

การศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟต

STUDY ON EFFECT OF GAMMA IRRADIATED ON MOSFET



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-D-018-140

การศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟต

STUDY ON EFFECT OF GAMMA IRRADIATED ON MOSFET



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-D-018-140

การศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟต

STUDY ON EFFECT OF GAMMA IRRADIATED ON MOSFET

อมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์

AMONRAT KERDPRADIST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

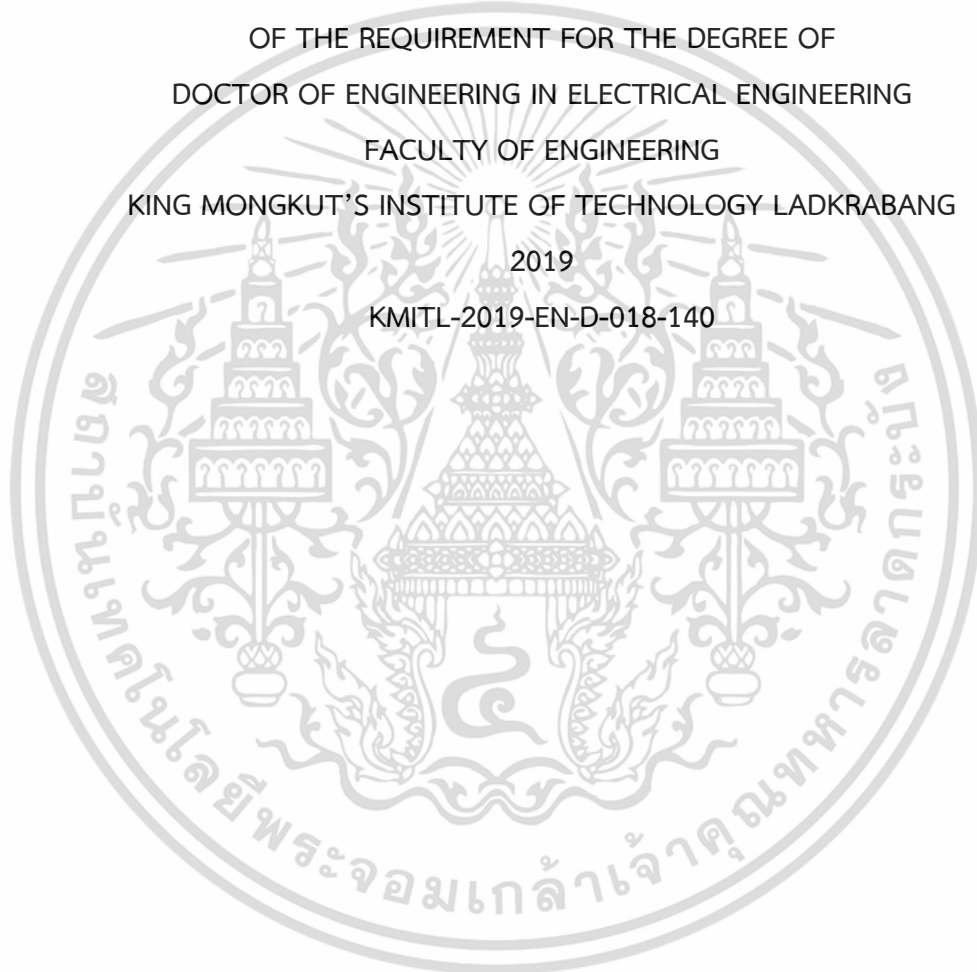
KMITL-2019-EN-D-018-140

STUDY ON EFFECT OF GAMMA IRRADIATED ON MOSFET

AMONRAT KERDPADIST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-D-018-140



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟต
Thesis Title	STUDY ON EFFECT OF GAMMA IRRADIATED ON MOSFET
ชื่อนักศึกษา	นางสาวอมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์
รหัสประจำตัว	58601008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟท
นักศึกษา	นางสาวอมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์
รหัสประจำตัว	58601008
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอผลกระทบของรังสีแกมมาบนอุปกรณ์มอสเฟท เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหัววัดรังสีแกมมา เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีที่ก่อไอออนในชั้นออกไซด์ ส่งผลกระทบทำให้พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟทนั้นเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำการศึกษาทั้งพีมอส (PMOS) และเอ็นมอส (NMOS) ที่ความหนาของเกตออกไซด์ (gate oxide) เท่ากับ 15 นาโนเมตร มีความกว้างช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร และมีความยาวช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟทเมื่อได้รับรังสีแกมมาด้วยโคบอลต์-60 ที่ปริมาณต่างๆกัน พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในอัตรา 30.32 mV/kGy สำหรับเอ็นมอส และ มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในอัตรา 28.07 mV/kGy สำหรับพีมอส และผลกระทบของรังสีแกมมาทำให้สภาพคล่องพาหะ (surface mobility) มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความนำถ่ายโอนมีค่าลดลงทั้งในพีมอสและเอ็นมอส จากการศึกษายังพบว่า เมื่อความยาวช่องทางเดินกระแสลดลง จะมีผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลง แต่ค่าความนำถ่ายโอนสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในเอ็นมอสและพีมอส

Thesis	Study on effect of gamma irradiated on MOSFET
Student	Ms. Amonrat Kerdpradist
Student ID.	58601008
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Rangson Muanghlua
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the effect of gamma rays on MOSFET devices in order to serve as a guideline for the development of a gamma-ray dosimeter. Gamma rays involve ionization in oxide layer of MOSFET. Which have a significant effect on the electrical parameters of MOSFET devices because gamma rays involve ionizing radiation. By studying both PMOS and NMOS at the gate oxide thickness of 15 nanometres, the width of the channel is 20 micrometres and the length of the channel is 20 micrometres. A comparative study was carried out concerning the changes in the electrical properties of MOSFET when exposed to gamma rays emitted by a cobalt-60 source, total dosage varying from 1 to 10 kGy. The results suggested that the threshold voltage was decreased ratio by 30.32 mV/kGy for NMOS and decreased ratio by 28.07 mV/kGy for PMOS. Furthermore the effect of gamma radiation causes the surface mobility to decrease the maximum transconductance values in both PMOS and NMOS. In addition, when the length of the channel were decreased causes the threshold voltage to decrease but the maximum transconductance values were increase in both NMOS and PMOS.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ และรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งที่ได้รับ การสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาที่ติดต่อมารวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กรรมการพิจารณาหัวข้อ ที่คอยให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ดร.อนุชา เรืองพานิช และดร.จิรวัดน์ ปราบเขต และดร.อัมพร โพธิ์ไย ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความรู้ และ ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองและสนับสนุนอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้จนกระทั่งประสบความสำเร็จได้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณอรุณศรี ศรีธนะอิทธิพล และ ดร.ใจรัก เอื้อชูเกียรติ สำนักงานจัดการสิทธิเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ความรู้ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การ อบรมสั่งสอน

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและนักศึกษาปริญญาเอก ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กันเสมอมา

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้คุณปู่ กระแจะ เกิดประดิษฐ์ และบิดา มารดา ของข้าพเจ้า คุณพิชิต เกิดประดิษฐ์ และคุณสลักจิต เกิดประดิษฐ์

ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

อมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทำงานของมอสเฟต.....	6
2.1 โครงสร้างของมอสเฟต (MOSFET Structure).....	6
2.1.1 คุณสมบัติและการทำงานของมอสคาปาซิสเตอร์.....	8
2.2 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสเฟต.....	11
2.2.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสเฟต	11

2.2.2	การวิเคราะห์สมการกระแสของมอสเฟต.....	14
2.2.3	การวิเคราะห์แบบกฎกำลังสอง	16
2.2.4	ความนำถ่ายโอน หรือ ทรานส์คอนดักแตนซ์	21
2.2.5	กระแสในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม	22
2.2.6	ประจุไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ของมอสคาปาซีเตอร์.....	22
2.2.7	ผลของประจุในออกไซด์.....	26
2.3	ผลกระทบการฉายรังสีและสภาพแวดล้อมการแผ่รังสี.....	26
2.3.1	ผลกระทบของการแผ่รังสีของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟต.....	27
2.3.1.1	การเลื่อนของแรงดันขีดเริ่ม	28
2.3.1.2	การลดลงของค่าความนำไฟฟ้า.....	29
2.3.1.3	การเพิ่มขึ้นของกระแสขั้วเทอร์สโสลด์.....	30
2.4	การพัฒนาอุปกรณ์มอสเฟตขนาดเล็ก.....	31
บทที่ 3	กระบวนการสร้างมอสเฟตและกระบวนการทดลอง.....	33
3.1	การออกแบบโครงสร้างมอสเฟต.....	33
3.1.1	การออกแบบโครงสร้างมอสคาปาซีเตอร์.....	33
3.1.2	การออกแบบโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์.....	38
3.2	กระบวนการสร้างซีมอสทรานซิสเตอร์	39
3.3	การฉายรังสีแกมมาและการจัดวางอุปกรณ์มอสเฟต	44
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ	47
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง.....	48
4.1	การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าความจุไฟฟ้าของมอสคาปาซีเตอร์ เพื่อหาค่าแรงดันแถบเรียบ.....	48
4.2	การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์.....	58
4.3	การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน	64

สารบัญ (ต่อ)

4.4 ผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าสภาพคล่องของประจุพาหะ (μ)	69
4.5 การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าความนำถ้ายอน (g_m)	79
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	93
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	117



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบโครงสร้างเอ็นมอสเฟตและพีมอสเฟต.....	38
3.2 แสดงเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีแกมมาด้วยรังสีโคบอลต์-60 ที่พลังงาน 1.25 MeV ที่ อุณหภูมิห้อง.....	46
4.1 ค่าแรงดันแถบเรียบ (flat band voltage) จากกราฟอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกต ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์.....	56
4.2 แสดงค่าแรงดันพังทลายของชั้นเกตออกไซด์ ก่อนและหลังได้รับปริมาณรังสีแกมมาค่าต่างๆ.	57
4.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟตและพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	59
4.4 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	70
4.5 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 1 กิโลเกรย์.....	71
4.6 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด	

W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 2 กิโลเกรย์.....	71
4.7 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 กิโลเกรย์.....	71
4.8 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 7 กิโลเกรย์.....	72
4.9 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์.....	72
4.10 สภาพคล่องของประจุพาหะ (μ) ของ nMOSFETs ที่มีขนาด W/L=20/0.8 μm และ W/L=20/20 μm	73
4.11 สภาพคล่องของประจุพาหะ (μ) ของ pMOSFETs ที่มีขนาด W/L=20/0.8 μm และ W/L=20/20 μm	75
สารบัญตาราง	
ตารางที่	หน้า
4.12 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	75
4.13 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 1 กิโลเกรย์.....	76
4.14 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 2 กิโลเกรย์.....	76
4.15 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 กิโลเกรย์.....	76
4.16 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 7 กิโลเกรย์.....	77
4.17 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/20 μm หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์.....	77
4.18 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็น มอสเฟทที่มีขนาด W/L=20/0.8 μm	82

4.19 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$	83
4.20 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$	85
4.21 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$	86
4.22 ค่าความนำถ่ายโอนสูงสุด (maximum transconductance) ของ nMOSFETs ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$	88
4.23 ค่าความนำถ่ายโอนสูงสุด (maximum transconductance) ของ pMOSFETs ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การนำมอสเฟตไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ.....	1
1.2 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum).....	3
1.3 แสดงปริมาณของรังสีชนิดก่อไอออน ที่พบในธรรมชาติ.....	3
2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอสคาปาซิเตอร์.....	6
2.2 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุมอสคาปาซิเตอร์ในสถานะต่างๆ (ก.) สถานะสะสม (ข.) สถานะการปลดพาหะ (ค.) สถานะผ่นกลับ.....	7
2.3 แสดง (ก) การเกิดสนามไฟฟ้าบนโลหะแผ่นตัวเก็บประจุแบบขนาน (ข) การเกิดสนามไฟฟ้าบนมอสคาปาซิเตอร์ (ค) การเกิดสะสมประจุบวกหรือโฮลในมอสคาปาซิเตอร์.....	8
2.4 แสดง (ก) ผลของการไบอัสแรงดันบวกที่ขั้วเกตและทิศทางของสนามไฟฟ้า (ข) การเกิดย่านปลอดประจุ ในมอสคาปาซิเตอร์ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสบวกค่าหนึ่ง (ค) การเกิดย่านปลอดประจุ และ electron inversion layer ในมอสคาปาซิเตอร์.....	8
2.5 แสดง (ก) แสดงผลของการไบอัสแรงดันบวกที่ขั้วเกตของ มอสคาปาซิเตอร์ฐานรองสารชนิดเอ็น (ข) แสดงการเกิดย่านปลอดประจุในมอสคาปาซิเตอร์ เมื่อให้แรงดันไบอัสลบที่เกตค่าหนึ่ง	

(ค) แสดงการเกิด space charge region และ hole inversion layer ในมอสคาปาซีเตอร์ เมื่อให้ไบอัสลบที่เกตมากขึ้น	9
2.6 แสดง (ก) แสดงโครงสร้างของ n-channel enhancement mode MOSFET	
(ข) แสดงรูปภาพตัดขวางของ n-channel enhancement mode MOSFET และ	
(ค) แสดงสัญลักษณ์ ของ n-channel enhancement mode MOSFET.....	10
2.7 แสดง (ก) แสดงภาคตัดขวางของ n-channel MOSFET ก่อนที่จะเกิดชั้นผันแปร	
(ข) แสดงภาคตัดขวาง หลังจากเกิดชั้นผันแปร.....	11
2.8 คุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเดรนที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆของมอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล	13
2.9 คุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเกตของมอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล.....	13
2.10 แสดง (ก) โครงสร้างของมอสเฟทชนิดเอ็นแชนแนล ขณะที่ $V_G > V_T$ และ $V_D < V_{D(sat)}$ และ	
(ข) ลักษณะรูปร่างของแชนแนล.....	15

