depend on fabrication technologies and hence proves that gap is not necessary. This design will give the highest sensitivity and approach to the ideal condition with the lossless from the gap.

2 Hall Effect: Mode of Operation

Hall effect is the basic basis of for nonferromagnetic material for magnetic devices. This effect is indicates that there is an induced force on a moving charge particle q in the magnetic field. Figure 1 illustrates this the Hall effect of a semiconductor that whose carriers are hole and electron. The force that is called the Lorentz's force is given by

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

where \mathbf{F} is the induced force vector, q is the particle charge, \mathbf{v} is the drift velocity, and \mathbf{B} is the magnetic field density vector. Electrons and holes flowing in a material by I_x will experience a force in $-y$ direction as indicated in Figure 1. The electric field E_H or the Hall field is induced for balancing the force and may be written as

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{E}_H + \mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (2)$$

The Hall field gives the Hall voltage between the top and bottom sides of the material which is

$$V_H = \frac{I_x B_z}{qpd} \quad (3)$$

for a p-type semiconductor or majority hole carrier material and

$$V_H = -\frac{I_x B_z}{ned} \quad (4)$$

for an n-type semiconductor or majority electron carrier material as shown in Figure 1.

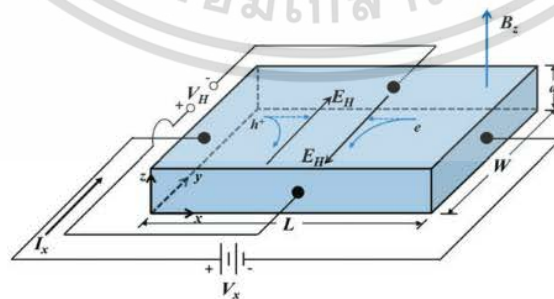


Figure 1 Geometry and structure of hall effect.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

48 R. Nakachai et al.

There are two modes of operation of the Hall effect for magnetic sensors that enables classification of devices into two groups. The first group uses the regular Hall effect structure as shown in Figure 1 in which the length L is longer than the width W . The output is the Hall voltage which is related to magnitude and direction of the magnetic field. The second group uses the Lorentz's force and the output is differential current or magnetoresistance. In this group, since the Lorentz's force is preferred, there is no need for the Hall field to balance with the Lorentz's force. The structure needs to be designed in such a way that it is different from the voltage mode group in which the length L is shorter than the width W . The two modes of operation are applied for magnetic devices such as the Hall plate, vertical Hall in voltage mode and magnetoresistance, magnetotransistor, and the MAGFET in current mode.

Voltage mode

The concept of the voltage mode Hall effect device is shown in Figure 1. The Hall voltage will be induced by the magnetic field according to (3) and (4) for the p-type and n-type, respectively. In this mode, the electric force from the Hall field balances the Lorentz's force so the total force is zero and the Hall voltage appears between the top and bottom sides of the device. The Hall device has four terminals: two for current and two in vertical for the Hall voltage sensing. Figure 2(a) shows the top view of the Hall plate devices. The current paths are straight even though the Lorentz's force acts upon the carrier but the Hall electric field balances this force. The Hall plate is very popular useful for the magnetic sensor in the voltage mode for vertical field detection. It can detect both magnitude and direction of the magnetic field. There is another Hall device that detects the horizontal magnetic field. Figure 2(b) is the vertical Hall plate device that detects the horizontal or parallel field. There are 5 five contacts for three current contacts and the two Hall voltage contacts. The main mechanism still uses the Hall effect in vertical direction.

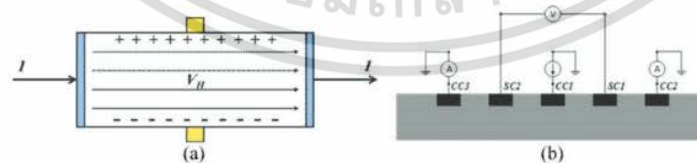


Figure 2 Hall effect voltage mode of operation: (a) Hall plate device and (b) Vertical hall device.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current mode

The current mode Hall device uses the Lorentz's force for deflecting carrier current. This mode does not want require the Hall electrical field for balancing the Lorentz's force. The device has to be designed as a short structure. The length L in Figure 1 is shorter than the width W for reducing the induced Hall electrical field as much as it can. The Lorentz's force deflects the carrier in current as shown in Figure 3. The total force F can be written as

$$\begin{aligned} F_p &= qE + q[v_p \times B] \\ F_n &= -qE - q[v_n \times B]. \end{aligned} \quad (5)$$

for hole and electron, whereas v_p and v_n are drift velocity of hole and electron, respectively. The hole and electron current density $J_p(B)$ and $J_n(B)$ in the presence of a magnetic induction B can be written as

$$\begin{aligned} J_p(B) &= J_p(0) + \mu_p[J_p(B) \times B] \\ J_n(B) &= J_n(0) + \mu_n[J_n(B) \times B]. \end{aligned} \quad (6)$$

where μ_p and μ_n are hole and electron mobility, respectively. $J_p(0)$ and $J_n(0)$ are the drift current densities due to the electric field E , V_x/L , when $B = 0$:

$$\begin{aligned} J_p(0) &= q\mu_p pE \\ J_n(0) &= q\mu_n nE. \end{aligned} \quad (7)$$

where p and n are hole and electron concentration, respectively.

The orientation of vectors E and B correspond to those in Figure 1. From the current densities vector in (7), the Hall current mode of the operational device can be applied in current deflection and magnetoresistance path as shown in Figure 3. The deflection current paths are longer than

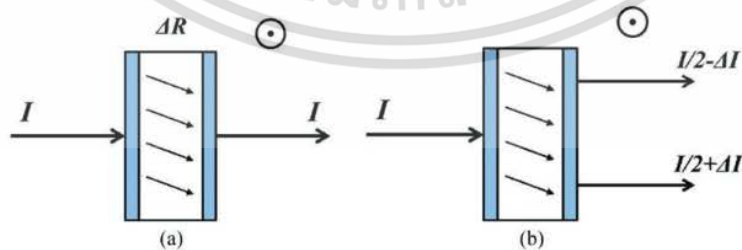


Figure 3 Current mode hall effect: (a) Magnetoresistance and (b) Current deflection.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50 R. Nakachai et al.

regular path of no magnetic field, and that also means greater effective resistance of the material. The magnetoresistance device has two terminals and resistance increases with magnetic field. This magnetoresistance effect is caused by design Hall plate in short structure, so it is called geometry magnetoresistance which is shown in Figure 3(a). Another type of current mode device is shown in Figure 3(b). This device is designed for three terminals. The currents flow in one terminal, pass through the device, and flow out equally to the other two terminals. The current deflection by applied magnetic field will make a difference in terms of the output current. One side has to design split contact symmetrically for carrying differential current corresponding to the magnetic field density. The current mode split terminal devices, for example, are the magnetotransistor and the MAGFET. These devices have to be designed for receiving current region, collector for the magnetotransistor, and drain for the MAGFET, in two split symmetrical regions or terminals. Figure 4 shows a top view of the magnetotransistor and MAGFET. The collector is split into two collectors as C_1 and C_2 and the drain is split into two drains as D_1 and D_2 as shown in Figure 4(a) and 4(b), respectively. These devices use this design from the first time that they were introduced. Even though they were continuously developed along in the recent past time but the design concept is never changed. It is well known that the MAGFET has another name that we call split drain MOSFET because the structure is designed to split the drain into two symmetrical regions.

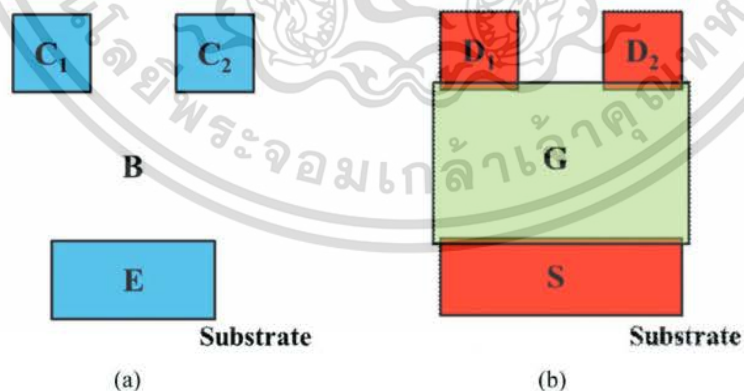


Figure 4 Current mode hall effect devices: (a) Magnetotransistor and (b) Split-drain MAGFET.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The point of these current mode devices is a gap between the split regions. It is believed that the split region is necessary for the current mode devices. It is well known that the gap causes some loss in the differential current output from the ideal device. These devices are recommended to keep this gap small as possible as they can. Unfortunately, the minimum gap depends on fabrication technologies. In this study, the new design concept is proposed and proved that a gap is not necessary for the current mode device. The gap causes the nonuniform current distribution and current deflection in this area. The real point is that the contact current is the most important parameter for carrying the differential output current but do not separate the drain region. It will make one to contemplate changing design ideas. Our proposed design is smart, easy, and independent from any technological limitation. This design will also apply to other current mode Hall effect devices.

3 Device Structures and TCAD

3.1 Device Structure

The device structures of the conventional MAGFET and non-split drain MAGFET are shown in Figures 5(a) and (b), respectively. The conventional split-drain MAGFET is the MOSFET that has two split drains with the gap (d) between them. The non-split drain is the conventional MAGFET that has no gap. The channel length (L) and width (W) are shown in Figure 5. The gaps are varied at 3, 2, 1, and 0 μm . The aspect ratios (L/W) with the minimum distance of 1 μm are varied at 0.2, 0.6, and 1. The substrate is the n-type silicon with the concentration of 10^{15} cm^{-3} . The n-type concentration of source and drain are is 10^{18} cm^{-3} and SiO_2 as gate insulator has a thickness of 500 \AA . There are two contacts in two split drains for the conventional MAGFET and when gap is zero in Figure 5(b), there are the same two contacts in one drain.

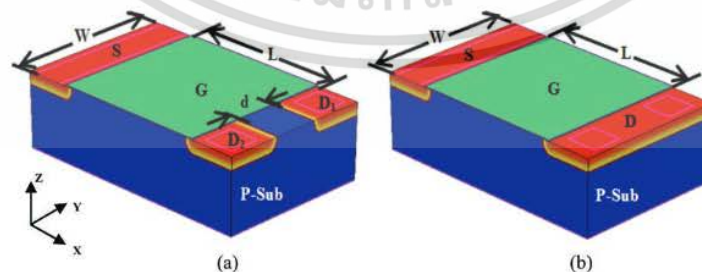


Figure 5 Device structure: (a) Conventional MAGFET and (b) Non-split drain MAGFET.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

52 R. Nakachai et al.

3.2 TCAD

TCAD sentaurus is the a standard process and device simulation program [10–13]. It is used as a tool for this study. There are important equations such as Fermi-Dirac probability, incomplete ionization of dopants, drift and diffusion current, current continuity equation, and Poisson equation. They are solved simultaneously with few or no approximation. The model for the magnetic effect is as follows

$$J_{\alpha} = \mu_{\alpha} g_{\alpha} + \mu_{\alpha} \frac{1}{1 + (\mu_{\alpha}^* B)^2} \cdot [\mu_{\alpha}^* B \times g_{\alpha} + \mu_{\alpha}^* B \times (\mu_{\alpha}^* B \times g_{\alpha})] \quad (8)$$

where α is the n - or p -type semiconductor, J_{α} is the carrier current density vector, g_{α} is the current vector without mobility, μ_{α}^* is the the Hall mobility, B is the magnetic induction vector, and B is the magnitude of vector [14].

4 Results and Discussion

The current–voltage characteristics of devices in Figure 5 are measured to confirm that they operate as the MOSFET. Two drains are connected together as one drain during the measurement. The current–voltage characteristic of the device, $L/W = 1$, is shown in Figure 6. It shows good characteristics

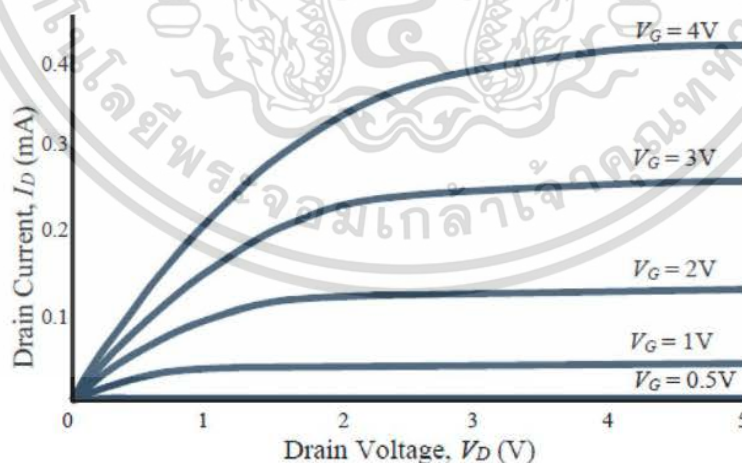


Figure 6 Current-voltage characteristics of MAGFET.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with the threshold voltage, V_T , approximately 0.5 V. The saturation current is a function with $(V_G - V_T)^2$, which is according to in accordance with the regular long channel MOSFET.

Figure 7 shows magnetic responses of all the devices. The constant current source pulls the current down from source to ground. The biased current is controlled by constant current source to avoid output differential current from the magnetic field modulation. Normally I_{D1} and I_{D2} are equal except that there are some offset values from the fabrication process when there is no magnetic field. The total drain currents I_D are the sum of drain 1 and drain 2 currents, $(I_{D1} + I_{D2})$, which is according to as per the constant current source. The output responses are current difference ($\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$) causes caused by the Lorentz's force according to magnitude and direction of the vertical magnetic field. Figures 7(a) to 7(c) show responses of the devices aspect ratios as 0.2, 0.6, and 1, respectively. The gaps are varied at 3, 2, 1, and 0 μm in each device. All of the characteristics ($\Delta I - B$) show linearly dependence.

Figure 7 shows the $\Delta I - B$ magnetic responses of the MAGFET. The magnetic fields varied varying from -0.5 to 0.5 T are applied in a vertical perpendicular direction to a planar device. The relation between output differential current ΔI and magnetic field density B is linear. The voltage source V_D at drain and V_G at gate is 1 V and constant current source is 0.25 mA. The relative sensitivity sensitivities ($S_r = \Delta I / \Delta B \cdot I$) of $L/W = 0.2$ with gaps at 3, 2, 1, and 0 μm are 0.0003, 0.0036, 0.0092, and 0.0231 T^{-1} , respectively. The magnetic responses of the aspect ratio $L/W = 0.6$ are shown in Figure 7(b) in the same condition. The relative sensitivities, S_r are 0.0182, 0.0264, 0.0338, and 0.0479 T^{-1} , respectively. Similarly, the magnetic responses of the aspect ratio $L/W = 1$ are shown in Figure 7(c) and the relative sensitivities S_r are 0.0326, 0.0389, 0.0481, and 0.0595 T^{-1} , respectively. It is seen that the higher the sensitivity, the less the gap it is. All of them, i.e., the zero gap or the non-split drain structure gives the highest sensitivity. The sensitivity increases with the longer channel length L or larger L/W . The relative sensitivities S_r of all the aspect ratios at the biased current 0.25 mA are summarized in Table 1. The current density distribution of the MOSFET of the device aspect ratio $L/W = 1$ at magnetic field 0.5 T in z and $-z$ direction is shown in Figure 8. In the case of no applied magnetic field in the middle of Figure 8, the current density near the drain contact is uniform and symmetric in all the gaps. The current density is crowded near contact at both the drains and at the channel region near the drains. When the vertical magnetic field is applied in the z direction, the Lorentz's

54 *R. Nakachai et al.*

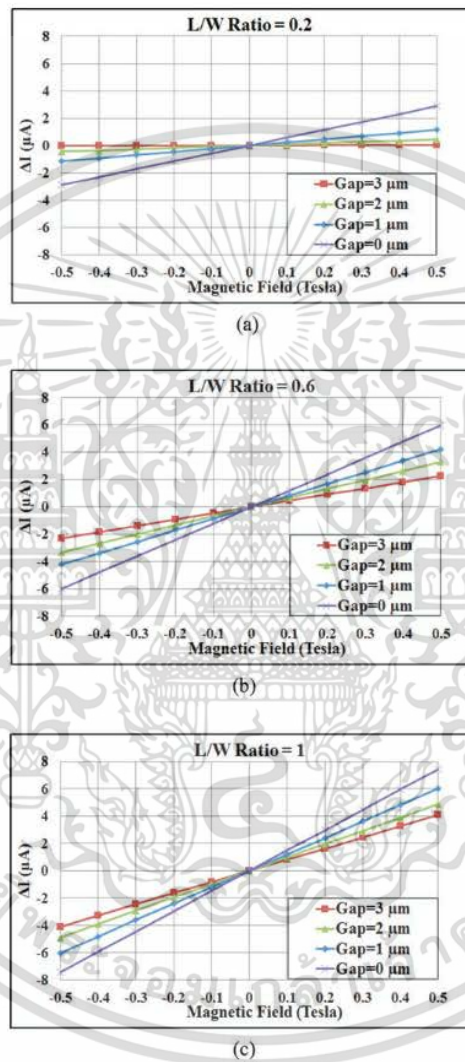


Figure 7 Differential current – magnetic field responses: (a) $L/W = 0.2$, (b) $L/W = 0.6$ and (c) $L/W = 1$.

force that is induced in the direction to the left-hand side caused the current density on the left drain D_1 to be greater than on the right drain D_2 . In this case, the output differential current ΔI is positive. It can be observed clearly at small gaps which are 1 and 0 μm as shown in the circle as the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 Relative sensitivity (T^{-1}) at 0.25 mA, $B = 0.5$ T

L/W Ratio	Gap(μm)			
	3	2	1	0
0.2	0.0003	0.0036	0.0092	0.0231
0.6	0.0182	0.0264	0.0338	0.0479
1	0.0326	0.0389	0.0481	0.0595

example in the left side of Figures 8(c) and (d). When the magnetic field is applied in the $-z$ direction, the Lorentz's force that is induced in the direction to the right side of the channel causes the current density on the right drain D_2 to be greater than the left drain D_1 . However, in this case, the output differential current ΔI is negative. The current density distribution between contacts in the drain is uniform and high for non-split drain that we can observe in the area in the circle between contacts in the right side of Figure 8(d). In the case of split drain in Figure 8(a)–(c), the current density distribution between both the drains is non-uniform with the lower current density when the distance is far from out of the channel as shown in the circle between contacts as the example on the right side of Figure 8(a), (b), and (c). The non-uniform current density distribution also means that there is discontinuity in current deflection. The current density distribution of $L/W = 0.6$ and 0.2 is shown in Figures 9 and 10, respectively. They show the results in the same manner as in the case of $L/W = 1$ but they hardly to could be observed as the current difference as described in Figure 8 especially when the channel length or the aspect ratio L/W is reduced. It results in the longer channel length, i.e., higher sensitivity. In Figure 9, we may be able to observe the current density difference but not so clear when the gaps are 3 and 2 μm apart and hardly we can distinguish the current difference when the gaps are 1 and 0 μm apart, which is different from the case of $L/W = 1$ in Figure 8. Figure 10 is the case of a shortest channel in this study and the current density difference is difficult to observe in all the gap parameters.

Figure 11 shows the current density distribution of non-split drain structure of the aspect ratios L/W 1, 0.6, and 0.2. The magnetic field is 0.5 T in the $+z$ direction. It can be observed as the differential current distribution near the drain contact as shown in the circle of Figure 11(a). In this case, the sensitivity is high as shown in Figure 7. The current density increases when the aspect ratio is reduced or the channel is shorter than width as we can see in Figures 11(b) and 11(c). The differential current near the drain is hardly observed when the aspect ratios are reduced from 1 to 0.2 as shown

56 R. Nakachai et al.

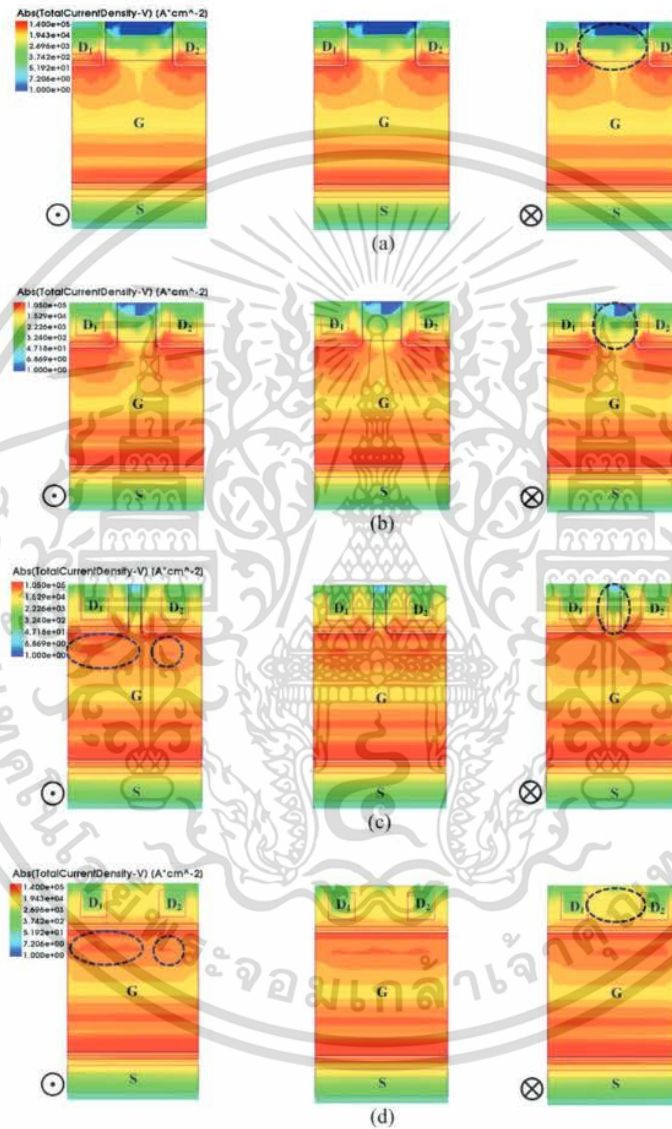


Figure 8 Current density distribution of MAGFET, $L/W = 5 \mu\text{m}/5 \mu\text{m} = 1$, $B_{z,-z} = 0.5 \text{ T}$:
 (a) Gap = $3 \mu\text{m}$, (b) Gap = $2 \mu\text{m}$, (c) Gap = $1 \mu\text{m}$ and (d) Gap = $0 \mu\text{m}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High Sensitivity Non-split Drain MAGFET for Wireless Sensor Networks 57

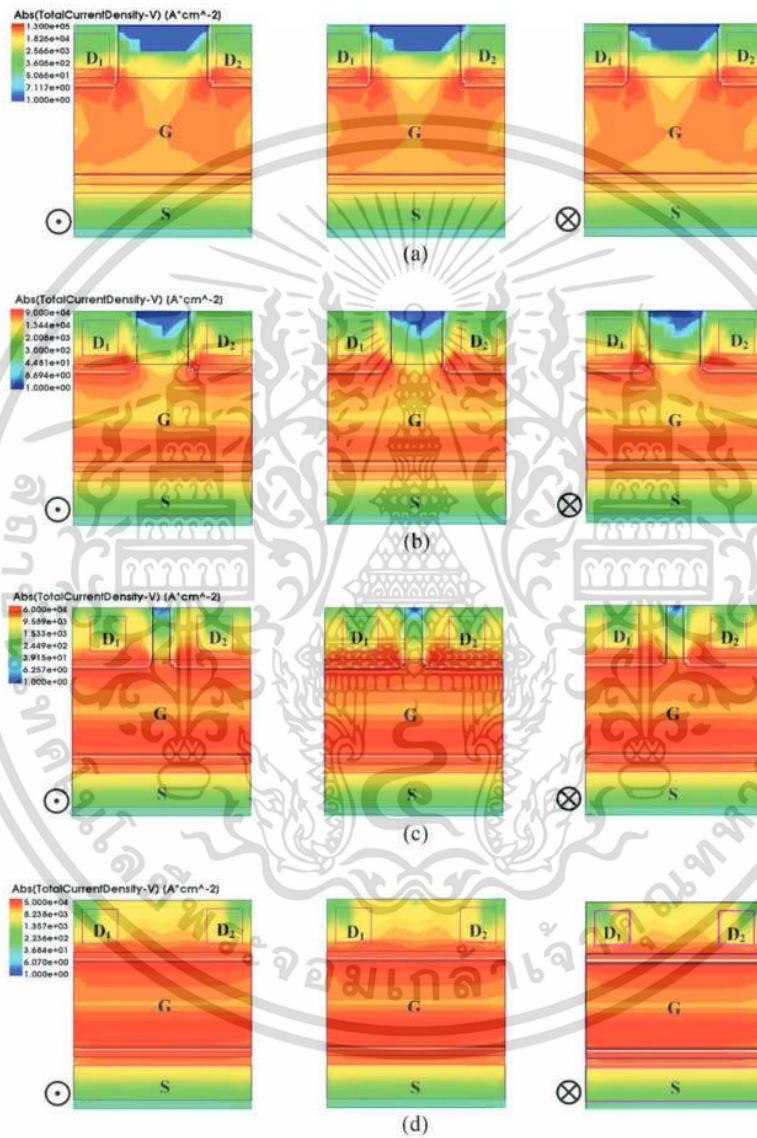


Figure 9 Current density distribution of MAGFET, $L/W = 3 \mu\text{m}/5 \mu\text{m} = 0.6$, $B_{z,-z} = 0.5 \text{ T}$: (a) Gap = $3 \mu\text{m}$, (b) Gap = $2 \mu\text{m}$, (c) Gap = $1 \mu\text{m}$ and (d) Gap = $0 \mu\text{m}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