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.11 คุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน I_D-V_D ของมอสเฟทที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆ ขณะทำงานในย่านเชิงเส้น ซึ่งเป็นช่วงที่แรงดันเดรนมีค่าต่ำๆ.....	21
2.12 ลักษณะคุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน I_D-V_D ของมอสเฟทที่แรงดันเกต V_G ขณะทำงานอยู่ในย่านไม่อิ่มตัว และย่านอิ่มตัว.....	21
2.13 ประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆและตำแหน่งที่เกิด ภายในโครงสร้างของมอส.....	23
2.14 แผนภาพของผลกระทบการเหนี่ยวนำโดยการแผ่รังสีก่อไอออนในอุปกรณ์มอสเฟท.....	27
2.15 แสดงตำแหน่งที่เกิดประจุกับดักใน PMOS.....	28
2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันไฟฟ้าเกต I_D-V_{GS} เมื่อปริมาณรังสีเปลี่ยนแปลง.....	29
2.17 การเพิ่มขึ้นของกระแสขีดเริ่มฐานในทรานซิสเตอร์ช่องทางเดินกรชนิดเอ็น.....	30
2.18 แสดงแนวโน้มของความยาวเกต (หน่วย:ไมโครเมตร) ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละปี.....	31
3.1 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Area และ (ข) การออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์โครงสร้าง Poly/Psub_Area	

และ(ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์โครงสร้างPoly/Psub_Area.....	34
3.2 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Psub_Perि และ(ข) การ ออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์โครงสร้าง Poly/Psub_Perि และ(ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์โครงสร้าง Poly/Psub_Perิ...	35
3.3 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Nwell_Area และ(ข) การ ออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Area และ(ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Area.	36
3.4 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Nwell_Perิ และ (ข) การ ออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Perิ และ(ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Perิ..	37
3.5 ฐานรองซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดพี ระบาย (100)พิักัดความต้านทาน 20-25 โอห์ม-เซนติเมตร.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แสดงส่วน p-Well และ n-Well ที่สร้างบน Psub	39
3.7 แสดงส่วน LOCOS	40
3.8 ขั้นตอนการสร้างเกตด้วยโพลีซิลิคอน.....	40
3.9 ขั้นตอนการยิงฝังประจุ LDD.....	40
3.10 ขั้นตอนการสร้าง Sidewall Spacer.....	41
3.11 ขั้นตอนการยิงฝังประจุส่วนซอส/เดรน.....	41
3.12 ขั้นตอนการสร้างชั้นอินเตอร์เลย์เยอร์ไดอิเล็กตริก.....	41
3.13 ขั้นตอนการกัดรูเชื่อมต่อ (Contact)	42
3.14 ขั้นตอนการสร้างชั้นโลหะ 1	42
3.15 ขั้นตอนการกัดลวดลายชั้นโลหะ 1.....	42
3.16 ขั้นตอนการสร้างชั้นอินเตอร์เมเทิลไดอิเล็กตริก.....	43
3.17 ขั้นตอนการกัดรูเชื่อมต่อ Via.....	43
3.18 ขั้นตอนการสร้างชั้นโลหะ 2.....	43
3.19 ขั้นตอนการกัดลวดลายชั้นโลหะ 2.....	44
3.20 ขั้นตอนการสร้างชั้น Passivation และเปิด PAD.....	44

3.21	ไดอะแกรมการทดลองการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟท.....	45
3.22	แสดงการจัดวางอุปกรณ์มอสเฟท ภายในห้องฉายรังสีแกมมาของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)	46
3.23	แสดงเครื่อง Precision semiconductor parameter analyser B-1500A.....	47
3.24	แสดงเครื่อง Probe station Cascade Microtech รุ่น M150.....	47
4.1	แสดงวงจรทดสอบค่าความจุไฟฟ้าของ MOS Capacitor.....	49
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ ของโครงสร้าง Poly/Nwell_Area ก่อนและหลังจากรับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	50
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ของโครงสร้าง Poly/ Nwell_Perि ก่อนและหลังจากรับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	51
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ของโครงสร้าง Poly/ Psub_Area ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ของโครงสร้าง Poly/ Psub_Perิ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์	53
4.6	กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของบริเวณ Poly/ Nwell_Area ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	54
4.7	กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของบริเวณ Poly/ Nwell_Perิ ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	54
4.8	กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของบริเวณ Poly/Psub_Area ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	55
4.9	กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของบริเวณ Poly/Psub_Perิ ก่อนได้รับรังสีแกมมา.....	55
4.10	วงจรทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสทรานซิสเตอร์ที่ย่านเชิงเส้น.....	58
4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงขีดขีดเริ่มต่อความยาวช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20, 1.2, 0.8, 0.7, 0.6 ไมโครเมตร ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา 1 กิโลเกรย์.....	60

4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของมอสชนิดเอ็น ($W/L=20/0.8$) ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา ความเข้ม 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	61
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของมอสชนิดเอ็น ($W/L=20/20$) ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา ความเข้ม 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	61
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟท ($W/L=20/20$) ที่ได้รับรังสีแกมมา เท่ากับ 0, 1, 2, 4, 7, 10 กิโลเกรย์.....	62
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	63
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0, 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์.....	64
4.18 วงจรทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรนของมอสทรานซิสเตอร์.....	65
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า ($I_{DS}-V_{DS}$) ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์.....	66
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า ($I_{DS}-V_{DS}$) ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์.....	66
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรนอิมิตัวของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0, 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์.....	67
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า ($I_{DS}-V_{DS}$) ของพีมอสเฟท ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์.....	68
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า ($I_{DS}-V_{DS}$) ของพีมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์.....	68
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรนอิมิตัวของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0, 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์.....	69

4.25	กราฟหาค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน และแรงดันเกตของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$	70
4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน I_{DS} ต่อแรงดันเดรน V_{DS} ของมอสเฟตชนิดเอ็น $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา เท่ากับ 10 กิโลเกรย์.....	74
4.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ THETA (Θ) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ กับปริมาณรังสีแกมมาขนาดต่างๆ.....	74
4.28	แสดงการสกัดพารามิเตอร์ THETA (Θ) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสี.....	78
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่าง THETA (Θ) ที่เหนี่ยวนำให้สภาพคล่องตัวพาหะลดลงกับปริมาณรังสีขนาดแกมมาต่างๆ ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสี.....	78
สารบัญรูป (ต่อ)		
รูปที่		หน้า
4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	79
4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	80
4.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	80
4.33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	81
4.34	กราฟความสัมพันธ์ G_m-V_{GS} ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	84
4.35	กราฟความสัมพันธ์ G_m-V_{GS} ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	84
4.36	กราฟความสัมพันธ์ G_m-V_{GS} ของพีมอสเฟต ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์.....	87
4.37	กราฟความสัมพันธ์ G_m-V_{GS} ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20//20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลัง	



รายการสัญลักษณ์

C_{ox}	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสารออกไซด์ ต่อ 1 หน่วยพื้นที่
t_{ox}	คือ ค่าความหนาของออกไซด์โลหะ
ϵ_{ox}	คือ ค่าคงที่ของโลหะออกไซด์ (oxide permittivity) $=8.85 \times 10^{-14}$ F/cm
C	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของมอสคาปาซิเตอร์
C_d	คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะ
B	คือ บอดี้
S	คือ ซอส
D	คือ เดรน
G	คือ เกต
L	คือ ค่าความยาวของช่องทางเดินกระแส
W	คือ ค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส
Si	คือ ซิลิคอน
SiO_2	คือ ซิลิคอนไดออกไซด์
V_{GS}	คือ แรงดันเกต
V_{DS}	คือ แรงดันเดรน
I_{DS}	คือ กระแสเดรน
$I_{DS(sat)}$	คือ กระแสเดรนอิ่มตัว
V_P	คือ แรงดันพินชออฟ
$V_{DS(sat)}$	คือ แรงดันเดรนอิ่มตัว
V_{FB}	คือ แรงดันแถบเรียบของมอสเฟท
g_m	คือ ความนำถ่ายไอออน
V_T	คือ แรงดันขีดเริ่ม

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

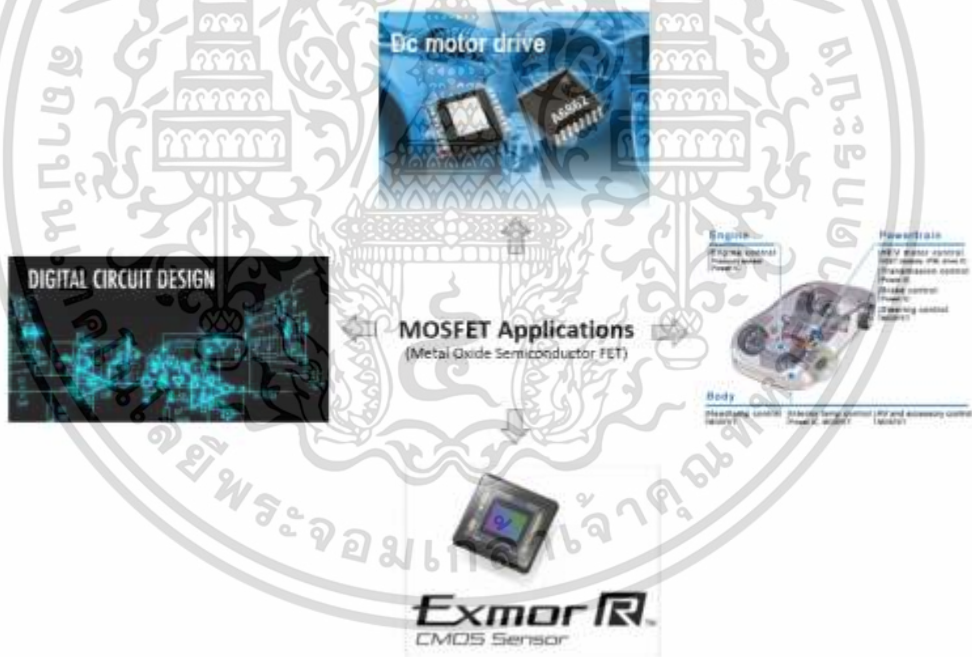
K_{oxide}	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นออกไซด์
β	คือ พารามิเตอร์ของมอสเฟต
μ_n	คือ สภาพคล่องของประจุพาหะที่ผิว
μ_n	คือ สภาพคล่องของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสแนวตั้ง
Q_{dm}	คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำ
ϕ_F	คือ ศักย์เฟอร์มิ
ϕ_M	คือ ศักย์เฟอร์มิของโลหะ
ϕ_S	คือ ศักย์เฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
Q_i	คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในออกไซด์ และที่ผิวสัมผัส
ΔN_{ot}	คือ ความหนาแน่นของ oxide-trapped charge
ΔN_{it}	คือ ความหนาแน่นของ interface charge
e	คือ ประจุอิเล็กตรอน
μ_o	คือ ค่าความคล่องตัวของ low field surface
α_{it}	คือ สัมประสิทธิ์ของผลกระทบของ oxide-trapped charge
α_{ot}	คือ สัมประสิทธิ์ของผลกระทบของ interface states

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์มอสเฟตเข้ามามีบทบาทกับในโลกปัจจุบันมากขึ้น หลังจากมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้หลายด้าน ตัวอย่างเช่นเป็นส่วนประกอบสำคัญในส่วนประกอบในหน่วยประมวลผล (central processing unit :CPU) หน่วยความจำ (mosfet memory cell) Steering Control ของรถยนต์ไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supplies) เครื่องขยายสัญญาณ (RF amplifiers), เครื่องขยายเสียง (audio amplifiers,) จอแสดงภาพ (visual displays) เซ็นเซอร์ภาพ (image sensors), อินเทอร์เน็ต เครื่องขยายมือถือไร้สาย หรือในดาวเทียม เป็นต้น แสดงดังรูป 1.1

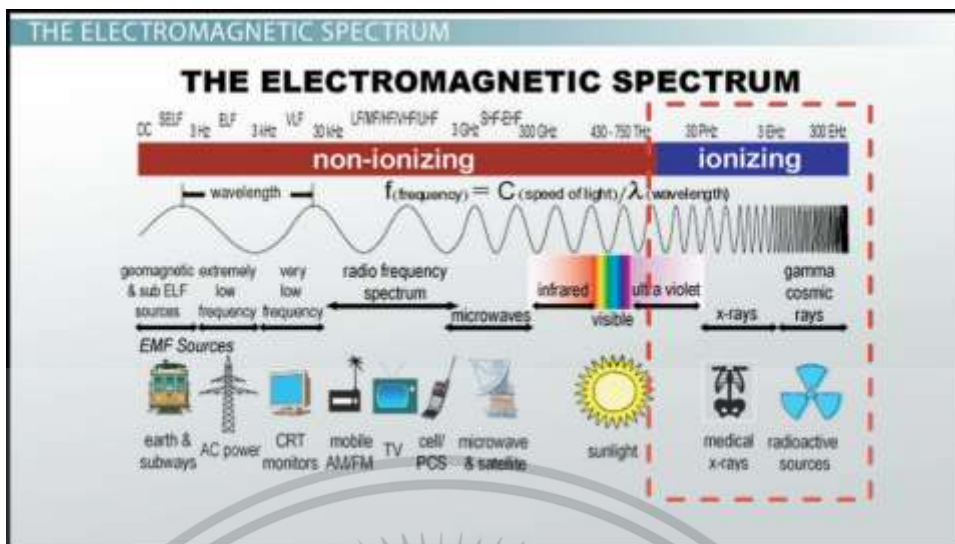


รูปที่ 1.1 การนำมอสเฟตไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ

ซึ่งจุดเด่นของเฟต คือ มีค่าความต้านทานอินพุตสูง ดังนั้นเกตจะใช้กำลังไฟน้อยมาก เฟตสามารถผลิตได้ง่าย มีขนาดเล็ก และสามารถเปิดและปิดกระแสได้รวดเร็ว ภายใน 0.5 ไมโครวินาที แต่มีจุดด้อยคือซำรุดได้ง่ายเมื่อถูกไฟฟ้าสถิต และมีจุดอ่อนต่อรังสีหรืออนุภาคใดๆ ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของเพทชนิดนี้เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับรังสี จากข้อจำกัดนี้จึงนำมาสู่การนำอุปกรณ์มอสเพทมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตัวตรวจจับรังสี หรือ อุปกรณ์วัดปริมาณกัมมันตรังสี (dosimeter) ที่ใช้หลักการตรวจจับไอออนไนเซชัน (ionization) นั่นคือ รังสีก่อไอออน แสดงดังรูป 1.2 ซึ่งเป็นรังสีที่มีพลังงานสูง และมีพลังงานที่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางที่รังสีนั้นวิ่งผ่าน เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งโดยทางตรงหรือทางอ้อม เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีนิวตรอน รังสีชนิดก่อไอออนนี้ยังเป็นรังสีที่สามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และทำให้เกิดอันตรายได้หากไม่ได้รับการป้องกันอย่างถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยที่มีมาก่อนนั้นเป็นการพัฒนาวัสดุที่ใช้ในการป้องกันรังสีแกมมาที่ทำให้อุปกรณ์มอสเพทเปลี่ยนแปลง หรือ การทำให้อุปกรณ์มอสเพททนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ในสภาพแวดล้อมอวกาศ การทดลองฟิสิกส์พลังงานสูง หรือ สภาพแวดล้อมนิวเคลียร์ เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้รังสี เพื่อประโยชน์ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง โดยใช้ในทางการแพทย์มากที่สุด ถัดมาเป็นการใช้ ในทางอุตสาหกรรม การเกษตร การค้นคว้าศึกษาวิจัย ฯลฯ สิ่งของบางอย่างที่เราคาดไม่ถึงว่า มีการใช้สารกัมมันตรังสี ก็ปรากฏว่ามีการใช้สารกัมมันตรังสีเป็นส่วนประกอบ เช่น เครื่องเตาไฟฟ้าใหม่ที่ติดตั้งตามบ้าน สายล่อฟ้า สารเรืองแสงในหน้าปัดนาฬิกา หรือรังสีที่พบในธรรมชาติ แสดงดังรูป 1.3 เช่น รังสีคอสมิกจากอวกาศ รังสีจากพื้นโลก หรือ รังสีจากมนุษย์สร้างขึ้น รังสีจากแพทย์เป็นเพียงส่วนหนึ่งของรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งรวมถึงรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โรงงานอุตสาหกรรม เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นต้น ซึ่งหากมนุษย์ที่อยู่โรงงานนิวเคลียร์หรือบุคคลากรทางการแพทย์ที่ใช้รังสีแกมมา ได้รับปริมาณรังสีก่อไอออนมากกว่า 50 Gy แล้ว จะส่งผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้ร่างกายเกิดตะคริว สั่น ง่วงซึม ตาพร่ามัว และโคม่าได้ ดังนั้นอุปกรณ์วัดปริมาณกัมมันตรังสีจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากรังสีต่างๆดังกล่าว



รูปที่ 1.2 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum)



รูปที่ 1.3 แสดงปริมาณของริงสีชนิดก่อไอออน ที่พบในธรรมชาติ

การตรวจสอบรังสีประเภทต่างๆ ในปัจจุบันสามารถตรวจสอบด้วย เครื่องตรวจวัดรังสีหลายประเภท เช่น ไกเกอร์เคาน์เตอร์ (Geiger counters) หรือ เครื่องตรวจจับความร้อน (Thermoluminescent detectors : TLDs) ซึ่งไกเกอร์เคาน์เตอร์ (Geiger counters) อาจถูกกำหนดและแสดงอัตราปริมาณรังสี (mRad / hr) หรือปริมาณรวม (Rads) ของการได้รับรังสีตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาจริง อย่างไรก็ตามตัวนับไกเกอร์เคาน์เตอร์ (Geiger counters) นั้น มีราคาค่อนข้างแพง ในส่วนของเครื่องตรวจจับความร้อน (Thermoluminescent detectors : TLDs) นั้นใช้การกำหนดปริมาณรังสีตามการปล่อยโฟตอน เพื่อตอบสนองต่อการใช้ความร้อน TLDs อาจมีราคาไม่แพงนัก แต่สามารถอ่านได้หลังจากผ่านช่วงเวลาการเปิดรับแสง โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่างหนึ่งถึงสามเดือน ระดับของการได้รับรังสีอาจถูกกำหนดหลังจากใช้งานจริงเท่านั้น ซึ่งไม่ใช่ข้อมูลปริมาณรังสีตามเวลาจริง (real time)

จากข้อกำหนดของอุปกรณ์ตรวจจับรังสีที่มีมาก่อนนั้น จึงได้ศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาลงบนอุปกรณ์มอสเฟต ซึ่งรังสีแกมมาอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟตเปลี่ยนแปลงไป แต่เนื่องจากอุปกรณ์มอสเฟตนั้นมีจุดเด่นที่มีต้นทุนต่ำและสามารถวัดค่าปริมาณรังสีได้โดยตรง ในทั้งในสถานะไบอัสเกตหรือไมไบอัสเกต (active หรือ passive) ขณะที่ทำการรับรังสี ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่จำเป็น เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพี ก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมา (Gamma-ray)
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่ทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage) ของอุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพีเปลี่ยนแปลง
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่ทำให้เกิดค่าสภาพคล่องของพาหะ (surface mobility) ของอุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพีเปลี่ยนแปลง
4. เพื่อศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่ทำให้ค่าความนำถ่ายโอนสูงสุด (maximum trans conductance) ของอุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพีเปลี่ยนแปลง
5. เพื่อศึกษาทฤษฎีแบบจำลอง SPICE model ของอุปกรณ์มอสเฟตชนิดเอ็นและชนิดพีต่อรังสีแกมมา เพื่ออธิบายผลรวมของอัตราปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของประจุบริเวณอินเทอร์เฟซ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตนั้น จะเห็นได้ว่าโครงสร้างบริเวณขั้วหรือขาเกทนั้นมีซิลิกอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นส่วนที่เป็นโลหะ ซึ่งรังสีแกมมานั้นเป็นรังสีก่อไอออน

เมื่อทำการฉายรังสีแกมมาลงบนอุปกรณ์มอสเฟต ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของคู่อิเล็กตรอนโฮล ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณซิลิกอนไดออกไซด์ ส่งผลทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มทำงาน (on/off) การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันขีดเริ่มนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับรังสีกัมมาไอออนได้

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ผลกระทบของรังสีแกมมาบนอุปกรณ์มอสเฟทชนิดเอ็นและชนิดพี โดยทำการศึกษาคคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟทก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหัววัดรังสีแกมมา

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคคุณสมบัติของรังสีแกมมาบนอุปกรณ์มอสเฟทชนิดเอ็นและชนิดพี โดยการเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสีบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้เป็นเครื่องตรวจจับรังสี จากนั้นออกแบบและศึกษาโครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟทที่มีความกว้างช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร และมีความยาวช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20, 1.2, 0.8, 0.7 และ 0.6 ไมโครเมตร จากนั้นทำการฉายรังสีแกมมาด้วยโคบอลต์-60 (Co-60) จาก 1 ถึง 10 กิโลเกรย์ ลงบนอุปกรณ์มอสเฟทดังกล่าว โดยทำการฉายซ้ำ 5 รอบ นำผลการทดลองต่างๆมาสังเกตุคุณสมบัติทางไฟฟ้าและพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุปกรณ์ได้รับรังสีแกมมา และทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟทชนิดเอ็นและชนิดพี

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้วิจัย ขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมอสคาปาซิเตอร์และอุปกรณ์มอสเฟท โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของโครงสร้างอุปกรณ์มอสเฟท

บทที่ 3 เป็นกระบวนการออกแบบอุปกรณ์มอสเฟท และการเตรียมการทดลอง

บทที่ 4 เป็นผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะกล่าวถึงผลการทดสอบจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์มอสเฟทก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมา

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและวิจารณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

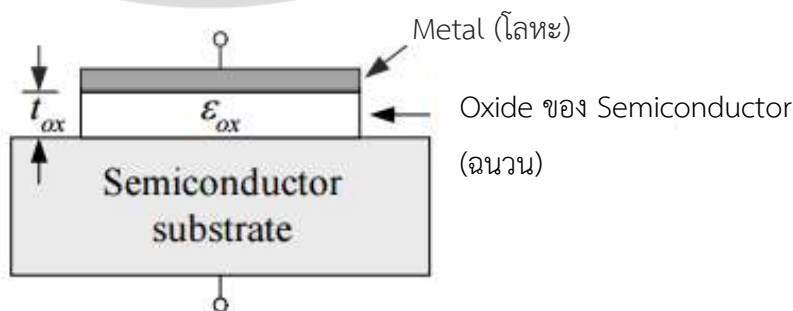
บทที่ 2

ทฤษฎีและการทำงานของมอสเฟท

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาลงบนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอสเฟท บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีของมอสคาปาซิเตอร์และมอสเฟท หลักการวิเคราะห์ผลกระทบของการแผ่รังสีที่มีต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟท ได้แก่ แรงดันขีดเริ่มเลื่อน (Threshold Voltage Shift) และ สภาพคล่องพาหะ (surface mobility) และค่าความนำถ่ายโอนสูงสุด (maximum trans conductance)

2.1 โครงสร้างของมอสเฟท (MOSFET Structure)

มอสทรานซิสเตอร์เป็นโครงสร้างมอสพื้นฐาน เรียกว่า มอสคาปาซิเตอร์ กับสองรอยต่อพีเอ็นที่อยู่ด้านข้างของเกต ภายใต้สภาวะปกติจะจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ไปยังขั้วเกตเพื่อสร้างสนามไฟฟ้า ให้ทำหน้าที่ ควบคุมการไหลของพาหะประจุในบริเวณช่องทางเดินกระแสระหว่างซอสและเดรน อุปกรณ์นี้จะเป็นที่รู้จักกันในชื่อ MOS Field-Effect-Transistor (MOSFET) อุปกรณ์มอสเฟท (MOSFET) นั้นถูกควบคุมการทำงานโดยสนามไฟฟ้าสองทิศทาง (สนามไฟฟ้าแนวตั้งอันเนื่องมาจากแรงดันเกต และ สนามไฟฟ้าด้านข้างจากการจ่ายแรงดันเดรน/ซอส) โดยมีเกตเป็นขั้วไฟฟ้าที่แยกออกจากขั้วไฟฟ้าอื่น ๆ ดังนั้นอุปกรณ์นี้บางครั้งจะเรียกว่า Insulated-Gate Field-Effect Transistor (IGFET) หัวใจสำคัญของอุปกรณ์มอสเฟท คือ การสร้างตัวเก็บประจุจากสารกึ่งตัวนำ โดยมีออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นฉนวนกั้นระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 สำหรับโลหะจะเลือกใช้ อะลูมิเนียม หรือ โพลีคริสตัลไลน์ ซิลิกอน (polycrystalline silicon) ก็ได้ ส่วนฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งอาจจะเป็นสารเอ็น หรือ ชนิดพี อย่างใดอย่างหนึ่ง



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของมอสคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาความหนาของชั้นออกไซด์ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากโครงสร้างทดสอบ
 ชั้นความหนาออกไซด์ที่ได้ทำการออกแบบไว้ จากนั้นนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความ
 หนาชั้นออกไซด์

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \tag{2.1}$$

C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของสารออกไซด์ ต่อ 1 หน่วยพื้นที่,

t_{ox} คือ ค่าความหนาของออกไซด์โลหะ และ

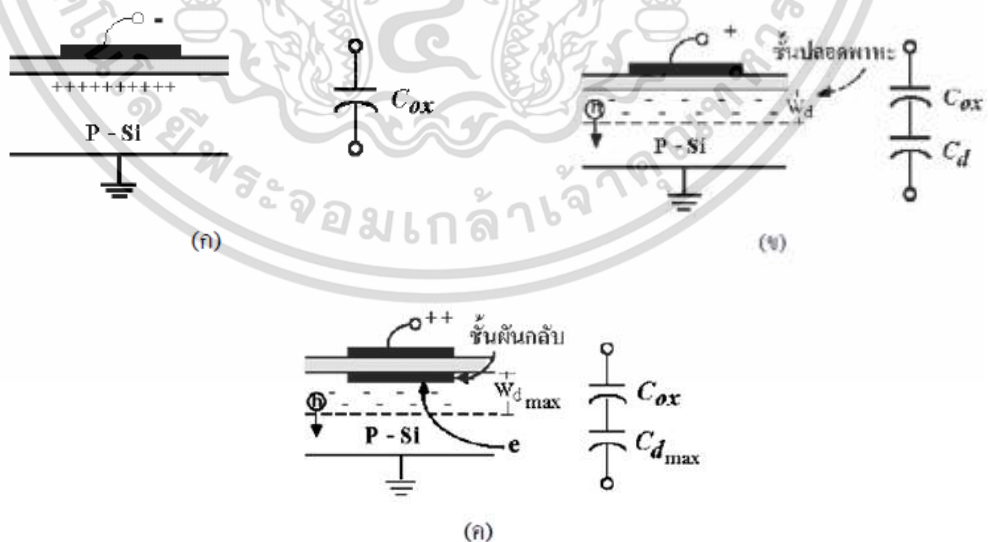
ϵ_{ox} คือ ค่าคงที่ของโลหะออกไซด์ (oxide permittivity) = 8.85×10^{-14} F/cm

เมื่อให้ไบอัสที่เกตจนทำให้เกิด สภาวะการปลดพาหะ ขึ้นบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ จะทำ
 ให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ่มอสเท่ากับความจุของชั้นออกไซด์ต่ออนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้า
 ของชั้นปลดพาหะ แสดงดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของมอสคาปาซิเตอร์ สามารถหาได้จาก
 สมการ (2.2)

$$C = \frac{C_{ox} C_d}{C_{ox} + C_d} \tag{2.2}$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของมอสคาปาซิเตอร์

C_d คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลดพาหะ



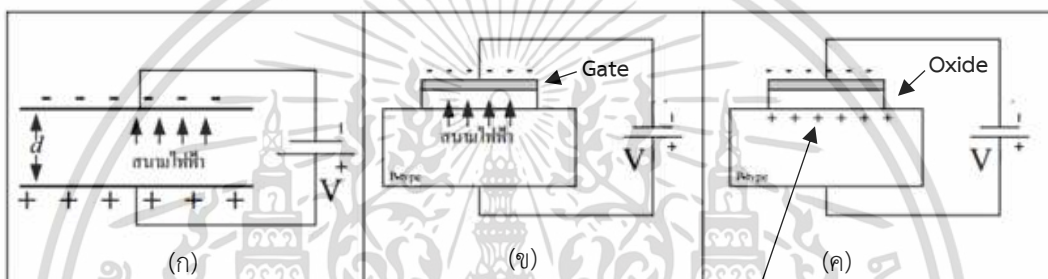
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะตัวเก็บประจุ่มอสคาปาซิเตอร์ในสภาวะต่างๆ

(ก.) สภาวะสะสม (ข.) สภาวะการปลดพาหะ (ค.) สภาวะผกกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