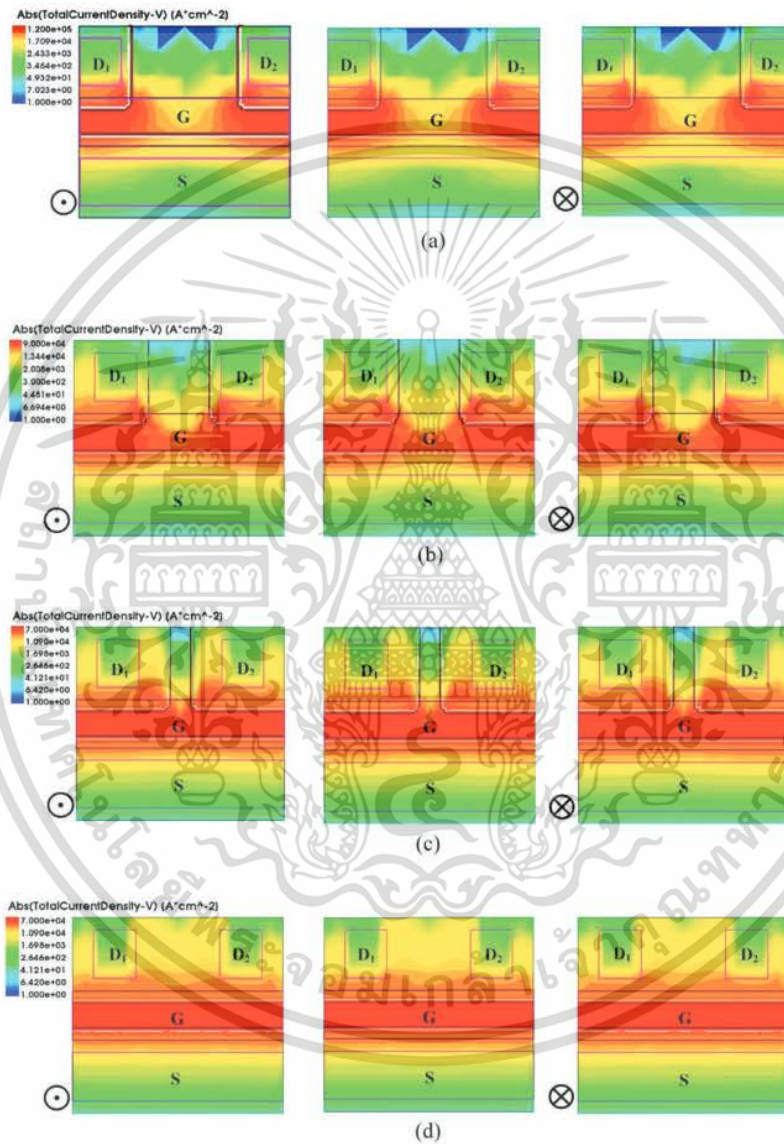
58 *R. Nakachai et al.*

Figure 10 Current density distribution of MAGFET, $L/W = 1 \mu\text{m}/5 \mu\text{m} = 0.2$, $B_{z,-z} = 0.5 \text{ T}$: (a) Gap = $3 \mu\text{m}$, (b) Gap = $2 \mu\text{m}$, (c) Gap = $1 \mu\text{m}$ and (d) Gap = $0 \mu\text{m}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

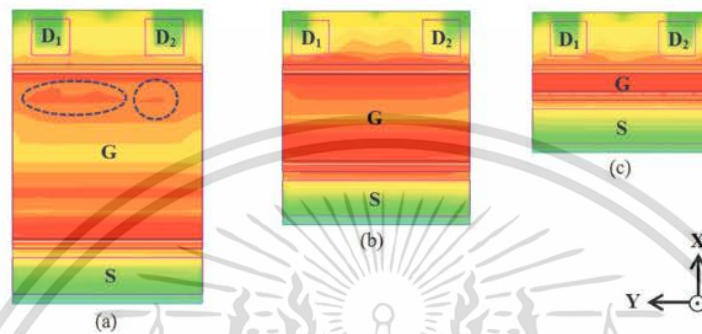


Figure 11 Current density distribution of MAGFET: (a) $L/W = 1$, (b) $L/W = 0.6$ and (c) $L/W = 0.2$.

in Figure 11. The sensitivity decreases with the reduced aspect ratio L/W directly. The sensitivity and aspect ratio relation is according to the standard equation of the MAGFET are [15].

$$S_r = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H \quad (9)$$

where μ_{ch} is the channel mobility, L the is gate length, W is the gate width, and G_H is the geometrical factor. Normally G_H is less than 1, and depends on the device geometry including the gap. The zero gap will enhance the G_H approach to the ideal value. From the results of Figures 7 to 11, it can be said that the MAGFET does not need to design a gap between split drain structures as the conventional design. The non-split drain structure which has no gap will enhance the MAGFET approach to realize the ideal condition.

Proposed model

From the results, a simplified model for easier understanding is proposed. Figure 12 shows the comparison between the conventional split drain MAGFET and the proposed model of the non-split drain MAGFET that illustrates how the gap will make some loss. Figure 12(a) shows the case of the conventional design with gap; the electron currents are deflected by induced force to the left-hand side according to the magnetic field direction. The current of I_{D1} terminal should be ensured to be greater than I_{D2} . As we can see in Figure 12(a), some electron current paths in the middle gap that should be deflected in D_1 cannot deflect, and hence turn back to D_2 . This results in some losses and sensitivity decreases from the expected value and

60 R. Nakachai et al.

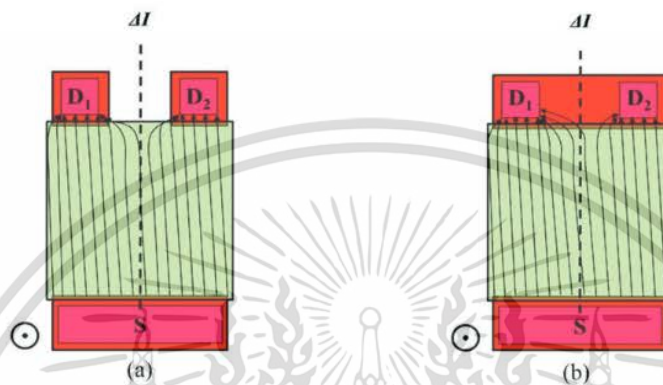


Figure 12 The comparison between (a) Split drain MAGFET and (b) Proposed model of non-split drain MAGFET.

will have more effect when the gap is larger. If we observe the same condition with no gap design in Figure 12(b), we could see that the electron current deflection appears along the channel and continues within drain region. We can compare and observe the consistency of this model with the results of the current density distribution between contacts in Figure 8 and also in Figures 9 and 10. The amounts of current paths' deflection from D_2 to D_1 of the new no-gap design are greater than the conventional gap design.

By designing the MAGFET structure without gap or non-split drain MAGFET, it helps us to obtain the highest sensitivity that is ideal to the MAGFET structure because there is no loss from the gap. Nowadays, magnetic sensors with high efficiency are needed for wireless magnetic sensor nodes, which can be applied to monitor the status of a vehicle such as monitoring the amount of space in a parking lot, detecting the presence of a vehicle in a predetermined zone or real-time monitoring of traffic density data [16], and many other applications.

5 Conclusion

This is the first time to that we have proposed a new non-split drain MAGFET. It is a magnetic device that detects the vertical magnetic field similar to a conventional MAGFET. Its structure is the split drain MAGFET that has no gap between drains so that it has one drain with the two split contacts within a drain. The output differential current can be carried out by split

contacts instead of the split drains of the conventional structure. This structure enhances the MAGFET to approach the ideal condition for the highest sensitivity of the same type of device with lossless from the gap. It is the simplest design for the highest sensitivity device which does not depend on any technological limitation. It can be applied to as the current mode devices which are compatible with low power, low voltage integrated systems for modern wireless sensor networks.

Acknowledgment

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

References

- [1] Lenz and A. Edelstein, "Magnetic Sensors and Their Application", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 6 No. 3, 2006, pp. 631–649.
- [2] A. Daubaras, M. Zilyis, "Vehicle Detection based on Magneto-Resistive Magnetic Field Sensor". *Electronics and Electrical Engineering, Kaunas: Technologija*, 2012, No. 2(118), pp. 27–32.
- [3] Haji Said Fimbombaya, Nerey H. Mvungi, Ndyetabura Y. Hamisi and Hashimu U. Iddi, "Performance Evaluation of Magnetic Wireless Sensor Networks Algorithm for Traffic Flow Monitoring in Chaotic Cities". *Modelling and Simulation in Engineering* Vol. 2018, Article ID 2591304, 11 pages.
- [4] Vlada Velisavljevic, Eduardo Cano, Vladimir Dyo and Ben Allen, "Wireless Magnetic Sensor Network for Road Traffic Monitoring and Vehicle Classification". *Transport and Telecommunication*, 2016, Vol. 17, No. 4, 274–288.
- [5] Gerard F. Santillan-Quinonez, Victor Champac and Roberto S. Murphy, "Exploiting magnetic sensing capabilities of Short Split-Drain MAGFETs", *Solid-State Electronics* 54 2010, pp. 1239–1245.
- [6] Rodrigo Rodríguez-Torres and Edmundo A. Gutiérrez-Domínguez, "Analysis of Split-Drain MAGFETs", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 51, No. 12, December 2004, pp. 2237–2245.
- [7] Z. Xiaofeng, W. Dianzhong, L. Meiwei, G. Hanyu and L. Gang, Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the

62 *R. Nakachai et al.*

- nano-polysilicon thin film transistor, *J. Semicond*, Vol. 35, No. 9, 2014, pp. 094004-1–094004-6.
- [8] Guo Qing, Zhu Dazhong and Yao Yunruo “CMOS magnetic sensor integrated circuit with sectorial MAGFET”, *Sensors and Actuators A* 126 2006, pp. 154–158.
- [9] Shuk-Fun Lai, Wing-Kong Ng, Wing-Shan Tam, Chi-Wah Kok and Hei Wong “A Low Power CMOS Magnetic Field Sensor consisting of a MAGFET and a Pulse Width Modulated Readout Circuit” 2017 International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), October 18–20, 2017, Hsinchu, Taiwan.
- [10] J. Marek, D. Donoval, M. Donoval, M. Daricek “Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation” ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems, October 12–16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia.
- [11] S. R. Ashwin, S. Sreejith, U. Sajeshkumar, “TCAD Design of Tunnel FET Structures and Extraction of Electrical Characteristics”, *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online):* 2013, pp. 2319–7064.
- [12] Maria-Alexandra Paun, Jean-Michel Sallese and Maher Kayal “Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis” *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2(1):85–97 March 2013.
- [13] Nebojša Janković, Sanja Aleksić and Dragan Pantić “Simulation and Modeling of Integrated Hall Sensor Devices” *Proceedings of Small Systems Simulation Symposium 2012, NiŽ, Serbia, 12th–14th February 2012* pp. 85–92.
- [14] TCAD Sentaurus Manual, synopsis®, version D-2016.03.
- [15] R. S. Popovic, “Hall Effect Devices” 2nd ed., IoP Publishing Ltd., London, 2004.
- [16] E. Sifuentes, O. Casas, and R. Pallas-Areny “Wireless Magnetic Sensor Node for Vehicle Detection With Optical Wake-Up” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 11, No. 8, August 2011, pp. 1669–1676.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Biographies

Rattapong Nakachai received his B.S. degree in electrical engineering from the Kasetsart University, Thailand in 2003, and the M.S. degree in electronics engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 2008. His research interest areas are electronics engineering, computer programming, and semiconductor devices and sensors.



Amporn Poyai received his B.Sc. degree in physics from the Silpakorn University, Bangkok, Thailand in 1991, the M.S. degree in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand in 1994, and the Ph.D. degree in electrical engineering from the Katholieke University of Leuven, Leuven, Belgium in 2002. His research is emphasized on design, simulation, fabrication and characterization of semiconductor device, microfabrication technology, and integrated circuits. He worked at the Thai Microelectronic Center (TMEC) and now he is currently working at the Design & Engineering Consulting Service Center (DECC) as part of the National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Thailand.

64 *R. Nakachai et al.*



Toempong Phetchakul received his B.S. degree in electronic engineering, and the M.S. degree in electrical engineering from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, and the D.Eng. degree in solid state device engineering from the Tokai University, Japan. His research interests are in design, simulation, fabrication and characterization of semiconductor device, and semiconductor sensors on integrated circuits. He is currently working at the Department of Electronics, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

iceast
2019

2ND CALL FOR PAPER

THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING,
APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY
JULY 2-5, 2019 LUANG PRABANG, LAOS

ສະບາຍດີ
ທວງພະບາງ



The International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) was inaugurated in 2007 to provide opportunities for enhancing collaboration and exploring current interdisciplinary topics. This year is the 5th event and being held in Laos, a country with beautiful nature and culture.

TOPICS

Submissions are solicited on a wide variety of topics related to Engineering, Applied Sciences and Technology, but not limited to:

- TRACK 1 - INDUSTRIAL ENGINEERING, MATERIALS AND MANUFACTURING
- TRACK 2 - MECHANICAL, MECHATRONICS AND CIVIL ENGINEERING
- TRACK 3 - FOOD, CHEMICAL AND AGRICULTURAL ENGINEERING
- TRACK 4 - TELECOMMUNICATIONS, COMPUTER SCIENCE, INSTRUMENTATION AND CONTROL, ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING
- TRACK 5 - ACOUSTIC AND MUSIC ENGINEERING, THE SCIENCE AND APPLICATIONS OF MUSIC TECHNOLOGY, AND OTHER RELATED FIELDS

The accepted conference papers will be published in **MATEC** Web of Conference (indexed by **SCOPUS**) and the proceedings in **IEEE Xplore** Digital Library (indexed by **EI Compendex** and **SCOPUS**).

CONTACTS

WWW.ICEAST2019.ORG
Email: iceast2019@kmitl.ac.th
Facebook: iceast2019

IMPORTANT DATES

Online Submission Open	Jan 15, 2019
Paper Submission Deadline	Feb 28, 2019
Notification of Acceptance	Apr 20, 2019
Final Paper Submission Deadline	May 15, 2019
Author Registration Deadline	May 15, 2019
Conference Date	July 2-5, 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Non-Split Drain MAGFET

Rattapong Nakachai,
Department of Electronics,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute
of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
R.nakachai@gmail.com

Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center,
National Electronics and
Computer Technology Center,
Chachoengsao, Thailand
Amporn.poyai@nectec.or.th

Toempong Phetchakul
Department of Electronics,
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute
of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
toempong.ph@kmitl.ac.th

Abstract— This paper presents the design of non-split drain MAGFET for high sensitivity magnetic device. The structure is split drain MAGFET that has no gap between drains so drain is only one drain that has split contacts within a drain. It is proved that MAGFET is not necessary to design by split drain with gap between them. The sensitivity is the highest for non-split drain structure. This study compares sensitivities of the two structures with gap between drains of 3, 2, 1 and 0 μm at 0.25 mA, aspect ratio $L/W = 1$, which are 0.0326, 0.0389, 0.0481 and 0.0595 T^{-1} , respectively. The relative sensitivities (S_r) of non-split drain are also highest at other aspect ratios which are 0.0003, 0.0036, 0.0092 and 0.0231 T^{-1} for $L/W = 0.2$ and 0.0182, 0.0264, 0.0338 and 0.0479 T^{-1} for $L/W = 0.6$, respectively. The non-split drain MAGFET is a new design for highest sensitivity. The non-split drain design is the smart way for high sensitivity MAGFET.

Keywords— Non-Split Drain, MAGFET, TCAD, Magnetic Sensor, Lorentz's Force

I. INTRODUCTION

Spilt-drain MAGFET is an interesting type of magnetic field detector [1]. The structure is a MOSFET designed by split drain into two parts D1 and D2. The magnetic field detection is based on the density of the magnetic field perpendicular to the bias drain current, resulting in the Lorentz's force that deflects drain currents into the differential current output [2]. Magnetic field density is low power device in low voltage and low power integrated circuit [3, 4] and compatible to standard CMOS technology.

Spilt-drain MAGFET has been applied in many areas such as discrete device and circuit system. For example, some researchers are applied to biosensor such as detect and monitor single magnetic bead, drug delivery monitoring and microarray monitoring applications [6, 9].

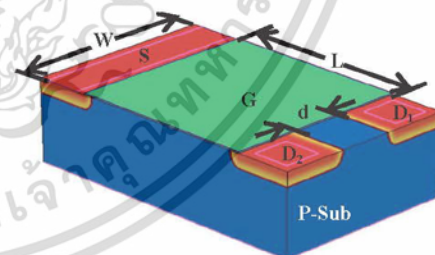
This research presents a new design for a highly sensitive magnetic field detector. The design of the structure of the MAGFET has no gap between spilt drains or called the non-split drain MAGFET. There are still two contacts into a single drain for differential current output according to magnetic field density. In general, a good sensitivity is designed to allow spilt-drain spaces to have the minimum distance as possible as we can which is depend on technology. The new

design non-split drain does not depend on technology because it has no gap and easily design for the highest sensitivity of device for all technology.

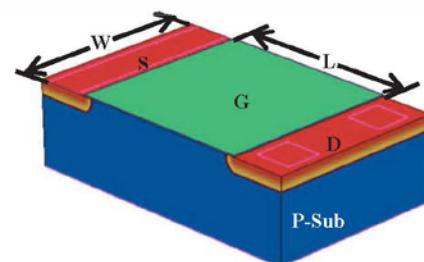
II. DEVICE STRUCTURES AND TCAD

A. Device Structure

The device structures are shown in Fig. 1. Figure 1 (a) is the conventional MAGFET. The structure is MOSFET that drain is split in two parts with the gap (d) between drains. The aspect ratios (L/W) with the minimum distance 5 μm are varied at 0.2, 0.6 and 1. The gaps are varied at 3, 2, 1 and 0 μm . The non-split drain is the case that gap is 0 μm which is shown in Fig. 1(b). Even though the gap is zero, the contacts are split in two parts into drain region. This study compares the conventional structure with different gap and non-split drain structures without gap. The MAGFET is N-type with substrate and source/drain concentration of 10^{15} and 10^{18} cm^{-3} , respectively. The SiO_2 gate oxide thickness is 500 \AA .



(a) Conventional MAGFET



(b) Non-split drain MAGFET

Fig. 1 Device structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

978-1-7281-0067-8/19/\$31.00 ©2019 IEEE ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B. TCAD

The tool for this study is by simulation method. The process and device Synopsys Sentaurus TCAD is used throughout this work [5-8]. The standard equation such as Fermi-Dirac probability, incomplete ionization dopants, drift and diffusion currents, current continuity equation and Poisson equation are available. The model for magnetic effect is as follow

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

where α is n or p type semiconductor, \vec{J}_α is carrier current density vector, \vec{g}_α is current vector without mobility, μ_α^* is the Hall mobility, \vec{B} is the magnetic induction vector and B is the magnitude of vector.

III. EXPERIMENT, RESULTS AND DISCUSSION

The MAGFETs in Fig.1 are measured current-voltage characteristics to confirm that they are MOSFET device. The split drains are connected together for one drain during measurement. Fig. 2 shows current-voltage characteristics of devices at $L/W = 1$. The graph shows the regular MOSFET with the threshold voltage 0.5 volt. The saturation current is related to $(V_G - V_T)^2$ which is according to regular long channel MOSFET.

The magnetic responses are further measured as shown in Fig. 3. The split drains are biased constant by constant voltage source V_D . There are constant current source for polling constant current from source to ground. The totals drain currents from drain 1 and drain 2, $(I_{D1} + I_{D2})$, are constant according to constant current source. Usually both drain currents should have the same value when no magnetic field is applied, except that there are some offset values from the fabrication process. The magnetic response is the differential current ($\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$) which comes from current deflection by Lorentz's force according to magnetic field density. The devices aspect ratios $L/W = 0.2, 0.6$ and 1 are shown in Fig. 3 (a), (b) and (c) respectively. In each aspect ratio, the gaps between drains are 3, 2, 1 and 0 μm . All of them shows the linearly dependence between ΔI and magnetic field density B .

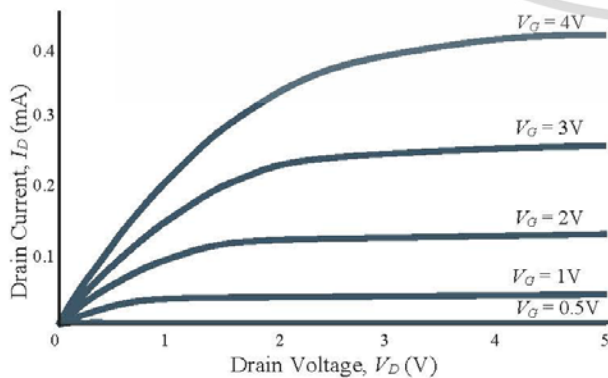
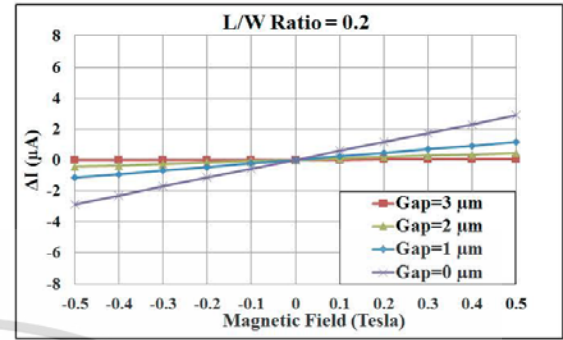
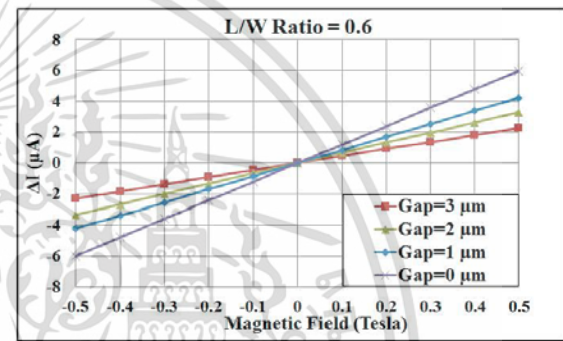


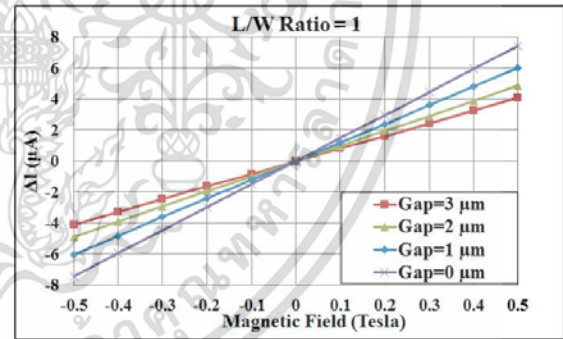
Fig. 2 Current-Voltage Characteristics of MAGFET.



(a) $L/W = 0.2$



(b) $L/W = 0.6$



(c) $L/W = 1$

Fig.3 Differential current - Magnetic field responses.