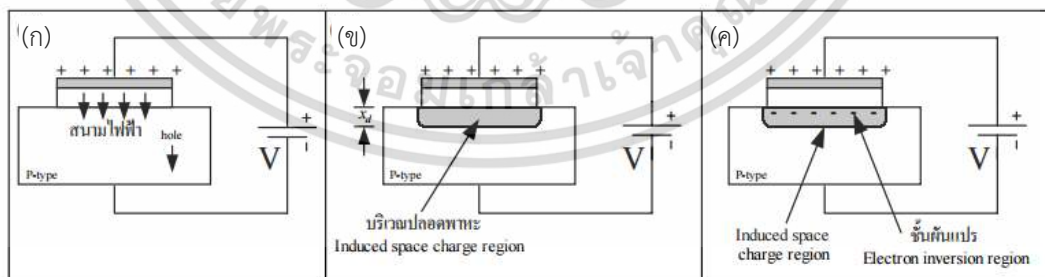
2.1.1 คุณสมบัติและการทำงานของมอสคาปาซิเตอร์

ตามรูปที่ 2.3 (ก) แสดงการเกิดสนามไฟฟ้า (Electric field) ภายในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน โดยจ่ายแรงดันลบให้แผ่นด้านบน และจ่ายแรงดันบวกให้แผ่นด้านล่าง โดยตรงกลางระหว่างแผ่นทั้งสอง คือฉนวน (Insulator) จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างแผ่นทั้งสอง มีทิศทางจากแผ่นบวกไปยังแผ่นลบ จากรูปที่ 2.3 (ข) ด้านบนที่ติดกับโลหะ คือ “เกต” จะการเกิดสนามไฟฟ้าที่มอสคาปาซิเตอร์ เมื่อได้รับแรงดันลบที่ขาเกต ก็จะทำให้มีอิเล็กตรอนสะสมอยู่ในบริเวณโลหะด้านบน และจะทำให้ประจุบวกหรือโฮลถูกผลักมาอยู่ที่ฐานรองมอสคาปาซิเตอร์ ดังรูปที่ 2.3 (ค) เกิดการสะสมโฮลที่ฐานรอง ส่วนบริเวณตรงกลางหรือออกไซด์จะเกิดสนามไฟฟ้า



เกิดการสะสมของ hole ที่บริเวณผิวสัมผัสออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.3 แสดง (ก) การเกิดสนามไฟฟ้าบนโลหะแผ่นตัวเก็บประจุแบบขนาน
 (ข) การเกิดสนามไฟฟ้าบนมอสคาปาซิเตอร์
 (ค) การเกิดสะสมประจุบวกหรือโฮลในมอสคาปาซิเตอร์

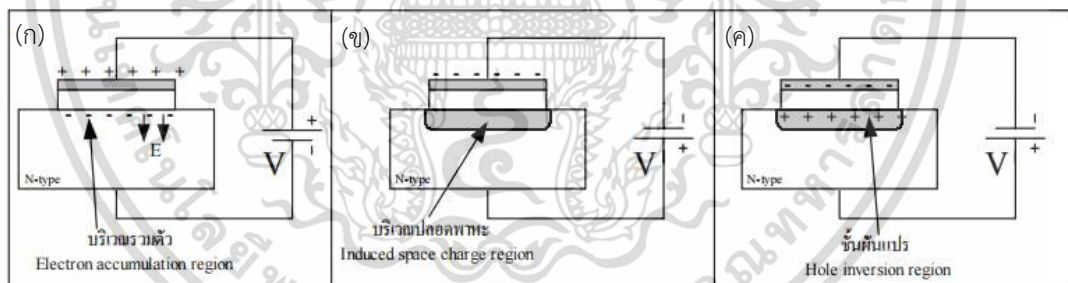


รูปที่ 2.4 แสดง (ก) ผลของการไบอัสแรงดันบวกที่ขั้วเกตและทิศทางของสนามไฟฟ้า
 (ข) การเกิดย่านปลอดประจุ ในมอสคาปาซิเตอร์ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสบวกค่าหนึ่ง
 (ค) การเกิดย่านปลอดประจุ และ electron inversion layer ในมอสคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปที่ 2.4 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้า (Electric field) ภายในตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน เหมือนกับรูปที่ 2.3 แต่ให้แผ่นด้านบนได้รับแรงดันบวกแผ่นด้านล่างได้รับแรงดันลบแทน (ฐานรองชนิดพี) ในรูปที่ 2.4 (ก) แสดงให้เห็นว่าถ้าขั้วเกตได้รับแรงดันบวกก็จะทำให้ประจุบวกไปสะสมอยู่ที่แผ่นโลหะด้านบน และเกิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับรูปที่ 2.3 ในกรณีนี้สนามไฟฟ้าสามารถแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้ จึงทำให้โฮลและอิเล็กตรอนที่อยู่ในสารชนิดพี ถูกผลักให้ออกไปจากสารพี โดยอิเล็กตรอนจะถูกผลักให้ไปอยู่ในบริเวณรอยต่อระหว่างออกไซด์และสารพี ส่วนโฮลจะถูกผลักให้ไปอยู่ในเนื้อสารพีที่ห่างออกไป เกิดเป็นย่านปลอดประจุพาหะขึ้น ดังรูป 2.4 (ข) ถ้าเราเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้า V ให้สูงขึ้น ก็จะทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นด้วย จะทำให้อิเล็กตรอนที่เป็น พาหะส่วนน้อยของสารพี มารวมสะสมอยู่ที่รอยต่อระหว่างออกไซด์และสารพีมากขึ้นแสดงดังรูป 2.4 (ค) ในบริเวณที่มีอิเล็กตรอนมาสะสมอยู่นี้ เรียกว่า “ชั้นผืนแปร” (electron inversion layer) ซึ่งความหนาแน่นพาหะของชั้นผืนแปรนี้ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไบอัสนั่นเอง

จากที่ได้กล่าวมาถ้าเราเปลี่ยนฐานรองให้เป็นสารชนิดเอ็น ก็จะมีลักษณะคล้ายกัน แสดงดังรูปที่ 2.5 (ก) โดยโครงสร้างของ มอสคาปาซิเตอร์ที่มีฐานรองชนิดเอ็น ที่ถูกไบอัสด้วยแรงดันบวกที่ขั้วเกตทำให้เกิดประจุบวกที่ขั้วโลหะ และเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในออกไซด์เช่นกัน ในกรณีนี้ในบริเวณรอยต่อระหว่างออกไซด์และสารเอ็น จะมีอิเล็กตรอนสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก

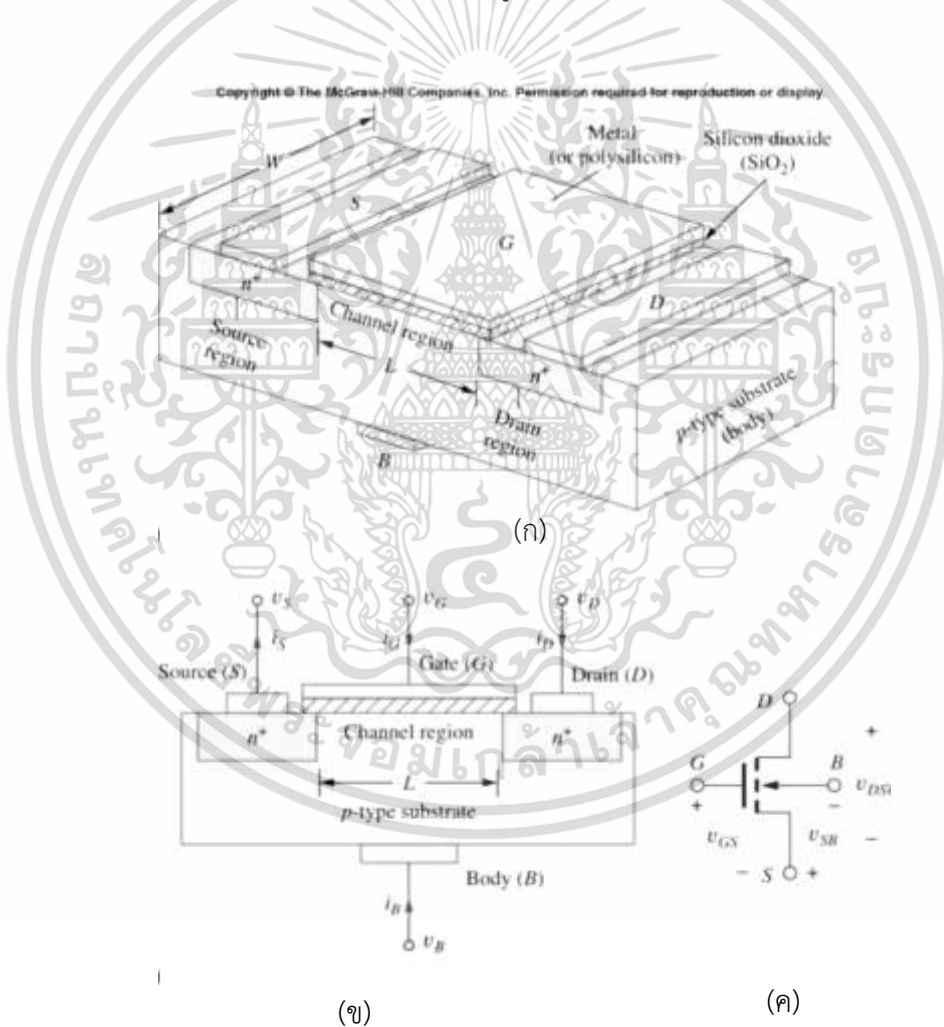


รูปที่ 2.5 แสดง (ก) แสดงผลของการไบอัสแรงดันบวกที่ขั้วเกตของมอสคาปาซิเตอร์ฐานรองชนิดเอ็น
 (ข) แสดงการเกิดย่านปลอดประจุในมอสคาปาซิเตอร์ เมื่อให้แรงดันไบอัสลบที่เกตค่าหนึ่ง
 (ค) แสดงการเกิด space charge region และ hole inversion layer ในมอสคาปาซิเตอร์ เมื่อให้ไบอัสลบที่เกตมากขึ้น

ในรูปที่ 2.5 (ข) เป็นการไบอัสแรงดันลบที่ขั้วเกต ซึ่งสนามไฟฟ้าก็จะผลักให้ประจุอิเล็กตรอนที่อยู่ในสารชนิดเอ็น ให้ออกห่างไปจากบริเวณรอยต่อระหว่างออกไซด์และสารเอ็น เกิดย่านปลอดประจุลบขึ้น รูปที่ 2.5 (ค) เมื่อให้ไบอัสลบมากขึ้น จะทำให้มีแต่ประจุโฮลในบริเวณรอยต่อ บริเวณนี้เรียกว่า “hole inversion layer”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์มอสเฟต แสดงดังรูปที่ 2.6 (ก) จะเห็นว่าในส่วนของขาเกต , ออกไซด์ และฐานรอง (substrate) มีลักษณะเหมือนกับมอสคาปาซิเตอร์ และมีส่วนที่เพิ่มเติม คือ ย่านของสารเจือชนิดเอ็น (n-type) ทางด้านซ้ายและขวาของฐานรอง เรียกว่า “ซอส” (source) และ “เดรน” (drain) ส่วนบริเวณตรงกลางระหว่างขั้วซอส และ เดรน เรียกว่า “ช่องทางเดินกระแส (channel region)” ซึ่งจะเป็นส่วนที่อิเล็กตรอนสามารถไหลผ่านได้ โดย L คือ ค่าความยาวของช่องทางเดินกระแส และ W คือค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแส (ขึ้นอยู่กับารออกแบบทรานซิสเตอร์ แต่ปัจจุบันจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร) ส่วนค่า t_{ox} คือ ความหนาของออกไซด์มีค่าอยู่ที่ประมาณ 40 นาโนเมตร แสดงดังรูป 2.6 (ข)-(ค) แสดงภาคตัดขวางและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์มอสเฟตชนิดเอ็นในรูปของวงจรรวมตามลำดับ

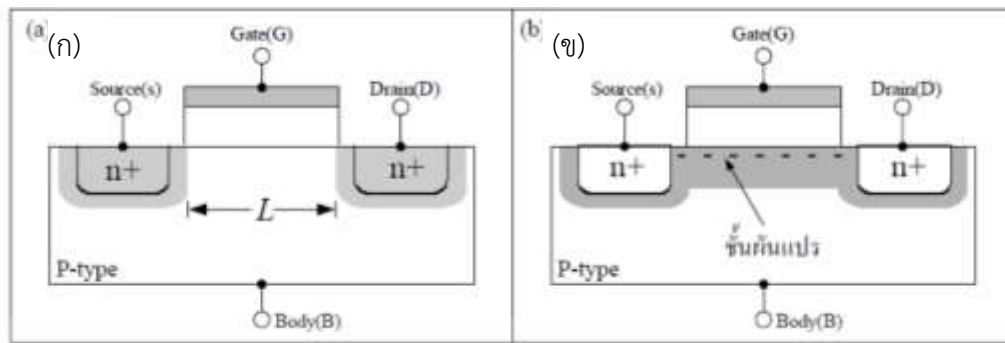


รูปที่ 2.6 แสดง (ก) แสดงโครงสร้างของ n-channel enhancement mode MOSFET

(ข) แสดงรูปภาคตัดขวางของ n-channel enhancement mode MOSFET และ

(ค) แสดงสัญลักษณ์ ของ n-channel enhancement mode MOSFET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 (ก) แสดงภาคตัดขวางของ n-channel MOSFET ก่อนที่จะเกิดชั้นผืนแปร์

(ข) แสดงภาคตัดขวาง หลังจากเกิดชั้นผืนแปร์

เราสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของมอสเฟตได้ว่า ถ้าเรา ไม่ได้รับแรงดันไบอัส ขั้วซอสและขั้วเดรน ก็จะถูกแยกออกจากกันโดยสารเจือชนิดพี (p-type) ที่อยู่ตรงกลาง ในกรณีนี้ถึงแม้จะให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรนและขั้วซอสก็จะมีกระแสไหลผ่านมอสเฟต แสดงภาคตัดขวางดังรูปที่ 2.7(ก) แต่ถ้าเราให้แรงดันที่ขั้วเกตเป็นบวกก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในย่าน channel region แสดงดังรูปที่ 2.7 (ข) และทำให้เกิด electron inversion layer ในบริเวณนี้ ซึ่งทำให้ขั้วซอสและขั้วเดรน สามารถเชื่อมต่อกันได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากเดรนไปยังซอสได้ เราเรียกมอสเฟตที่มีคุณสมบัติแบบนี้ว่า Enhancement MOSFET หรือ E-MOSFET และถ้าประจุที่อยู่บริเวณ channel เป็นอิเล็กตรอนเราก็จะเรียก MOSFET นี้ว่า n-channel MOSFET (เรียกสั้นๆว่า NMOS)