Fig. 3 is ΔI - B magnetic responses. The voltage source V_D is 1V, V_G is 1V and constant current source is 0.25 mA. The vertical magnetic field varied from 0 - 0.5 T are applied perpendicular to surface of device. In Fig. 3(a), the relative sensitivities $S_r = \frac{1}{I} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta B}$ of L/W ratio = 0.2 with gap 3, 2, 1 and 0 μm are 0.0003, 0.0036, 0.0092 and 0.0231 T^{-1} , respectively. Fig. 3 (b) is magnetic responses for aspect ratio $L/W = 0.6$ at the same condition as in Fig.3 (a) and $S_r = 0.0182, 0.0264, 0.0338$ and 0.0479 T^{-1} , respectively. Similarly in Fig. 3 (c) for aspect ratio $L/W = 1$, $S_r = 0.0326, 0.0389, 0.0481$ and 0.0595 T^{-1} , respectively. From Fig. 3, we observed that the smaller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

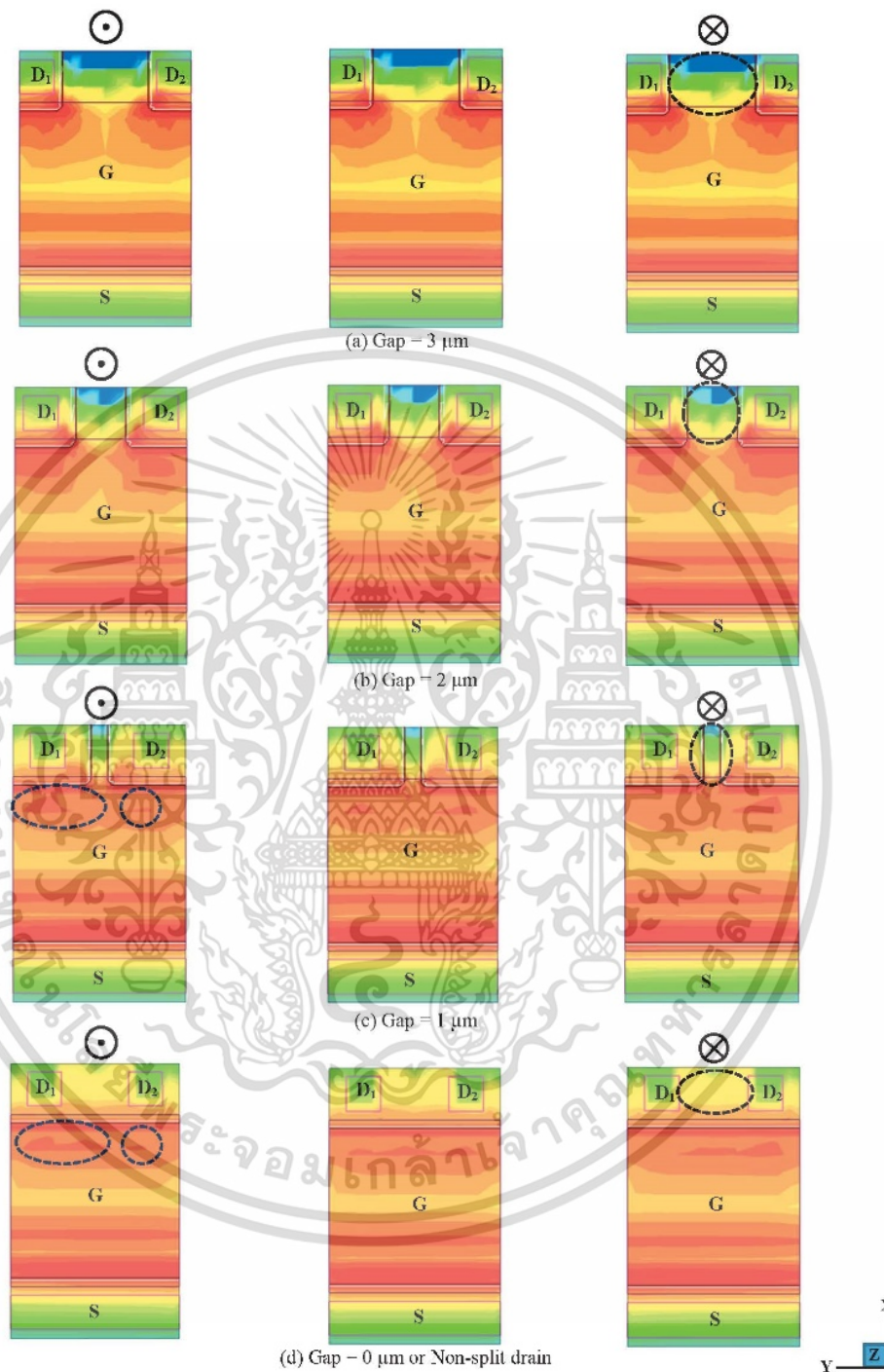


Fig. 4 Current density distribution of MAGFET, $L/W = 5\mu\text{m}/5\mu\text{m} = 1$, $B_{z-z} = 0.5 \text{ T}$.

gap gives the higher S_r . The non-split drain structure or zero gap gives the highest S_r of all cases. The longer channel length, or larger L/W , gives the higher S_r . Regardless of any aspect ratio; the non-split drain structure gives the highest relative sensitivity.

Fig. 4 is the current density distribution of MAGFET of device aspect ratio $L/W = 1$, at magnetic field 0.5 T. They compare each other among current distribution during applied

magnetics in Z , $-Z$ and no applied magnetic field. The zero magnetic fields in the middle of Fig. 4, the current density is symmetric in all gaps. The current density is crowded at both drains cross section areas that connected the channel. When magnetic field is applied in Z direction, the current density on the left drain D_1 is greater than on the right drain D_2 . The output differential current ΔI is positive. The difference can be observed clearly at small gap which are 1 and 0 μm as shown

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

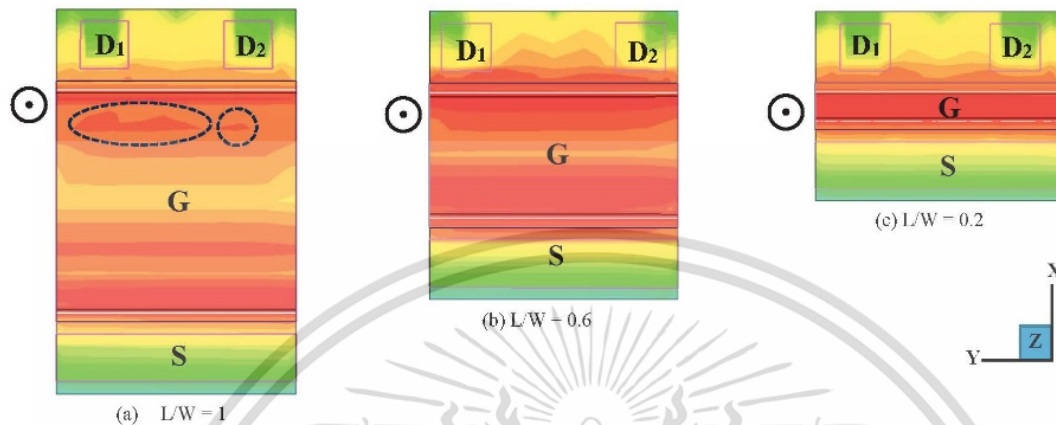


Fig. 5 Current density distribution of MAGFET

in the circle as the example in the left side of Fig. 4 (c) and (d). When the magnetic field is applied in $-Z$ direction, the current density on the right drain D_2 is greater than on the left drain D_1 . The differential current is negative. The current density distribution between drain contacts is uniform and high for non-split drain but it is non-uniform for split drain with the lower current density when the distance far from the channel as shown in the circle between contact as the example on the right side of Fig. 4.

The current density distribution of aspect ratios L/W of non-split drain structure is shown in Fig. 5. The L/W is 0.2, 0.6 and 1 and magnetic field is 0.5 T in $+Z$ direction. The current density in channel of $L/W = 0.2$ is very dense and uniform. The current density difference in channel near drain contacts is hardly observed as shown in Fig. 5 (c). It can be observed with in drain region near contacts. In this case, the sensitivity is not high as shown in Fig. 3. The current density in channel is reduced when the L/W is increased from 0.2 to 1 as shown in Fig. 5 (a) and (b). The current density difference in channel near drain contacts can be observed clearly in Fig. 5 (a) so the sensitivity is high as shown before in Fig. 3. The aspect ratio L/W is according to the standard relation of MAGFET [10] as follow

$$S_r = \frac{1}{2} \mu_{ch} \frac{L}{W} G_H \quad (2)$$

where μ_{ch} is channel mobility, L is gate length, W is gate width and G_H is geometrical factor. Normally G_H is closed to but less than 1 depend on device geometry also including the gap. From the current density distribution in Fig. 4, the non-split drain design enhances G_H approached to the ideal value. It proves that, MAGFET does not need to design as conventional split drain and easily design for high sensitivity by non-split drain MAGFET.

IV. CONCLUSION

The non-split drain MAGFET is proposed here for the first time. The structure is like the conventional MAGFET that no gap between two split drains but still has split contacts in a drain in order to bring the differential current output. The gap

between drains is not necessary for MAGFET. The most importance is the split contacts of a drain that will enhance MAGFET approached to ideal. This design gives the highest sensitivity of MAGFET. It is the simplest way to smart design for MAGFET.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thanks National Research Cousin of Thailand for financial support.

REFERENCES

- [1] Gerard F. Santillan-Quinonez, Victor Champac and Roberto S. Murphy, "Exploiting magnetic sensing capabilities of Short Split-Drain MAGFETs", *Solid-State Electronics* 54 2010, pp. 1239-1245.
- [2] Rodrigo Rodriguez-Torres and Edmundo A. Gutiérrez-Domínguez, "Analysis of Split-Drain MAGFETs", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 51, No. 12, December 2004, pp. 2237-2245.
- [3] Z. Xiaofeng, W. Dianzhong, L. Meiwei, G. Hanyu and L. Gang, Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the nano-polysilicon thin film transistor, *J. Semicond.*, Vol. 35, No. 9, 2014, pp. 094004-1-094004-6.
- [4] Guo Qing, Zhu Dazhong and Yao Yunruo "CMOS magnetic sensor integrated circuit with sectorial MAGFET", *Sensors and Actuators A* 126 2006, pp. 154-158.
- [5] J. Marek, D. Donoval, M. Donoval, M. Daricek "Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation" ASDAM 2008. The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems, October 12-16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia.
- [6] Bawei Zhang , Zhenyu Li , Can E. Korman , and Mona E. Zaghoul "Rectangular cmos differential MAGFET biosensor for magnetic particle detection" *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 7, July 2013, pp. 4052-4055.
- [7] S. R. Ashwin, S. Sreejith, U. Sajeshkumar, "TCAD Design of Tunnel FET Structures and Extraction of Electrical Characteristics", *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online):* 2013, pp. 2319-7064.
- [8] TCAD Sentaurus Manual, synopsys®, version D-2016.03.
- [9] Lenz and A. Edelstein , "Magnetic Sensors and Their Application", *IEEE Sensors Journal*, vol. 6 No.3, 2006, pp.631-649.
- [10] R. S. Popovic, "Hall Effect Devices" 2nd ed., IoP Publishing Ltd., London, 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5/31/23, 4:46 PM Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore

IEEE.org IEEE Xplore IEEE SA IEEE Spectrum More Sites

Cart Create Personal Account Sign In



Browse My Settings Help

Access provided by: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet

Sign Out

Access provided by: King Mongkuts Institute of Technology Ladkrabang provided by UniNet

Sign Out

All

ADVANCED SEARCH

Conferences > 2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON)

Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Rattapong Nakachai ; Sawatdipong Poonsawat ; Chalin Suthinet ; Anucha Ruangphanit ; Amporn Poyai ; Toempong Phetchakul All Authors

88 Full Text Views

Alerts

Manage Content Alerts Add to Citation Alerts

Abstract

Download PDF

Document Sections

- I. Introduction
- II. Device Structure, Fabrication and Simulation
- III. Experiment and Results
- IV. Discussion
- V. Conclusion

Abstract: The MOSFET used as magnetic field sensor is presented. It is a conventional structure that has a source, a gate, a drain and a substrate or body terminal which fabricated... [View more](#)

Metadata

Abstract:

The MOSFET used as magnetic field sensor is presented. It is a conventional structure that has a source, a gate, a drain and a substrate or body terminal which fabricated by standard CMOS process. It detects the horizontal y-direction magnetic field in parallel and perpendicular to currents. The device is biased for channel current and substrate current. The mechanism is Hall Effect in current mode. The induced Lorentz's force deflects currents between drain current and substrate forward current causes output differential current. The relation shows linearity dependence between magnetic field density and output differential current. The relative sensitivity depends on amount of bias currents.