จากรูปที่ 2.7 (ข) ถ้าให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วเดรนและซอสจะทำให้เกิดกระแสไหลจากขั้วเดรนไปยังซอสได้ก็ต่อเมื่อ มีแรงดันที่ขั้วเกตเป็นบวกเท่านั้น ถ้าไม่มีแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกตหรือมีแรงดันเป็นลบก็จะทำให้ electron inversion layer หดไป เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้ามากระตุ้นให้เกิดชั้นผืนแปร์ ก็จะทำให้บริเวณช่องทางเดินกระแสไม่มีสภาพนำไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านได้อีก

2.2 คุณสมบัติและการทำงานของมอสเฟต

2.2.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของมอสเฟต(MOSFET current-voltage characteristics) ^[1]

จากหัวข้อที่แล้ว พบว่าการที่จะทำให้มีกระแสไหลผ่านมอสเฟต จะต้องไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่

ขั้วเกตเป็นจำนวนหนึ่งเพื่อทำให้เกิด inversion charge region แรงดันค่าๆ นี้เราเรียกกันว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“Threshold voltage” หรือ V_T ซึ่งอาจเปรียบเทียบได้ว่า เป็นแรงดันที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงานได้นั่นเอง

ในกรณีที่พิจารณาว่าไม่มีสถานะผิว (Surface State) ใดๆ ปรากฏอยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่าง Si-SiO₂ ดังนั้นที่แรงดันเกต $V_{GS} = 0$ V จึงไม่มีแขนแนลเกิดขึ้น และแม้จะมีแรงดันเดรน $V_{DS} > 0$ ก็ตาม กระแสเดราก็จะไม่ไหล ($I_D = 0$ A) ในสภาวะนี้ถือว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะ OFF แต่เมื่อได้รับแรงดันเกตเป็นบวก $V_{GS} > 0$ และมากพอที่จะทำให้สนามไฟฟ้าที่ขึ้นออกไซด์ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดแขนแนลชนิดเอ็นได้ หรือ $V_{GS} > V_T$ แขนแนลที่เกิดขึ้นจะต่อเชื่อมระหว่างซอสและเดรน และเป็นช่องทางเดินของกระแสเดรน โดยกระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นกับแรงดันเดรนในช่วงแรก และเมื่อแรงดันเดรนเพิ่มขึ้นในที่สุด จะถึงค่าแรงดันพินช์ออฟ (Pinch Off Voltage : V_P) หรือ แรงดันเดรนอิ่มตัว (Saturation Drain Voltage : $V_{DS(sat)}$) และเขียนได้ว่า

$$(V_{GS} - V_{DS(sat)}) = V_T \quad (2.3)$$

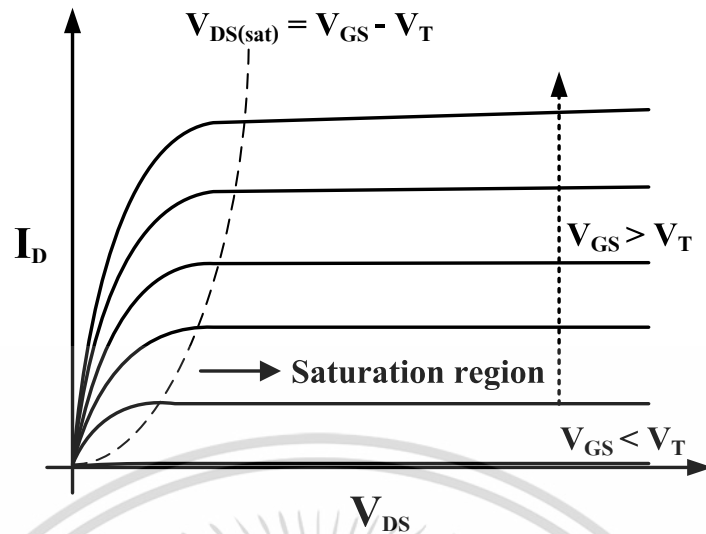
หรือ

$$V_P = V_{DS(sat)} = (V_{GS} - V_T) \quad (2.4)$$

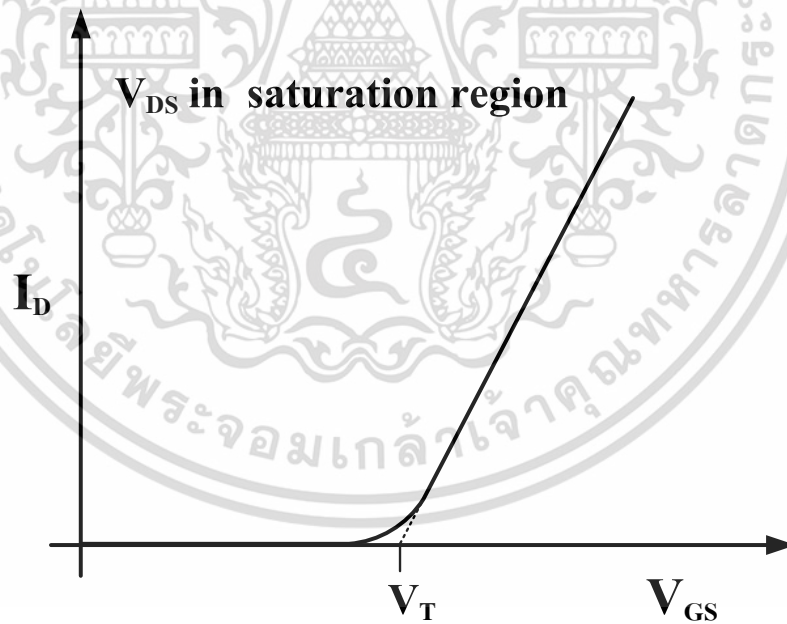
จากสมการที่ (2.3) แรงดันเดรนอิ่มตัว $V_{DS(sat)}$ จะแปรตามแรงดันเกต V_{GS} เมื่อแรงดันเกตเพิ่มขึ้นกระแสเดรนอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นด้วย และเป็นไปตามสมการ

$$I_{D(sat)} = \frac{V_{DS(sat)}}{R_{eff(n-ch)}} = \frac{V_{GS} - V_T}{R_{eff(n-ch)}} \quad (2.5)$$

ดังนั้นคุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเดรน (I_D - V_{DS}) ของมอสเฟตแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแซนแนล ที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.8 และกราฟความสัมพันธ์ของกระแสเดรนกับแรงดันเกต (I_D - V_{GS}) ในขณะที่อยู่ในย่านอิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 คุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเดรนที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติกระแสเดรนกับแรงดันเกตของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล

ซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงค่าของแรงดันขีดเริ่ม V_T ได้ เนื่องจากแรงดันเกต V_{GS} ที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T กระแสเดรน $I_D \approx 0$ และเมื่อแรงดันเกต V_{GS} สูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T ทำให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานเห็นประโยชน์อันใดอันหนึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเดรนเริ่มไหล ($I_D > 0$ A) แรงดันเกต V_{GS} ที่ทำให้กระแสเดรนเริ่มไหลได้จึงถูกพิจารณาว่าเป็นแรงดันขีดเริ่ม นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง I_D - V_{GS} ยังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน ซึ่งเป็นกระแสเอาท์พุทในวงจรของเดรนและซอส กับแรงดันเกตซึ่งเป็นแรงดันอินพุท โดยแรงดันเกตสามารถควบคุมหรือส่งเสริมสนับสนุนให้กระแสเดรนมีค่าเพิ่มขึ้นได้นั่นเอง

2.2.2 การวิเคราะห์สมการกระแสของมอสเฟท (Current Voltage analytical relations)

ในตอนนี้เราจะวิเคราะห์ หาสมการกระแสของมอสเฟท ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน ที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆ เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยาก การวิเคราะห์เบื้องต้น จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

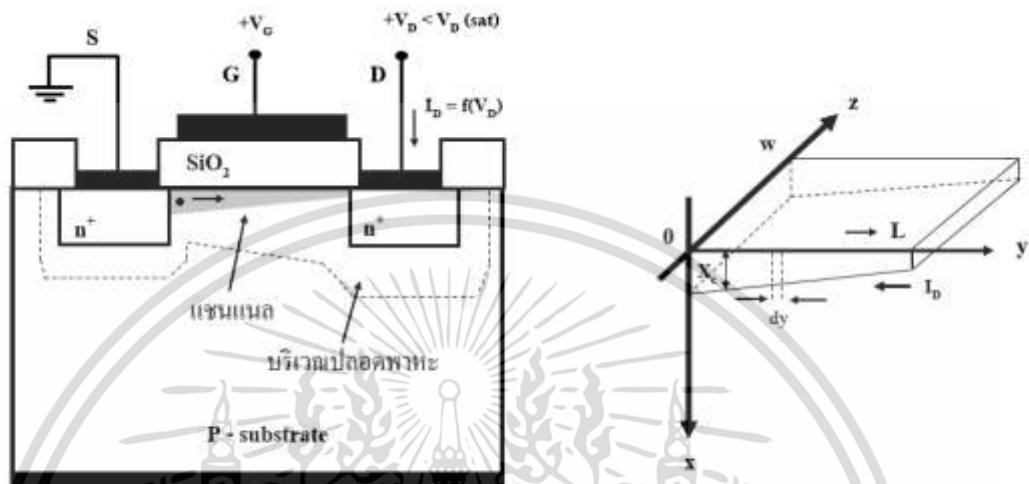
- 1) ขั้วซอสและฐานรองถูกต่อลงกราวด์
- 2) กระแสที่ไหลในแกนแนลเป็นกระแสดริฟท์ และพิจารณาว่าไม่มีกระแสการแพร่
- 3) แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ (ความต่างศักย์ระหว่างเกตและแกนแนล) เป็นตัวกำหนดความหนาแน่นของประจุพาหะในแกนแนล
- 4) สภาพคล่องหรือโมบิลิตี (mobility) ของพาหะในแกนแนล เป็นสภาพคล่องที่ผิว (surface Mobility) และกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากันตลอดทั้งแกนแนล
- 5) แรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage: V_T) หมายถึงแรงดันที่เกต ซึ่งทำให้เกิดแกนแนลที่ผิวสัมผัสของ SiO_2 -Si โดยที่แรงดันเดรน $V_D = 0$ V
- 6) ประจุนิ่ง (Fixed charge) ในชั้นออกไซด์ ประมาณให้เป็นประจุที่ผิวสัมผัสของ SiO_2 -Si
- 7) สนามไฟฟ้าในแกนแนลระหว่างซอสและเดรนตามแนวอนบนบนแกน y มีค่าเกือบคงที่เมื่อ

เทียบกับสนามไฟฟ้าในแนวตั้งบนแกน x หรือ ประมาณว่า $\frac{\partial \epsilon_x}{\partial x} \gg \frac{\partial \epsilon_y}{\partial y}$

ในการวิเคราะห์นี้ เราจะพิจารณาหาสมการกระแสเดรน I_D ของมอสเฟทแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ชนิดเอ็นแกนแนล ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของแรงดันเกต V_G และแรงดันเดรน V_D (ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ϵ_x ในแกน x และสนามไฟฟ้า ϵ_y ในแกน y ตามลำดับ) และพิจารณาว่าเมื่อ $V_G > V_T$ จะทำให้เกิดแกนแนลเกิดขึ้นเป็นแนวตลอดช่วงระหว่างซอสและเดรน โดยขนาดของแกนแนลมีความกว้างและความยาวเท่ากับ w และ L ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และขนาดความหนาแน่นของแกนแนล ซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นที่ตำแหน่ง y ใดๆ มีค่าเท่ากับ $X_c(y)$ ขนาดความหนาแน่นของแกนแนลเปลี่ยนแปลงตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง y ในแกนแนล ลักษณะรูปร่างของแกนแนลถูกเขียนขึ้นใหม่ได้ดังในรูปที่ 2.10 (ข) เมื่อได้รับแรงดันเดรน สนามไฟฟ้าจะทำให้ไอเล็กตรอนในแกนแนลดิริฟท์ หรือเคลื่อน ด้านซอสไปทางด้านแครน จึงมีกระแสเดรน I_D ซึ่งเป็นกระแสดิริฟท์ไหลในทิศทาง $-y$



รูปที่ 2.10 แสดง (ก) โครงสร้างของมอสเฟตชนิดเอ็นแชนแนล ขณะที่ $V_G > V_T$ และ $V_D < V_{D(sat)}$ และ (ข) ลักษณะรูปร่างของแกนแนล

โดยการพิจารณาส่วนเล็กๆของแกนแนลที่มีขนาดบางๆ dy , มีความต้านทาน dR เมื่อมีกระแสเดรน I_D , ไหลผ่านในทิศทางตั้งฉาก จะทำให้มีแรงดันตกคร่อม dV ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dv = I_D dR \tag{2.6}$$

แต่

$$dR = \frac{\rho_n dy}{X_c(y)w} \tag{2.7}$$

ซึ่ง $X_c(y)$ คือ ความหนาของแกนแนลที่ตำแหน่ง y ใดๆ และ $\rho_n = 1/nq\mu_n$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.6) จะได้ว่า

$$dV = \frac{I_D dy}{nq\mu_n X_c(y)w} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความหนาแน่นของประจุที่ถูกเหนี่ยวนำในแซนแนล (คูลอมป์/ ตร.ซม.) คือ $Q_n(y)$

และ

$$Q_n(y) = nqX_c(y) \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$dV = \frac{I_D dy}{Q_n(y)\mu_n w} \quad (2.10)$$

หรือ

$$I_D dy = Q_n(y)\mu_n w dv \quad (2.11)$$

สมการกระแสเดรน หาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.11) แต่ค่าของ $Q_n(y)$ ในสมการที่ (2.11) สามารถหาได้จากแบบจำลองสองแบบ แบบจำลองสองแบบ คือ แบบกฎกำลังสอง (Square Law model) และแบบประจุในเนื้อสาร (Bulk charge model) แต่ละแบบจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นสมการกระแสของมอสเฟต จึงแยกพิจารณาได้เป็นสองแบบ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

2.2.3 การวิเคราะห์แบบกฎกำลังสอง (Square Law model)

ในการวิเคราะห์แบบกฎกำลังสอง ทำได้โดยการพิจารณาว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกิด ΔV_G ซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม จะทำให้ความหนาแน่นประจุที่เกิดเปลี่ยนแปลงเท่ากับ ΔQ_{gate} และมีผลให้มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุในสารกึ่งตัวนำที่เท่ากันแต่มีเครื่องหมาย ตรงข้ามคือ ΔQ_{semi} ซึ่งประจุในสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยประจุของพาหะในแซนแนล (Q_n) และ ประจุของโฮลในบริเวณปลอดพาหะ (Q_d) ในกรณีที่เราประมาณว่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นประจุในสารกึ่งตัวนำ เป็นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุพาหะภายในแซนแนล (Q_n) เพียงอย่างเดียว โดยที่ประจุในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำ (Q_{dm}) มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง หรือ ก็คือความกว้างของบริเวณปลอดพาหะทุกจุดจากซอสถึงเดรน มีค่าเท่ากันคือ w_{max} แม้ว่าแรงดันเดรน $V_D > 0$ ก็ตาม ดังนั้นที่ $V_G > V_T$ หรือภาวะสตรองอินเวอร์ชัน จะได้ว่า

$$\Delta Q_{\text{gate}} \left(\frac{\text{charge}}{\text{cm}^2} \right) = -\Delta Q_{\text{semi}} \left(\frac{\text{charge}}{\text{cm}^2} \right) \cong -Q_n \quad \dots V_G \geq V_T \quad (2.12)$$

แต่เนื่องจากประจุในแชนแนลถูกทำให้เกิดขึ้นทันทีที่แรงดันเกตสูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม บริเวณขอบของชั้นออกไซด์ ดังนั้นเราอาจอ้างได้ว่าการเปลี่ยนแปลงประจุที่เกต ก็คือผลคูณของความจุไฟฟ้าที่เกต กับกับส่วนเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เกต หรือเขียนได้ว่า

$$\Delta Q_{\text{gate}} \left(\frac{\text{charge}}{\text{cm}^2} \right) \cong C_{ox} \Delta V_G = C_{ox} (V_G - V_T) \quad \dots V_G \geq V_T \quad (2.13)$$

ดังนั้น

$$\Delta Q_n \cong -C_{ox} (V_G - V_T) \quad (2.14)$$

โดยที่

$$C_{ox} = \frac{K_{oxide} \epsilon_0}{t_{ox}}$$

พาทรีด/ตร.ซม.

และ C_{ox} คือ ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าที่เกตออกไซด์

K_{oxide} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชั้นออกไซด์

อย่างไรก็ดี เนื่องจากแรงดันที่จุด y ต่างๆ ในแชนแนลมีค่าไม่เท่ากัน โดยมีค่าเป็นศูนย์ที่ซอส แล้วเพิ่มขึ้นกับตำแหน่ง y กระทั่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_D ที่ขั้วเดรน ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่ตำแหน่ง y ต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน โดยมีค่าสูงสุดที่ขั้วซอส (V_G) และลดลงเมื่อตำแหน่ง y เพิ่มขึ้น และมีค่าต่ำสุดที่ขั้วเดรน ($V_G - V_D$) ถ้าให้ที่ตำแหน่ง y ใดๆ มีแรงดันเป็น $V(y)$ ดังนั้น แรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ที่ตำแหน่ง y จะมีค่าเท่ากับ $(V_G - V(y))$ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเอ็นแชนแนล ที่ตำแหน่ง $y = 0$ จะมีค่าสูงสุด แล้วลดลงกับระยะ y กระทั่งมี ค่าต่ำสุดที่เดรน ณ ที่ตำแหน่ง y ใดๆ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในเอ็นแชนแนล จะมีค่าเป็น ดังสมการที่ (2.15)

$$Q_n(y) \cong -C_{ox} [V_G - V(y) - V_T] \quad (2.15)$$

แทนสมการที่ (2.15) ในสมการที่ (2.11) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_D dy = C_{ox} [(V_G - V_T) - Vy] \mu_n W dV \quad (2.16)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.16) จากขั้วซอส ถึงขั้วแคโรน จากตำแหน่ง $y = 0$ ถึง L และจากแรงดันตั้งแต่ 0 ถึง $+V_D$ โวลต์ จะได้

$$\int_{y=0}^L I_D dy = C_{ox} \mu_n W \int_{V=0}^{V_D} [(V_G - V_T) - Vy] dV \quad (2.17)$$

ในที่สุดจะได้

$$I_D = C_{ox} \mu_n \frac{W}{L} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right] \quad \text{Non-saturation (2.18)}$$

ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน I_D แรงดันเดรน V_{DS} แรงดันเกต V_{GS} และแรงดันขีดเริ่ม V_T สามารถอธิบายด้วยย่านการทำงานซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ย่าน คือ ย่านไม่อิ่มตัว (Non-Saturation Region) เมื่อ $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$ และย่านอิ่มตัว (Saturation Region) เมื่อแรงดัน $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในย่านไม่อิ่มตัว แสดงได้ดังสมการที่ (2.19)

$$I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad \text{Non-saturation (2.19)}$$

เมื่อพิจารณาที่ V_{DS} ต่ำๆ ทำให้เทอม $V_{DS}^2/2$ มีค่าน้อยมากและไม่นำมาพิจารณาสามารถเขียนสมการใหม่ ดังสมการ (2.20)

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad \text{small } V_D \quad (2.20)$$

เมื่อ β คือ “พารามิเตอร์ของมอสเฟต” แสดงดังสมการ (2.21)

$$\beta = C_{ox} \cdot \mu_n \cdot \frac{W}{L} \quad (2.21)$$

เมื่อ μ_n คือสภาพคล่องของประจุพาหะที่ผิว (surface mobility), C_{ox} คือค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนต่อพื้นที่, W คือ ความกว้างเกต, L คือ ความยาวเกต, V_T คือ ค่าแรงดันขีดเริ่มซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของอุปกรณ์มอสเฟตหมายถึงแรงดันไบอัสที่เกตค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้เกิดภาวะ “สตริงอินเวอร์ชัน” กล่าวคือเป็นค่าแรงดันที่ทำให้อุปกรณ์มอสเฟตเริ่มทำงาน แสดงดังสมการ (2.22)

$$V_T = V_{FB} - \frac{Q_{dm}}{C_{OX}} + 2\phi_F \tag{2.22}$$

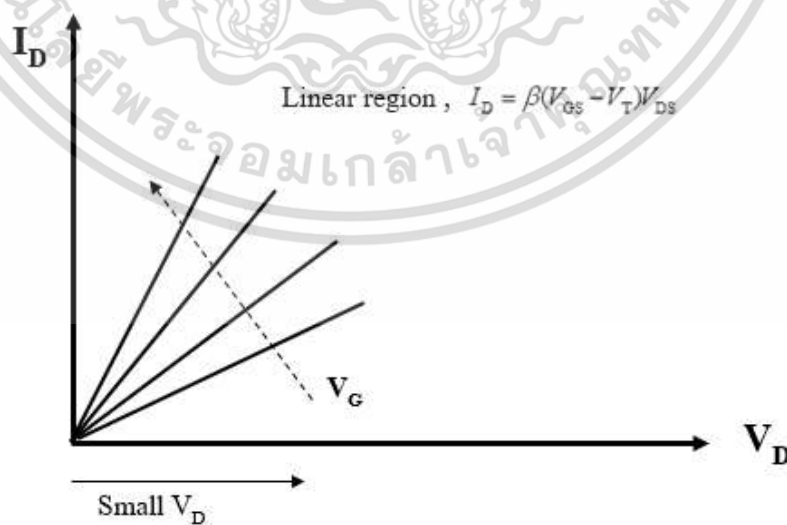
โดย V_{FB} คือ ค่าแรงดันแถบเรียบของมอสเฟต หรือ Flat Band Voltage อธิบายได้ด้วยสมการ (2.23) สำหรับ Q_{dm} คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในบริเวณพลาสมาของสารกึ่งตัวนำ ส่วน ϕ_F คือ ศักย์เฟอร์มิ

$$V_{FB} = (\phi_M - \phi_S) - \frac{Q_i}{C_{OX}} \tag{2.23}$$

เมื่อ ϕ_M คือ ศักย์เฟอร์มิของโลหะ

ϕ_S คือ ศักย์เฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ

Q_i คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในออกไซด์ และที่ผิวสัมผัส (Oxide Charge Density)



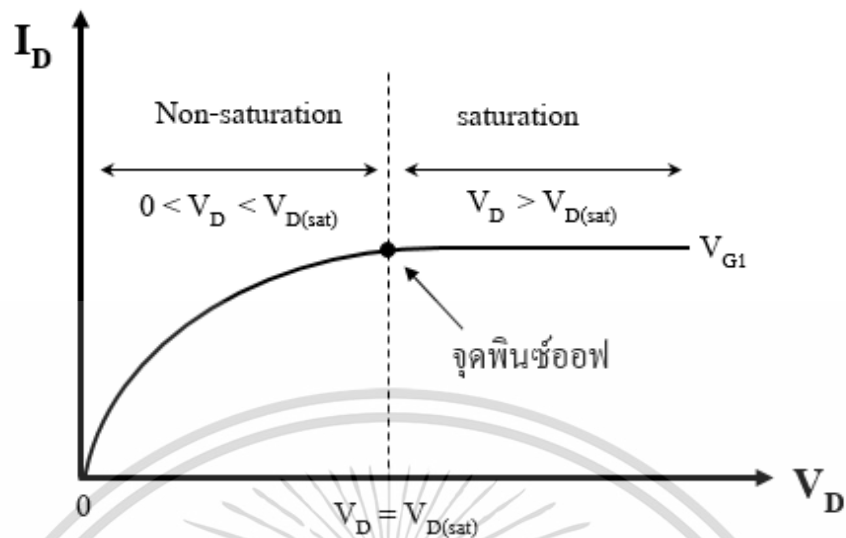
รูปที่ 2.11 คุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน I_D - V_D ของมอสเฟตที่แรงดันเกตคงที่ค่าต่างๆ ขณะทำงานในย่านเชิงเส้น ซึ่งเป็นช่วงที่แรงดันเดรนมีค่าต่ำๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดี สมการที่ (2.20) จะใช้ได้และถูกต้อง เฉพาะในช่วงที่ แรงดันเดรนมีค่าต่ำๆ แต่ในกรณีที่แรงดันเดรนมีค่าสูงขึ้น กระแสเดรนจะเป็นไปตามสมการที่ (2.19) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่แรงดันเดรนที่มีค่าเพิ่มขึ้น กระแสเดรนจะเพิ่มขึ้นอย่างชะลอตัว เนื่องจากเทอมของ $V_{DS}^2/2$ ในสมการที่ (2.7) มีค่าเพิ่มขึ้น และในที่สุดกระแสเดรนจะเริ่มถึงจุดอิ่มตัว หรือจุดพินช์ออฟ และทำงานคล้ายกับเป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (constant current source) เมื่อแรงดันเดรน $V_D = V_G - V_T$ ซึ่งเราเรียกว่า “แรงดันเดรนอิ่มตัว” หรือ $V_{D(sat)}$ โดยกระแสเดรนจะมีค่าเท่ากับกระแสเดรนอิ่มตัว (saturation drain current : $I_{D(sat)}$) และหาได้จากการแทนค่าแรงดันเดรน $V_D = V_G - V_T$ ลงในสมการที่ (2.19) และจัดสมการใหม่ จะได้กระแสเดรนที่มีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า “กระแสเดรนอิ่มตัว” ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{saturation - region (2.24)}$$

จากสมการที่ (2.24) จะเห็นว่า กระแสเดรนไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันเดรนอีกต่อไป นั่นเมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงกว่าแรงดันเดรนอิ่มตัว หรือ $V_D > V_{D(sat)}$ กระแสเดรนจะยังคงมีค่าคงที่ เช่นเดิมไม่เปลี่ยนแปลงคือ เท่ากับ $I_{D(sat)}$ ในภavnะนี้มอสเฟตจะทำงานในย่านอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม กระแสเดรนอิ่มตัวยังคงขึ้นกับแรงดันเกต ที่แรงดันเกตค่าสูงๆ กระแสเดรนอิ่มตัว จะมี ค่าสูงขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และจากสมการที่ (2.24) จะเห็นว่ากระแสเดรนอิ่มตัวแปร กับกำลังสองของแรงดันเกตที่สูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม หรือ $I_{D(sat)} \propto (V_G - V_T)^2$ ดังนั้นการ วิเคราะห์แบบนี้จึงถูกเรียกว่า “แบบกฎกำลังสอง” (Square law model)

นอกจากนี้ จะเห็นว่าที่แรงดันเกตคงที่แต่ละค่า แรงดันเดรนจะทำให้มอสเฟตทำงานได้ สองย่านใหญ่ๆคือ “ย่านไม่อิ่มตัว” (non-saturation region) เมื่อ $0 < V_D < V_{D(sat)}$ และ “ย่านอิ่มตัว” (saturation region) เมื่อ $V_D \geq V_{D(sat)}$ โดยมีจุดพินช์ออฟเป็นจุดเริ่มต้นของย่านอิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนั้นสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.24) ซึ่งเป็นสมการกระแสเดรนในย่านไม่อิ่มตัว และย่านอิ่มตัว จึงเป็นสมการที่สำคัญและเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของมอสเฟต



รูปที่ 2.12 ลักษณะคุณสมบัติกระแสเดรนและแรงดันเดรน I_D - V_D ของมอสเฟตที่แรงดันเกต V_{G1} ขณะทำงานอยู่ในย่านไม่อิ่มตัว และย่านอิ่มตัว

2.2.4 ความนำถ่ายโอน หรือ ทรานส์คอนดักแตนซ์

ค่าความนำถ่ายโอน หรือ ทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance: g_m) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของมอสทรานซิสเตอร์ เนื่องจากถูกนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต (กระแสเดรน: I_D) กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุต (แรงดันเกต V_{GS}) เกิดในขณะที่ยังคงแรงดันเดรน (V_{DS}) คงที่

ดังนั้น

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}(\text{Constant})} \quad (2.25)$$

จากสมการ (2.25) จะเห็นว่าค่าของความนำถ่ายโอน (g_m) มีความหมายคล้ายกับเป็นอัตราการขยายของมอสทรานซิสเตอร์ และเมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์แบบกฎกำลังสอง สมการค่าความนำถ่ายโอน (g_m) ในย่านเชิงเส้น แทนสมการ (2.20) และสมการ (2.21) ในสมการ (2.25) จะทำให้ค่าของความนำถ่ายโอนในย่านเชิงเส้นแสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_{m(\text{lin})} = \beta V_{\text{DS}} = C_{\text{OX}} \cdot \mu_n \frac{W}{L} V_{\text{DS}} \quad (2.26)$$