Published in: 2018 International Electrical Engineering Congress (IEECON)

Date of Conference: 07-09 March 2018

INSPEC Accession Number: 18671405

Date Added to IEEE Xplore: 13 May 2019

DOI: 10.1109/IEECON.2018.8712249

ISBN Information:

Publisher: IEEE

Conference Location: Krabi, Thailand

PDF Help

Authors

Figures

References

Keywords

Metrics

More Like This

Contents

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8712249>

1/9

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Horizontal Magnetic Field MAGFET by Conventional MOSFET Structure

Rattapong Nakachai
Department of Electronics,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
R.nakachai@gmail.com

Sawatdipong Poonsawat
Department of Electronics,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
586010172@kmitl.ac.th

Chalin Sutthinet
Department of Electronics,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
57601042@kmitl.ac.th

Anucha Ruangphanit
Thai Microelectronics Center
Wangtakien District, Amphoe
Muang,
Chachoengsao, Thailand
Cmoslee517@gmail.com

Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center
Wangtakien District, Amphoe
Muang,
Chachoengsao, Thailand
Amporn.poyai@nectec.or.th

Toempong Phetchakul
Department of Electronics,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
Toempong.ph@kmitl.ac.th

Abstract—The MOSFET used as magnetic field sensor is presented. It is a conventional structure that has a source, a gate, a drain and a substrate or body terminal which fabricated by standard CMOS process. It detects the horizontal y-direction magnetic field in parallel and perpendicular to currents. The device is biased for channel current and substrate current. The mechanism is Hall Effect in current mode. The induced Lorentz's force deflects currents between drain current and substrate forward current causes output differential current. The relation shows linearly dependence between magnetic field density and output differential current. The relative sensitivity depends on amount of bias currents.

Keywords—MOSFET; substrate current; Lorentz's force; magnetic sensor; current mode

I. INTRODUCTION

MOSFET that detects magnetic field so called MAGFET usually has split drain structure. It detects magnetic vertical field perpendicular to device surface. The mechanism is deflection carriers of inversion layer from induced Lorentz's force which causes the imbalance between drain current related to magnetic field intensity [1]. The magnetic response characteristics usually show linearly dependence [2, 3]. The analyzed models were proposed in 2D and 3D [4, 5].

In this study, we proposed the MOSFET used as parallel magnetic field sensor by measurement. It was the conventional structure that had drain, gate, source and substrate. The detected magnetic field is in parallel with device. The device was designed and fabricated by standard CMOS process. The biasing for drain and substrate current were applied. The current-voltage characteristics and magnetic responses were measured. TCAD simulation with the same dimension and process condition of real device is also studied for mechanism confirmation. The mechanism was proposed for result explanation.

H. DEVICE STRUCTURE, FABRICATION AND SIMULATION

A. MOSFET

The conventional MOSFET structure is shown in Fig. 1. It has four terminals, drain (D), gate (G), source (S) and substrate (B). Normally, source and substrate are closed and connected together for avoiding threshold shift from substrate bias effect. For magnetic application, drain and substrate are placed in the same side of gate for controlling the same current direction and source is placed in another side of gate. The source is injected electron currents to drain by gate biased voltage and to substrate by forward biased between source and substrate.

B. Device Fabrication

The N-MOSFET is fabricated by standard 0.8 μm CMOS process. The cross section diagram of device is shown in Fig. 2. The substrate is p type with the concentration $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Drain and source are N^+ doped by phosphorus and arsenic with the concentration 10^{20} cm^{-3} . The gate dimensions are 20 μm wide and 1.2 μm long. The gate oxide thickness is 17 nm. Fig. 3 shows mask pattern and top view photomicrograph of fabricated device. There is a difference from Fig. 1 that the substrate contact is not behind drain region as shown in Fig.1 but it is near drain pad which is far

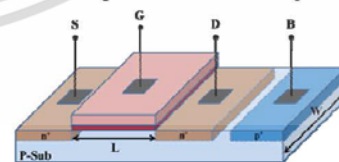


Fig. 1. Structure of conventional N-MOSFET structure.

This research was supported by the National Research Council of Thailand.

XXX-X-XXXX-XXXX-X/XX/SXX.00 ©20XX IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

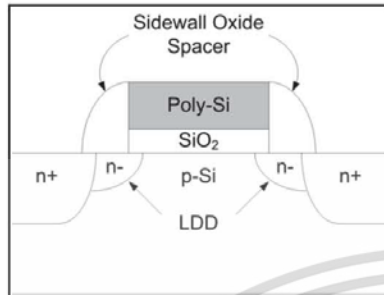


Fig. 2. Cross-section diagram of N-MOSFET.

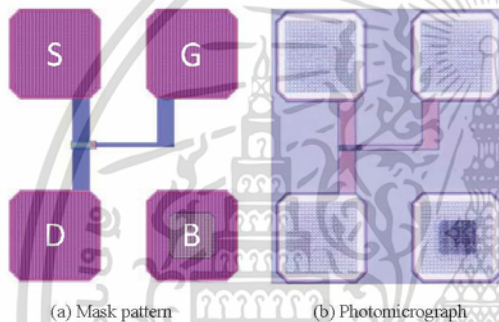


Fig. 3. Top view of N-MOSFET.

region as shown in Fig.1 but it is near drain pad which is far from drain. However, drain and substrate contact are in the same side of gate and source is in another side. It is enough for magnetic application.

C. TCAD Simulation

The commercial program for process simulation TCAD sentaurus [6, 7] is used for this work. There is model for magnetic simulation. The current density with magnetic field density dependence model used for this study is explain as

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

where α is n or p , \vec{J}_a is carrier current density, \vec{g}_a is current vector without mobility, μ_a is the Hall mobility, \vec{B} is the magnetic induction vector and B is the magnitude of vector.

III. EXPERIMENT AND RESULTS

There are three parts of experiment. First, current-voltage characteristics of NMOS are investigated. Second, magnetic responses are measured. Finally, the magnetic responses are simulated by TCAD sentaurus for mechanism study.

A. I-V Characteristic

The current-voltage characteristics from the measurement are shown in Fig. 4. It shows the regular N-MOSFET. Then it will be taken to test magnetic responses.

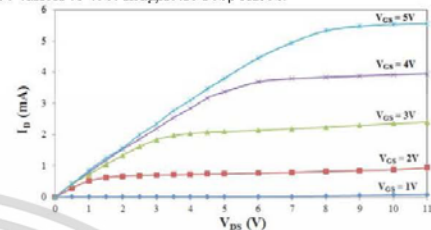


Fig. 4. Current-voltage characteristics of N-MOSFET.

B. Biasing Circuit for Magnetic Response

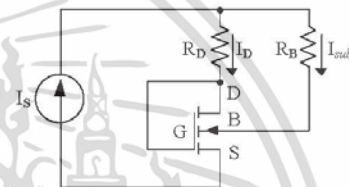


Fig. 5. Biasing circuit of N-MOSFET for magnetic measurement.

The biasing circuit for magnetic measurement is shown in Fig.5. The constant current source is used for controlled the amount of current to avoid the magnetic modulation effect. The drain and substrate currents combine with a constant current I_s . It means that the drain current increases, the substrate current must decrease and the same on the contrary. The differential current comes from deflection current by Lorentz's force.

C. Magnetic Characteristic

The magnetic response is shown in Fig. 6. The constant current is biased at 1, 2 and 3 mA. The output is the differential current deviated ΔI ($I_{sub} - I_D$) from the initial condition that no magnetic field is applied ($\Delta I = 0$). The response shows the linearly relation between magnetic field density and differential current. The relative sensitivities ($\Delta I / I \Delta B$) are 0.0072, 0.0168 and 0.02 T^{-1} at 1, 2 and 3 mA, respectively.

D. Simulation

The conditions for simulation are the same dimension and concentration as mention before. However, it is not the real device condition exactly because in the real fabrication process, some parameters during the process are varied. The preliminary simulation result wants to confirm the mechanism and the relation of magnetic field and response. Fig. 7 shows the magnetic responses of device at the current 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 mA. They shows the linearly relation with the relative sensitivities are 0.0071, 0.0152 and 0.02 T^{-1} at the current 1, 2 and 3mA, respectively.

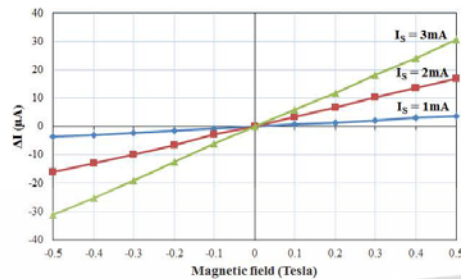


Fig. 6. Magnetic response characteristic of N-MOSFET.

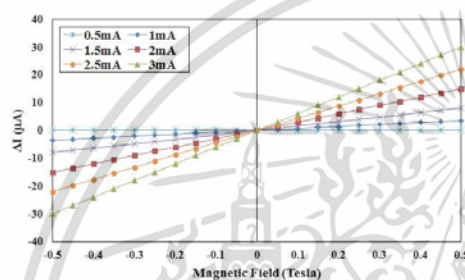


Fig. 7. Magnetic response characteristic of N-MOSFET by simulation.

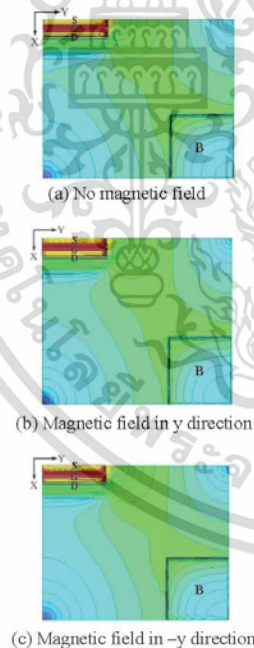


Fig. 8. Current density distribution of N-MOSFET by simulation.

The current density distribution is shown in Fig. 8. Fig. 8(a) is the case of no magnetic field. The initial condition, drain current and substrate current are equal. When magnetic field is applied in y direction, the substrate current I_{sub} increases and channel drain current I_D decreases as shown in Fig. 8(b). On the other hand, when the magnetic field is applied in -y direction, the current density of channel drain current I_D increases and substrate current I_{sub} decreases as shown in Fig. 8(c). The total current, drain current plus substrate current are kept constant ($I_D + I_{sub} = I_s$) all time.

IV. DISCUSSION

From the measurement and simulation results, we introduce model for explanation. Fig. 9 shows the proposed model for device mechanism. Fig. 9 (a) is the device when no magnetic field is applied. The currents show in the figure is the electron current so the conventional currents are opposite direction. It is biased for drain current by source inject electron via channel to drain. The substrate current is biased by electron injection from source to substrate. Normally, the two currents should be adjusted equally but naturally they are some difference so there are some offset voltages between drain and body. In this study, we measure the current difference ΔI from the initial condition of no magnetic field. The constant current source is important for constant keeping the amount of current. It means that the increasing current of one side come from the another side. The drain and substrate current combination is constant all time.

Fig. 9 (b) is the device when magnetic field is applied in y direction. The magnetic field (B) crosses the conventional current in -x direction and induces Lorentz's force in -z direction. The electron current of drain current is forced by Lorentz's force lower to the bulk substrate. The electron drain current deflects to substrate and substrate current is increased by $\Delta I/2$. At the same time, the electron drain current is reduced by $\Delta I/2$. The total differential current is ΔI . Increasing bias current (drain current and substrate current) and/or magnetic field density, the amount of deflected current is increased and differential current ΔI is also increased.

Fig. 9 (c) is the device when magnetic field is applied in -y direction. The magnetic field (B) crosses the conventional current in -x direction and induces Lorentz's force in z direction. The electron from substrate current is forced by Lorentz's force to upper surface. The electron substrate current deflects to the channel and drain current is increased by $\Delta I/2$. At the same time, the electron substrate current is reduced by $\Delta I/2$. The total differential current is ΔI . As before, increasing bias current (drain current and substrate current) and/or magnetic field density, the amount of deflected current is increased and differential current ΔI is also increased.