จากสมการ (2.26) จะเห็นว่าค่าความนำถ่ายไอออนในย่านเชิงเส้น แปรผันโดยตรงกับแรงดันเดรนโดยไม่ขึ้นกับแรงดันเกต และกรณีมอสทรานซิสเตอร์ทำงานเข้าสู่ย่านอิ่มตัว กระแสเดรนกลายเป็นกระแสอิ่มตัว สมการค่าความนำถ่ายไอออน (g_m) หาได้โดยสมการ (2.24) ในสมการจะได้ค่าความนำถ่ายไอออนของมอสทรานซิสเตอร์ในย่านอิ่มตัว ดังสมการ (2.27)

$$g_{m(\text{sat})} = \beta (V_{\text{GS}} - V_{\text{T}}) = C_{\text{OX}} \cdot \mu_n \frac{W}{L} (V_{\text{GS}} - V_{\text{T}}) \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) จะเห็นว่าค่าความนำถ่ายไอออนในย่านอิ่มตัว แปรผันกับแรงดันเกต ไม่ขึ้นกับแรงดันเดรน ยิ่งไปกว่านั้น จะเห็นว่า ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ รวมทั้งยังเกี่ยวข้องกับค่าสภาพคล่องของพาหะในช่องทางเดินกระแสอีกด้วย

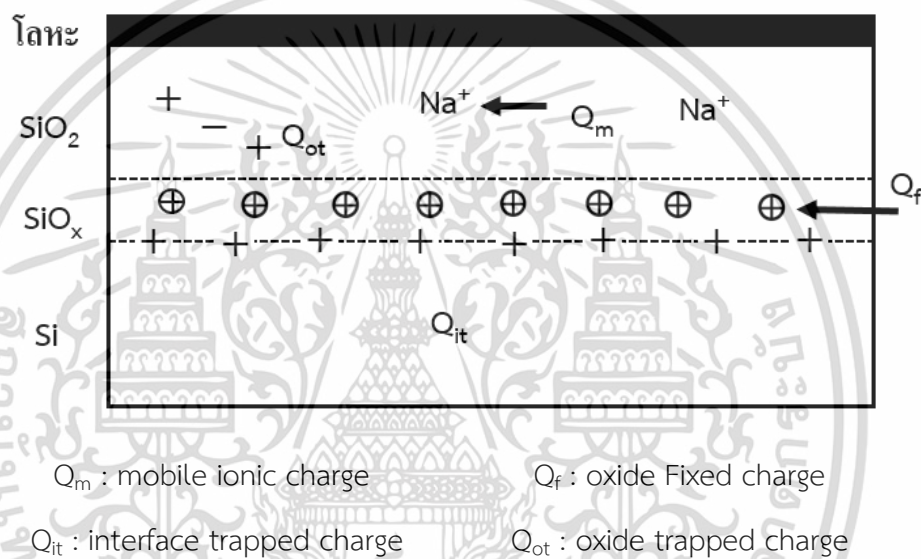
2.2.5 กระแสในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม (The Sub-threshold Current)

การทำงานของมอสเฟทจะเริ่มนำกระแสได้เมื่อ $V_{\text{GS}} = V_{\text{TH}}$ แต่ในทางปฏิบัตินั้นเมื่อ V_{GS} น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{T}) กระแสของมอสเฟทไม่ได้เท่ากับศูนย์ กล่าวคือ มอสเฟทจะยังคงนำกระแสที่มีค่าน้อยมาก การนำกระแสนี้ถูกเรียกว่า การนำกระแสในโหมดต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Sub-threshold conduction) ซึ่งกระแสที่ได้เป็นกระแสที่เกิดจากกว่าแพร่ (Diffusion current) แทนที่จะเป็นกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้า (Drift current) การทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการทำงานที่ใช้พลังงานต่ำ ตัวอย่างอุปกรณ์ไอซีประเภทมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านนี้คือ เครื่องคิดเลขพลังงานแสงอาทิตย์ แบตเตอรี่นาฬิกา เป็นต้น ส่วนปัญหาหลักของการออกแบบวงจรที่ทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มคือความ, สัญญาณรบกวน, และแถบความกว้าง (bandwidth) ของความถี่

2.2.6 ประจุไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ของมอสคาปาซิเตอร์ (Oxide Charges in MOS capacitor)

การศึกษารายละเอียดเรื่องมอสพบว่า คุณสมบัติของกราฟ C-V ไม่มีเสถียรภาพ กล่าวคือ ผลของการวัดจะไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา และจากการทดสอบพบว่าความไม่มีเสถียรภาพนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจาก การมีไอออนของอัลคาไลน์ (Alkali ions) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไอออนของโซเดียม (Sodium ions: Na^+) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวก และสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (mobile charge: Q_m) รวมทั้งมีประจุไฟฟ้าอื่นๆซึ่งเคลื่อนไม่ได้ ปรากฏอยู่ในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ และที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 -Si ประจุไฟฟ้าต่างๆ เหล่านี้ได้แก่ ประจุนิ่ง (Fixed charge: Q_f) ในชั้นออกไซด์ ประจุกักตักในชั้นออกไซด์ (Oxide trapped charge: Q_{ot}) ประจุกักตักที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO_2 -Si (interface trapped charge: Q_{it}) ชนิดของประจุและตำแหน่งที่เกิดของประจุ ภายในโมสที่กล่าวนี้ แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆและตำแหน่งที่เกิด ภายในโครงสร้างของโมส

ในตอนนี้อาจพิจารณาการเกิด ตำแหน่งที่เกิด และผลของประจุไฟฟ้าเหล่านี้ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของโมส รวมทั้งวิธีการแก้ไข ป้องกันหรือลดปริมาณของประจุต่างๆเหล่านี้ เพื่อให้ได้โมสที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับกรณีอุดมคติมากที่สุด โดยจะกล่าวแยกประจุแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

(ก). ไอออน หรือ ประจุที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile or mobile charge: Q_m)

ในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ไอออนที่เคลื่อนที่ได้ โดยปกติมักหมายถึงไอออนอัลคาไลน์ (Alkali ions) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไอออนของโซเดียม (Na^+):ซึ่งสามารถที่เคลื่อนที่ไปมาในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แม้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 250°C ปกติแล้วไอออนของโซเดียม มักเกิดขึ้นได้ง่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะอยู่ในกระบวนการสร้าง เนื่องจากมีแหล่งที่มามากมาย ขณะอยู่ในกระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ เช่น จากบรรยากาศทั่วไปในห้องทดลองหรือห้องปฏิบัติการ จากสารเคมีที่นำมาใช้ในอุปกรณ์การทดลองประเภทเครื่องแก้ว จากมือของผู้ปฏิบัติงาน และแม้แต่ในท่อควอทซ์ ของเตาออกซิเดชัน (Oxidation furnace) หรือเตาแพร่สาร (Diffusion furnace) ไอออนของโซเดียมนี้มีประจุไฟฟ้าบวก เมื่อเกิดขึ้นและมีสนามไฟฟ้าในชั้นออกไซด์ ก็จะสามารถเคลื่อนที่ข้ามชั้นของออกไซด์ได้ นอกจากนี้ หากเกิดอยู่ใกล้ผิวสัมผัส $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ก็จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าลอยขึ้นที่ด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้คุณสมบัติของมอสเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีอุดมคติ เช่น กราฟ C-V จะเลื่อนไปทางด้านตรงข้ามกับแรงดันที่ให้แก่อเกต ดังนั้นแรงดันขีดเริ่ม บนกราฟจึงเลื่อนไปจากเดิมการลดผลกระทบดังกล่าว อาจทำได้ด้วยการให้แรงดันไบอัสลบที่เกต

การลดปริมาณประจุบวกที่เกิดจากไอออนของโซเดียม สามารถทำได้หลายวิธีคือ การรักษาความสะอาดขณะทำการสร้างชั้นออกไซด์ เช่น การสร้างมอสในห้องสะอาด (Clean room) การใช้สารเคมี น้ำ และอุปกรณ์การทดลองที่สะอาด นอกจากนี้การเติมคลอรีนในปริมาณเพียงเล็กน้อยจากไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ขณะทำการสร้างชั้นของออกไซด์ จะทำให้ได้ชั้นของออกไซด์ที่สะอาด และมีปริมาณไอออนของโซเดียมน้อยลงได้ แต่เป็นเรื่องยากที่จะทำให้หมดไป

(ข) ประจุนิ่งในออกไซด์ (Fixed oxide charge: Q_f)

ประจุนิ่งในออกไซด์หมายถึงประจุที่เคลื่อนที่ไม่ได้ เป็นประจุบวกซึ่งเกิดขึ้นและอยู่ในชั้นออกไซด์โดยอยู่ห่างจากผิวสัมผัสระหว่าง $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ประมาณ 30 อังสตรอม ซึ่งเป็นชั้นที่เรียกว่า “Transition layer” (SiO_2) ประจุเหล่านี้เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยอะตอมของซิลิคอนเคลื่อนตัวแยกออกไปจากผิวผลึกซิลิคอน เพื่อทำปฏิกิริยากับอะตอมออกซิเจน อะตอมซิลิคอนเหล่านี้จะมีสภาพเป็นไอออน (ionic silicon) หากมีจำนวนมาก เมื่อกระบวนการออกซิเดชันเสร็จสิ้น ไอออนของซิลิคอนเหล่านี้จะยังคงอยู่ใกล้ๆ กับผิวสัมผัส $\text{SiO}_2\text{-Si}$ โดยไอออนนี้จะมีประจุไฟฟ้าบวกและไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้เกิดเป็นชั้น “Transition layer” (SiO_2) บางๆ อยู่ระหว่างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และซิลิคอน มีลักษณะคล้ายเป็นแผ่นประจุบวก (sheet of positive charges) ปริมาณของไอออนเหล่านี้ จะขึ้นกับอัตราการสร้างชั้นออกไซด์และอุณหภูมิที่ใช้ รวมทั้งระนาบของผลึกซิลิคอน ในกรณีการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีการจัดการเป็นอย่างดี สำหรับผลึกที่มีระนาบ {100} ประจุนิ่งนี้จะมีค่าหนาแน่นราว 10^{10} ประจุต่อตร.ซม. และสำหรับระนาบ {111} ประจุนิ่งจะมี

ค่าความหนาแน่นสูงขึ้นไปเป็น 10 เท่า ประจุนิ่งนี้หากอยู่ใกล้กับผิวสัมผัส $\text{SiO}_2\text{-Si}$ มาก จะทำให้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประจุเหล่านี้มีผลกระทบน้อยกว่าประจุของโซเดียมไอออนซึ่งเคลื่อนที่ได้ และปัญหานี้แก้ไขได้อย่างดี ด้วยการทำ “แอนนیل” (annealing) ให้แก่ชั้นออกไซด์ โดยให้ความร้อนแก่แผ่นผลึกขณะอยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) หรือ ไนโตรเจน (N_2) ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชั้นออกไซด์

(ค) ประจุกับดักที่ผิวสัมผัส หรือ สถานะผิว (Interface trapped charge : Q_{it} or Surface states: Q_{ss})

ประจุชนิดนี้จะเกิดที่ผิวสัมผัสของ SiO_2-Si ดังนั้นบางครั้งถูกเรียกว่า “สถานะผิว” (Surface states) โดยประจุนี้สามารถดักจับได้ทั้งอิเล็กตรอน และโฮล ประจุนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากมีปริมาณอะตอมออกซิเจนมากเกินพอ หรือเกิดจากการมีอะตอมแปลกปลอมอื่นๆที่ผิวสัมผัส สถานะผิวจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่อยู่ในแถบพลังงานต้องห้าม มีคุณสมบัติจับพาหะได้ ประจุเหล่านี้แม้มีเพียงจำนวนน้อยก็ตาม จะมีผลทำให้คุณสมบัติของมอสเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย เช่นกราฟ C-V จะผิดเพี้ยนไปจากเดิม การลดจำนวนประจุเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยการทำ “แอนนیل” ที่อุณหภูมิราว $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน

(ง.) ประจุกับดักในออกไซด์ (Oxide Trapped charges: Q_{ot})

ประจุนี้เป็นประจุบวก ที่เกิดจากการดักจับโฮลในชั้นออกไซด์ เกิดขึ้นโดยแสงหรือ “Photogenerated” ระหว่างการสร้างในเทคนิคของการ “Etching” และการสร้างฟิล์มบาง ซึ่งแผ่นผลึกจะถูกฉายด้วยแสง เนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ 8 eV. ดังนั้นโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 8 eV. เมื่อตกกระทบชั้นออกไซด์จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน โฮล แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนมีสภาพคล่องตัว (mobility) สูงกว่า อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ออกไป คงเหลือแต่โฮลที่ถูกดักไว้ในชั้นออกไซด์ ประจุนี้มีผลทำให้ ลักษณะของกราฟ C-V เลื่อนไปจากปกติ อย่างไรก็ตาม ประจุเหล่านี้อาจถูกกำจัดให้หมดไปได้โดยการ แอนนิลที่อุณหภูมิราว $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายหลังจากการฉายแสงทุกครั้ง

2.2.7 ผลของประจุในออกไซด์ (Oxide charges)

ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นในโครงสร้างมอส ปกติจะมีประจุไฟฟ้าต่างๆเกิดขึ้นดังที่กล่าวมาแล้ว ประจุต่างๆเหล่านี้ เป็นประจุไฟฟ้าบวก จึงมีผลในการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