V. CONCLUSION

The application of MOSFET for magnetic field sensing is proposed. The structure is conventional MOSFET structure composes of drain, gate, source and substrate. The drain and substrate are in the same side of gate for the same current direction and source is in another side for carrier injection

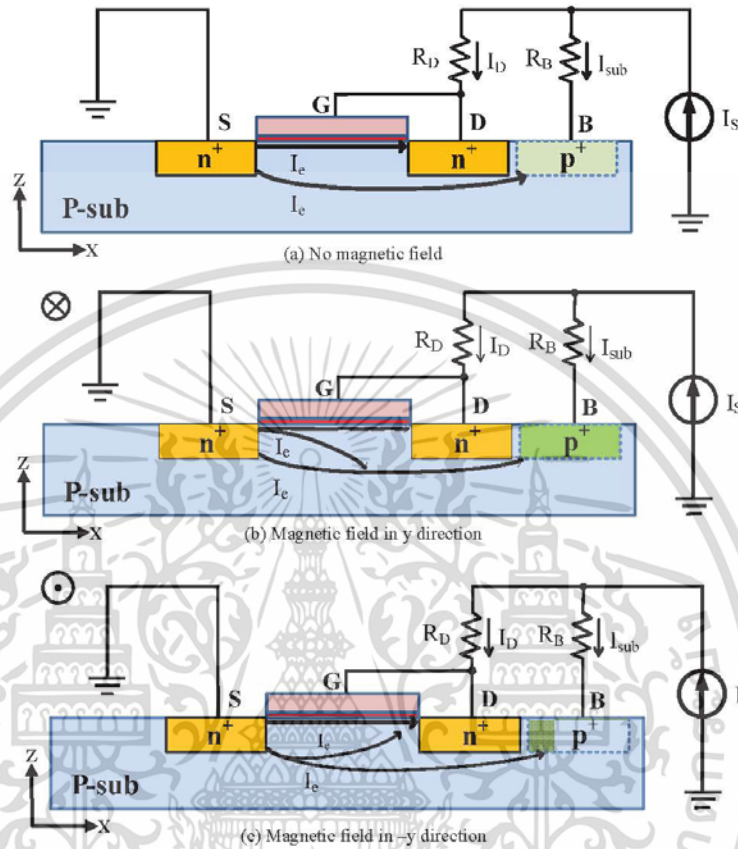


Fig. 9. Model of N-MOSFET for horizontal magnetic detection.

source. The device is current mode of operation biased by constant current source for two currents, drain and substrate currents. The drain current is the channel current of MOSFET and substrate current is from the p-n junction between substrate and source in forward direction. The mechanism is induced Lorentz's force from horizontal magnetic field deflects current between drain and substrate current which causes differential current ΔI related to magnetic field density and direction. The sensitivity depends on amount of bias current.

REFERENCES

[1] Lenz and A. Edelstein , "Magnetic Sensors and Their Application", IEEE Sensors Journal, vol. 6 No.3, 2006, pp.631-649.
 [2] S. M. Rezaul, "A novel 0.7 V high sensitivity complementary differential MAGFET sensor for contactless mechatronic application", Sensors and Actuators, A 161, 2010, pp. 138-149.

[3] Z. Xiaofeng, W. Dianzhong, L. Meiwei, G. Hanyu and L. Gang, Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the nano-polysilicon thin film transistor, J. Semicond, Vol. 35, No. 9,2014
 [4] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk "Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol.3, No:4, 2009.
 [5] J. Marek, D. Donoval, M. Donoval, M. Daricck "Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation" ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems, October 12-16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia.
 [6] S. R. Ashwin, S. Sreejith, U. Sajeshkumar, "TCAD Design of Tunnel FET Structures and Extraction of Electrical Characteristics", International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2013, pp. 2319-7064.
 [7] TCAD Sentaurus Manual, synops sis®, version D-2016.03.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simulation of MOSFET as Horizontal Magnetic MOSFET (MAGFET)

Rattapong Nakachai, Toempong Phetchakul,
Sawatdipong Poonsawat
Department of Electronics, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
e-mail: R.nakachai@gmail.com,
toempong.ph@kmitl.ac.th

Amporn Poyai
Thai Microelectronics Center,
Wangtakien District, AmphurMuang,
Chachoengsao, Thailand
e-mail: Amporn.poyai@nectec.or.th

Abstract—This work proposes the regular long channel MOSFET structure used as magnetic MOSFET (MOSFET that can detect magnetic field) in parallel direction (y-axis). The structure is regular MOSFET that has drain, gate, source and substrate (body). The mechanism of device is Hall effect in current mode between channel MOSFET current and substrate current in x-axis direction. The dimensions of channel MOSFET are 20 μm wide and 20 μm long. The channel and substrate currents are balance adjusted in the same values at 0.5, 1 and 1.5 mA. From the simulation results by TCAD sentaurus, the relative sensitivity of device is 0.01 T^{-1} in y and -y direction, respectively. It can be used as magnetic sensor for one dimension in parallel field.

Keywords—TCAD; MAGFET; MOSFET; hall effect; pn junction

I. INTRODUCTION

The magnetic transistor is the special transistor that is designed for detecting magnetic field perpendicular to bias current of device. There are two main types as well as transistor, bipolar transistor and field effect transistor. The bipolar magnetic sensor is well-known as magnetotransistor that has structure like pnp or npn transistor [1]. The field effect transistor or MAGFET is a kind of magnetic sensor that has split-drain MOSFET structure which also has n-type and p-type [2]. The mechanisms that use for operation are injection modulation and carrier deflection. MAGFET is fabricated by standard MOS or CMOS process which is a good advantage over magneto transistor.

MAGFET generally has dual drain or split-drain that sink carriers injected from the source. The Lorentz's force from magnetic field cross the current act upon the carriers in the inversion layer causes the imbalance drain current related to magnetic field intensity. The device can fabricated in difference shape [3] but the most popular is rectangular shape. It is analyzed by 2D and 3D modeling for magnetic field detection [4, 5]. Because it is compatible to CMOS technology, many applications can do it in the way of CMOS integrated circuit [6]. The complementary structure is developing for high efficiency device. The analysis and modeling are developed in many difference conditions.

In this study, we proposed a new way of regular MOSFET to use as magnetic MOSFET or MAGFET. The basic four terminals are fully used as MAGFET terminals.

The Lorentz's force is the main mechanism for parallel magnetic field detection. The split drain MAGFET is tested before we study the conventional MOSFET by sentaurus TCAD simulation. Sentaurus TCAD is an efficiency tool for microelectronic process, semiconductor devices and varies related physical energy study [7, 8].

II. BASIC THEORY

A. Split Drain MAGFET

The split drain MAGFET is a MOSFET that drain is split in two regions D1 and D2 as shown in Fig. 1. The device operates as normal MOSFET device by gate-substrate biasing and drain current flow from drain-source voltage. The vertical magnetic field induce Lorentz's force perpendicular to inversion layer produces a current imbalance $\Delta I_D = I_{D1} - I_{D2}$ between the two drains. The constant current source should be biased for keeping the constant total drains current I_D to avoid the modulation effect from magnetic field. The geometry of device is related to the output. The relative sensitivity is defined as the drain current difference per magnetic field density per biasing current,

$$S = \Delta I_D / I_D B \quad (1)$$

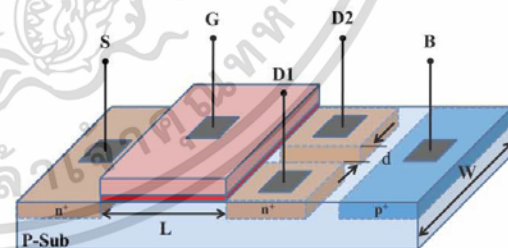


Figure 1. Structure of split drain MOSFET.

where B is magnetic field density. The characteristic $\Delta I_D - B$ usually shows the linear relation as shown in Fig. 2. Fig. 2 is an example of real device but there are many other works that gave the linearly characteristic like this [9]. Even though the linear relation, it is in basic theory that is always developed for get rid of some nonlinear factors in practical

devices. It can operate both in saturation and non-saturation mode. The application is so widely such as discrete device and circuit system.

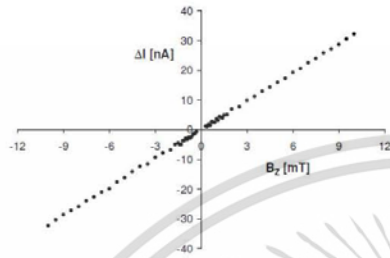


Figure 2. ΔI - B characteristic of split drain MOSFET [10].

B. MOSFET

MOSFET is well known the most importance basic element in electronics. In integrated, MOSFET is the main element for circuit design. Complementary MOS or CMOS is famous for low power consumption in consumer electronics. MOSFET has 4 basic terminals that are drain, gate, source and substrate. Normally, if the opportunity is given, the source and substrate are connected together for no threshold voltage shift ΔV_T from substrate bias effect or body bias effect. The substrate bias is normally in reverse bias because forward voltage will give the substrate current. That is the normally way to use substrate terminal when we always forget that MOS device has only 3 terminals, source, gate and drain. The threshold voltage shift from substrate bias V_{SB} effect is

$$\Delta V_T = -\frac{Q_{SD}}{C_{OX}} = \frac{\sqrt{2e\epsilon_s N_a}}{C_{OX}} \left[\sqrt{2\phi_{fp} V_{SB}} - \sqrt{2\phi_{fp}} \right] \quad (2)$$

where Q_{SD} charge density under gate between source and drain, C_{OX} is oxide capacitance density, N_a is acceptor substrate concentration of NMOS, $2\phi_{fp}$ is potential difference between p type and n type semiconductor. From Equation (1), we define

$$\gamma = \frac{\sqrt{2e\epsilon_s N_a}}{C_{OX}} \quad (3)$$

where γ is defined as the body effect coefficient. Equation (2) may then be written as

$$\Delta V_T = \gamma \left[\sqrt{2\phi_{fp} + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_{fp}} \right] \quad (4)$$

This study will use substrate terminal as a regular device terminal. The substrate will be biased in forward bias for required substrate current as p-n junction current for magnetic detection MOSFET.

C. TCAD sentaurus

TCAD sentaurus program is the well-known commercial program for process simulation [7]. There are model for magnetic simulation. The current density with magnetic field density model used for this study is explain as

$$\vec{J}_\alpha = \mu_\alpha \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha \frac{1}{1 + (\mu_\alpha^* B)^2} \left[\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha + \mu_\alpha^* \vec{B} \times (\mu_\alpha^* \vec{B} \times \vec{g}_\alpha) \right] \quad (5)$$

where $\alpha = n$ or p , \vec{J}_α = carrier current density, \vec{g}_α = current vector without mobility, μ_α^* = the Hall mobility, \vec{B} = the magnetic induction vector and B = the magnitude of this vector.

III. EXPERIMENT

The experiment for simulation is divided in two parts. The first part is for characteristic of device and the second part is for magnetic response of device. The split drain MAGFET is tested before for the magnetic measurement to confirm the accuracy of the simulation model.

A. Device Structure

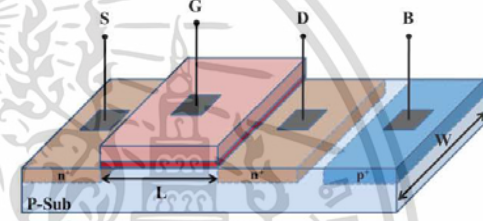


Figure 3. The device structure of conventional MOSFET that use as MAGFET.

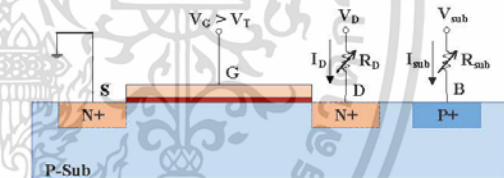


Figure 4. Biasing circuit for N-MOSFET used as MAGFET.

The device structure is shown in Fig. 4. The structure is simple MOSFET that has drain gate source and substrate. In order to facilitate the detection of the magnetic field, the drain is next to the substrate and the source is the opposite side. In other words, this device is a conventional MOSFET device that switches drain and the source itself. All parts are placed in line in X direction. The dimensions of gate is 20 μm long (L) and 20 μm wide (W). The drain and source dimensions are the same 20 x 15 μm^2 . In this study, we also have MAGFET simulation as well as a comparison. The structure and of split drain MAGFET is shown in Fig. 1. The dimension is the same as MOSFET that split drain with the gap between drain 1 μm .

B. Biasing Circuit

The N-MOSFET biasing circuit is shown in Fig. 4. The gate is biased greater than V_T for induced channel. The drain source V_{DS} is bias as usual MOSFET for drain current. The

substrate and source is biased in forward direction for substrate current. The resistor R_D and R_S are used for balancing the drain and substrate current. For the magnetic response, the magnetic density is applied perpendicular to drain and substrate current in parallel direction.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we will discuss the results obtained from the experiments by simulation. It is divided into three parts. In the first part, the properties of the MOSFET used in this study by the MOSFET characteristics and threshold voltage including the effect of substrate bias are discussed. The second part is the test of magnetic model of TCAD sentaurus by testing with the split-drain MAGFET structure. The last part is studied the magnetic responses of MOSFET device.

A. Device Characteristic

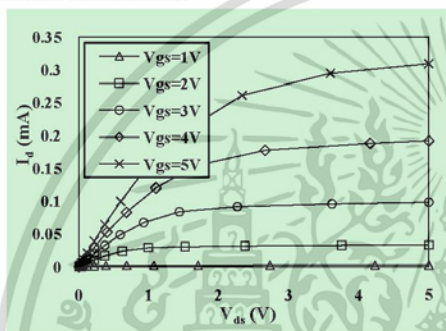


Figure 5. I-V Characteristic of N-MOSFET used as MAGFET.

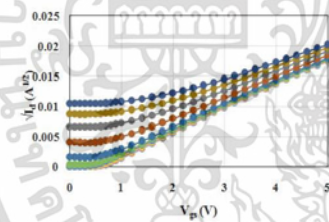


Figure 6. Forward substrate bias effect of N-MOSFET used as MAGFET.

The MOSFET device structure that we have studied here is shown in Fig. 3. The channel length L and width W are the same in $20 \mu\text{m}$. The current-voltage characteristic from simulation is shown in Fig. 5. It shows the typical n-channel enhancement mode MOSFET. The threshold voltage and substrate bias effect by $\sqrt{I_D} - V_G$ plot is shown in Fig. 6. The threshold voltage is less than 0.5 volt for zero substrate bias. For the operation of MOSFET used as MAGFET, the substrate and source have to bias in forward direction as shown before in Fig. 4. The forward bias effect is shown in Fig. 7. It plots between threshold and forward voltage dropped in p-n junction of substrate and source. The V_{TH} is

reduced with the forward substrate bias. The V_{TH} is reduced until the forward voltage 0.6 volt and become negative value when the forward voltage more than 0.6 volt. It shows that the MOSFET changes from enhancement mode to depletion mode. The forward substrate bias effect can be explained by equation (4).

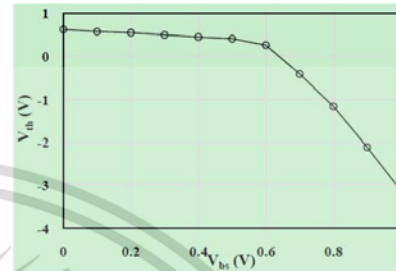


Figure 7. V_{th} (threshold voltage) and V_{bs} (forward substrate bias) plot.

B. Split Drain MAGFET

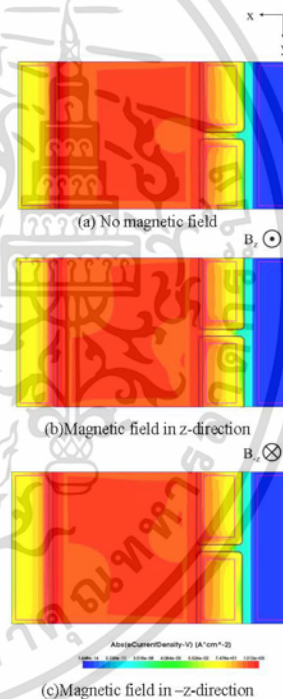


Figure 8. Simulation of current distribution when applied magnetic field of split drain MAGFET.

The simulation of magnetic response is tested via MAGFET structure. The structure of device is shown in Fig.

1. The device is biased as regular MOSFET in enhancement mode with the equal both drain currents. The magnetic field which is applied perpendicular to the current or device surface is defined as z direction. The z direction is magnetic field from substrate to surface and $-z$ is opposite direction. The current density distribution on the surface is shown in Fig. 8. It shows the current deflection by Lorentz's force. Figure 8(a) shows the balancing drain current when no magnetic field. Figure 8(b) and (c) are the case of applied magnetic field in z and $-z$, respectively. The current density is not symmetry and bend to the direction of Lorentz's force. The result of drain current difference ΔI_D and magnetic field density B is shown in Fig. 9. It shows the linearly relation as in the real device as shown in Fig. 2. The sensitivity is the same in both direction and depend on the dimension of device. It proves the model that we use is preliminary enough for magnetic study.

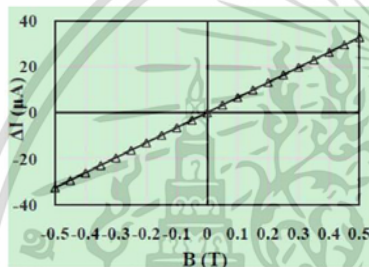


Figure 9. Simulation results of magnetic response of split drain MAGFET.

C. MOSFET used as MAGFET

The MOSFET used in this study has structure shown in Fig. 3. It is normal MOSFET that has drain, gate, source and substrate or body. In generally, it is designed substrate region next to source because source is generally short with substrate for avoiding substrate bias effect. The MOSFET is the symmetry device that drain and source can switch position as long as source is not short to substrate. This position switching does not reduce any the performance down. In Fig. 5, drain is defined as the region near substrate and source is another side one.

The MAGFET is designed split-drain structure for two balance currents for deviation mechanism from induced Lorentz's force. The two currents is need for Hall current mode MAGFET. MOSFET that we used can give another current excluding channel current by forward substrate current of p-n junction. The source injects electrons pass through n channel to drain and injects electrons pass through bulk to substrate ohmic contact region. The two currents are in the same amount and direction in x direction. That is the reason that why drain is defined as the region next to substrate.

Figure 10 is the current density distribution of MOSFET that receives bias in Fig. 4. It shows the injected electron currents from source to drain and substrate. The two

currents are adjusted in balance by R_D and R_{sub} for 0.5, 1 and 1.5 mA. Figure 10(a) shows the electron current density when no magnetic field is applied. The channel current of MOSFET and bulk substrate current from p-n junction are the same. Figure 10 (b) and (c) shows the current density of the case of applied magnetic field in y and $-Y$ direction. When the magnetic is applied in y direction, the current density of substrate current (I_{SUB}) is less than channel drain current (I_D). It can be observed the yellow shade color in bulk is less than in the case of no magnetic field in Fig. 10(a). In the other hand, the channel drain current is greater than substrate current when the magnetic field is applied in $-y$ direction. It is observed that the yellow shade color of substrate is less than in the case of no magnetic field in Fig. 10(a). The plot of difference current between channel drain current and substrate current ($\Delta I = I_D - I_{SUB}$) versus magnetic field density is shown in Fig. 11. It shows the linearly relation along the measurement range. The relative sensitivities from equation (1) are $0,01 \text{ T}^{-1}$. The sensitivities are constant in each biased current. It shows the symmetry deflection between induced channel current by field effect and p-n junction current.

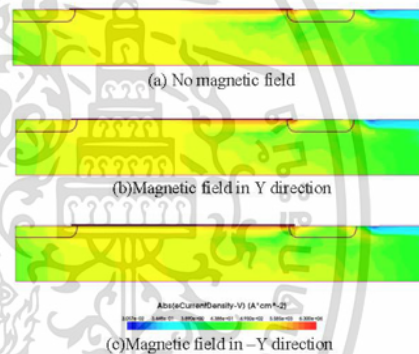


Figure 10. Simulation of current density distribution when applied magnetic field in parallel of N-MOSFET used as MAGFET.

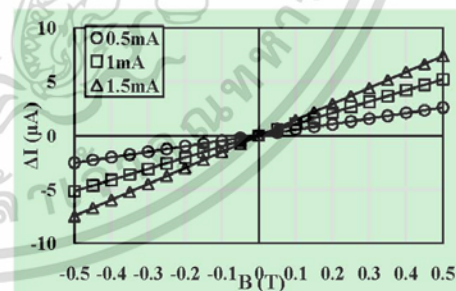


Figure 11. Simulation of magnetic response of N-MOSFET used as MAGFET.

From the simulation results, it is explained by the mechanism diagram shown in Fig. 12. It shows the electron

currents from source to drain by channel and from source to substrate by injection in bulk from biasing circuit. Figure 12(a) is the case of no magnetic field that two currents are equal. Figure 12(b) is the case of applied magnetic field in y direction. The Lorentz's force acts upon electrons into the surface that causes the channel drain current is greater than substrate current. Figure 12(c) is the case of applied magnetic field in $-y$ direction. The Lorentz's force acts upon electrons into the bottom so the substrate current is greater than channel drain current. The deflection between channel current and bulk current mechanisms does freely without any obstruction.

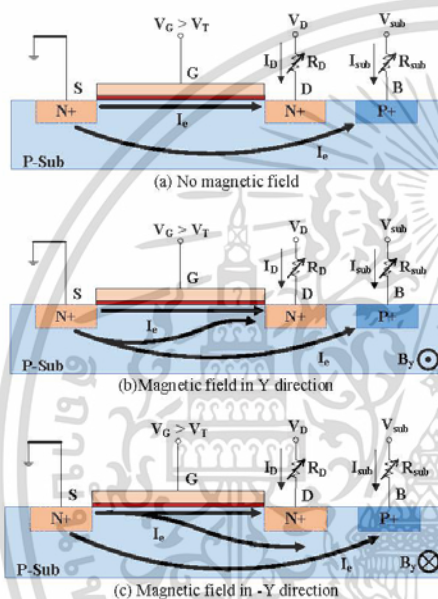


Figure 12. Mechanism of MOSFET for horizontal magnetic detection.

V. CONCLUSION

This paper presents a concept of the MOSFET used as MAGFET for the first time. The structure of device is normal MOSFET that has drain, gate, source and substrate. The substrate contact region is next to drain, all of them are placed in line. It is biased for drain current by gate voltage

and substrate current by forward direction between source and substrate. Electrons are injected to drain via induced channel and substrate current via bulk. Lorentz's force is induced to deflect drain and substrate current depended on horizontal magnetic field direction. The constant sensitivity of both magnetic field direction shows that there is no difference between deflection current mechanism from channel to bulk and bulk to channel. The simulation results show that it can use as horizontal MAGFET.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thanks National Research Cousin of Thailand for financial support.

REFERENCES

- [1] Lenz and A. Edelstein, "Magnetic Sensors and Their Application," *IEEE Sensors Journal*, vol. 6 No.3, 2006, pp.631-649.
- [2] S. M. Rezaul, "A novel 0.7 V high sensitivity complementary differential MAGFET sensor for contactless mechatronic application", *Sensors and Actuators*, A 161, 2010, pp. 138-149.
- [3] Y. Yunruo, Z. Dazhong and G. Qing, "Sector Split-drain magnetic field-effect transistor based on standard CMOS technology" *Sensor and Actuator*, A 121,2005, pp.347-351.
- [4] E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk "Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation", *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* Vol.3, No:4, 2009.
- [5] Juraj Marek, Daniel Donoval, Martin Donoval, Martin Daricek "Analysis of Novel MagFET Structures for Built-in Current Sensors Supported by 3D Modeling and Simulation" *ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor 315 Devices and Microsystems*, October 12-16, 2008, Smolenice Castle, Slovakia.
- [6] G. Qing, Z. Dazhou and Y. Yunruo, "CMOS magnetic sensor integrated circuit with sectorial MAGFET", *Sensor and Actuator*, A 126, 2006, pp. 154-158.
- [7] S. R. Ashwin, S. Sreejith, U. Sajeshkumar, "TCAD Design of Tunnel FET Structures and Extraction of Electrical Characteristics", *International Journal of Science and Research (IJSR)* ISSN (Online): 2013, pp. 2319-7064.
- [8] TCAD Sentaurus Manual, synopsis®, version L-2016.03.
- [9] Zhao Xiaofeng, Wen Dianzhong, Lu Meiwei, Guan Hanyu, and Liu Gang, "Fabrication and characterization of the split-drain MAGFET based on the nano-polysilicon thin film transistor", *Journal of Semiconductors*, Vol. 35, No. 9, September, 2014.
- [10] Martin Daricek, Martin Donoval, Alexander Šatka, Tomáš Košík, "Characterization of MagFET structures", *15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 2008, pp. 1233 - 1236.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายรัฐพงษ์ นาคาไชย
วัน เดือน ปีเกิด	20 กรกฎาคม พ.ศ. 2523
ที่อยู่	293/148 (เฟส4) ม.เพอร์เฟค พาร์ค-สุวรรณภูมิ ถ.ร่มเกล้า ช.ร่มเกล้า 6/1 แขวง/เขตมีนบุรี กทม. 10510
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2551 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญ	1) การออกแบบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2) การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก 3) การจำลองแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยโปรแกรม Sentaurus TCAD
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรอาวุโส แผนกวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ร้านสาขา บริษัท ซีพี ออลล์ จำกัด(มหาชน)
พ.ศ. 2564-ปัจจุบัน	ตำแหน่งกรรมการผู้จัดการ บริษัท เอสพีเจ เอ็ดดูเคท อินโนเวชั่น จำกัด
พ.ศ. 2561-2563	ตำแหน่งที่ปรึกษาอาวุโส ด้านเทคโนโลยีดิจิทัล ทรานพอร์เมชัน บริษัท โรงสี ช้อนทอง จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้