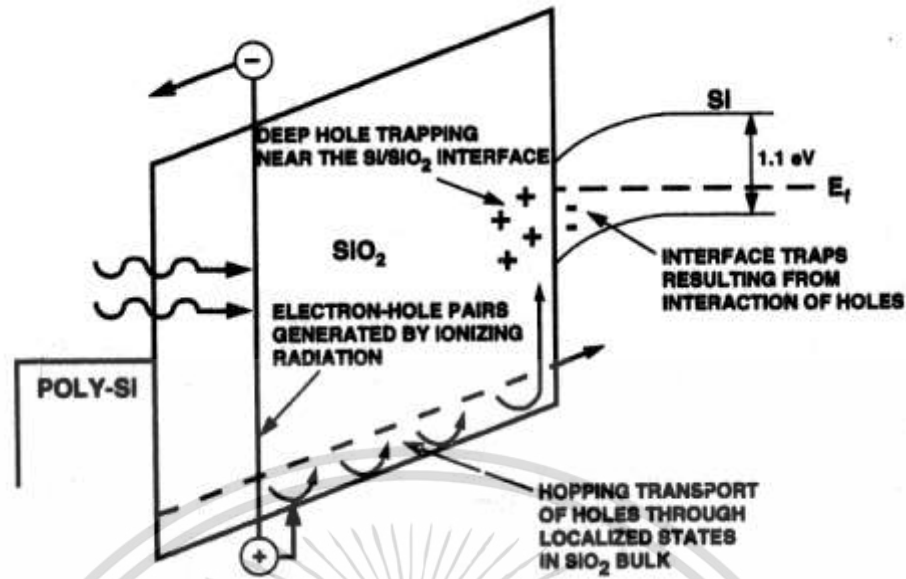
เคลื่อนที่เข้ามาบริเวณผิวสัมผัส $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีการงอโค้งเกิดขึ้น ซึ่งแสดงว่ามีแรงดันไฟฟ้าปรากฏขึ้นในสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เราจะพิจารณาว่าประจุไฟฟ้าบวกชนิดต่างๆที่เกิดขึ้นในออกไซด์ และที่ผิวสัมผัส มีความหนาแน่นของประจุรวม (oxide charge density) เท่ากับ Q_i คูลอมบ์ ตร.ซม. ผลจากการที่ประจุบวกนี้ เหนี่ยวนำอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำเข้ามาบริเวณผิวสัมผัส จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมซิลิคอนเท่ากับ Q_i/C_{ox} โวลต์ ดังนั้นถ้าต้องการที่จะหักล้างกับผลดังกล่าวนี้ จะต้องให้แรงดันไบอัสที่เกตเท่ากับ Q_i/C_{ox} โวลต์ ในทิศทางตรงข้าม เพื่อให้แถบพลังงานที่งอโค้ง กลับมาเป็น “แถบเรียบ” หรือ Flat band แสดงดังสมการที่ (2.23)

2.3 ผลกระทบการฉายรังสีและสภาพแวดล้อมการแผ่รังสี ^[4]

สำหรับการใช้งานทางทหารและภารกิจทางอวกาศ เป็นที่ชัดเจนว่ามีสภาพแวดล้อมที่มีการแผ่รังสีอย่างรุนแรง ปริมาณของรังสีนั้น อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่มากกระทำด้วย สำหรับการทำงานบนพื้นโลก อุปกรณ์อาจได้รับรังสีชนิดก่อก่อไอออน โดยทั่วไปสามารถแยกสภาพแวดล้อมการแผ่รังสีที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

- ก) สภาพแวดล้อมอวกาศ
- ข) การทดลองฟิสิกส์พลังงานสูง
- ค) สภาพแวดล้อมนิวเคลียร์
- ง) การประมวลผล-การแผ่รังสีเหนี่ยวนำ

ในการคาดการณ์การตอบสนองของอุปกรณ์มอสเมื่อได้รับรังสี เป็นสิ่งจำเป็นในการกำหนดจำนวนของพลังงาน โดยการแผ่รังสีในวัสดุ Ausman and McLean ^[2] followed by Benedetto and Boesh ^[3] กำหนดโดยค่าเฉลี่ยของรังสีก่อก่อไอออน ส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล การฉายรังสีเหนี่ยวนำจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกไปจากชั้นออกไซด์ เป็นผลให้เกิดประจุบวกในชั้นออกไซด์นั้น ส่งผลให้คุณลักษณะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์มอส เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าโครงสร้างมอสซึ่งมีความไวต่อรังสีก่อก่อไอออน คือ ซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.14 แผนภาพของผลกระทบการเหนี่ยวนำโดยการแผ่รังสีก่อไอออนในอุปกรณ์มอสเฟต

ในเกต (โลหะหรือโพลีซิลิกอน) และในฐานรองอิเล็กทรอนิกส์ที่รับพลังงานจากรังสีจะหายไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวัสดุเหล่านั้นมีความต้านทานน้อย ในทางตรงกันข้ามออกไซด์ ซึ่งเป็นฉนวน อิเล็กตรอนและโฮลมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งคู่อิเล็กตรอนโฮลที่ได้รับพลังงานจากรังสีมากพอจะถูกแยกออกจากกันที่ชั้นออกไซด์โดยสนามไฟฟ้าและ ตัวอย่างเช่นในกรณี ไบอัสแรงดันบวกไปยังเกต อิเล็กตรอนจะดริฟท์ไปยังเกตในเวลาที่ยาวนาน (พิโควินาที) ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปยัง อินเตอร์เฟซ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ด้วยปรากฏการณ์ขนถ่ายโดยไปอยู่ ใกล้กับอินเตอร์เฟซ ซึ่งยังคงอยู่ในออกไซด์ โฮลบางตัวอาจ Trapped ทำให้เกิดประจุบวกอยู่ในออกไซด์

2.3.1 ผลกระทบของการแผ่รังสีของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟต

ผลกระทบของการฉายรังสีที่มีต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอสเฟต อธิบายเป็นข้อๆได้ดังนี้

2.3.1.1 การเลื่อนของแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage Shift)

แรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ จะเปลี่ยนแปลงเมื่ออุปกรณ์ถูกฉายรังสี ซึ่งการเปลี่ยนแปลง (ΔV_{TH}) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ออกไซด์ (ΔV_{ox}) เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเนื่องจากกับดักที่ออกไซด์ (Oxide Trapped : ΔN_{ot}) รวมกับค่าแรงดันเกิด

จากการเปลี่ยนแปลงของกับดักที่อินเทอร์เฟซกับสารกึ่งตัวนำ SiO₂-Si (Interface Trapped: ΔN_{it})
เนื่องจากรังสี แสดงดังสมการ (2.29)

$$\Delta V_{TH} = -e \cdot \frac{1}{C_{ox}} \cdot \Delta N_{ot} \pm e \cdot \frac{1}{C_{ox}} \cdot \Delta N_{it} \quad (2.29)$$

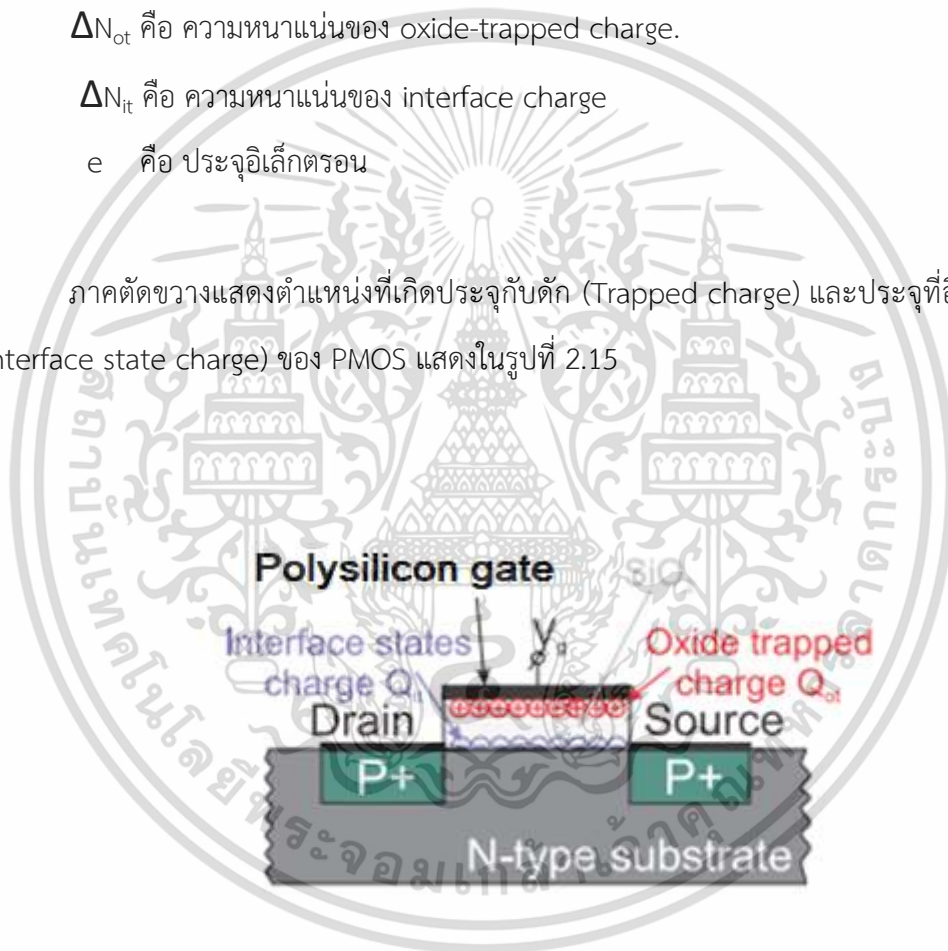
โดยที่ C_{ox} คือ ความจุออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่

ΔN_{ot} คือ ความหนาแน่นของ oxide-trapped charge.

ΔN_{it} คือ ความหนาแน่นของ interface charge

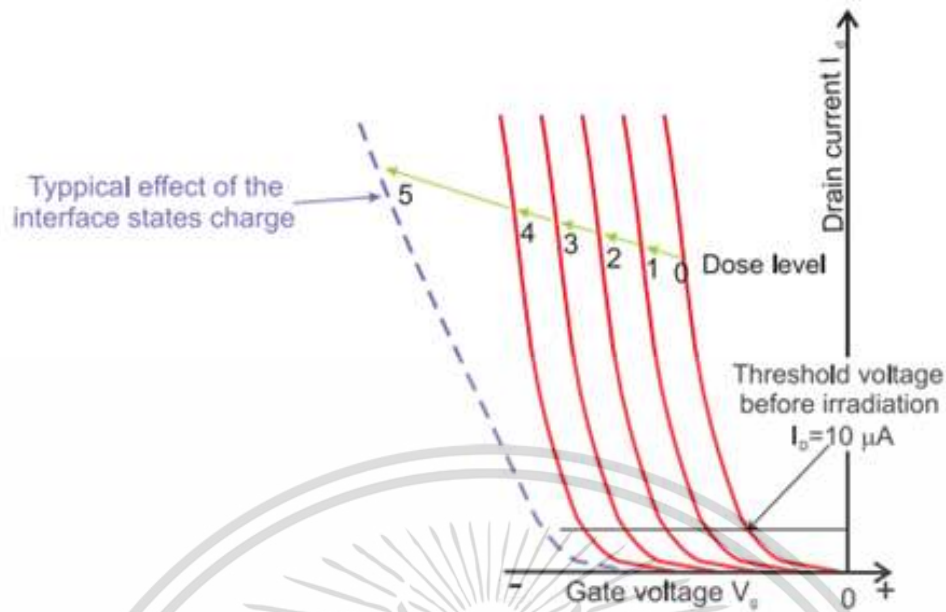
e คือ ประจุอิเล็กตรอน

ภาคตัดขวางแสดงตำแหน่งที่เกิดประจุกับดัก (Trapped charge) และประจุที่อินเทอร์เฟซ (Interface state charge) ของ PMOS แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งที่เกิดประจุกับดักใน PMOS

ประจุที่ได้รับรังสีจะเกิดการไอออไนซ์ เป็นสาเหตุที่ทำให้แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงซึ่ง
สามารถแสดง ผลของปริมาณรังสี (Dose Level) ที่มีผลต่อการเลื่อนของแรงดันขีดเริ่ม ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันไฟฟ้าเกต I_D - V_{GS} เมื่อปริมาณรังสีเปลี่ยนแปลง

2.3.1.2 การลดลงของค่าความนำไฟฟ้า (Transconductance)

ผลของประจุ interface trapped บริเวณซิลิกอนไดออกไซด์และซิลิกอน/ซิลิกอนไดออกไซด์ นั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความคล่องตัวพาหะในช่องทางเดินกระแส และส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าลดลงปรากฏการณ์นี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุที่ติดอยู่ สามารถอธิบายด้วยสมการ

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha_{it}\Delta N_{it} + \alpha_{ot}\Delta N_{ot}} \quad (2.30)$$

โดยที่ μ_0 คือ ค่าความคล่องตัวของ low field surface

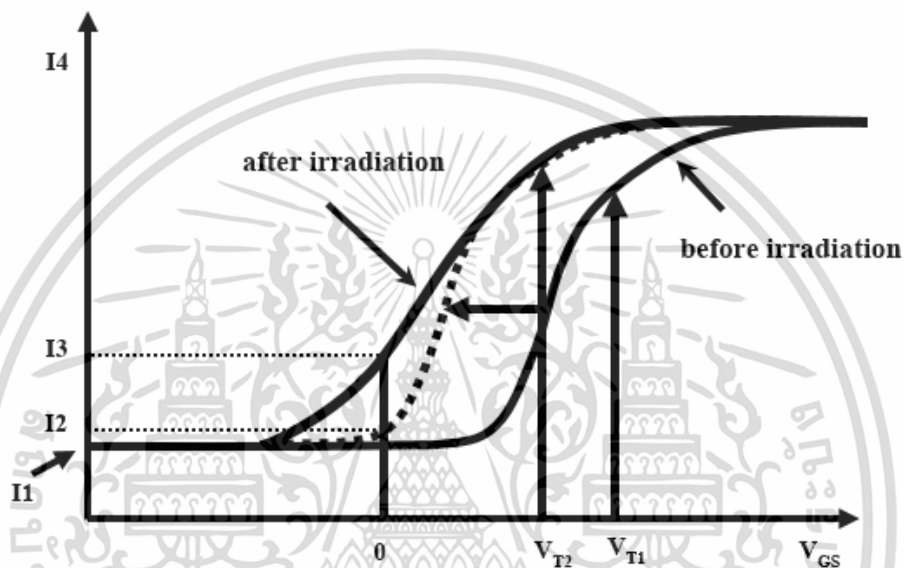
α_{it} คือ สัมประสิทธิ์ของผลกระทบของ oxide-trapped charge

α_{ot} คือ สัมประสิทธิ์ของผลกระทบของ interface states

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3 การเพิ่มขึ้นของกระแสซับเทรชโวลต์ (Sub-threshold Currents)

กระแสออฟเซต คือ กระแสซึ่งไหลมาจากเดรนไปซอส เมื่อ $V_{GS}=0$ V เปรียบเสมือน กระแสรั่วในมอสเฟต สำหรับการฉายรังสีให้แก่ทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น จะนำไปสู่สองผลกระทบในการเพิ่มขึ้นของกระแสออฟเซต ได้แก่ การเพิ่มขึ้นในกระแสซับเทรชโวลต์ และการก่อกำเนิดกระแสปรสิต



รูปที่ 2.17 การเพิ่มขึ้นของกระแสซับเทรชโวลต์ในทรานซิสเตอร์ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น

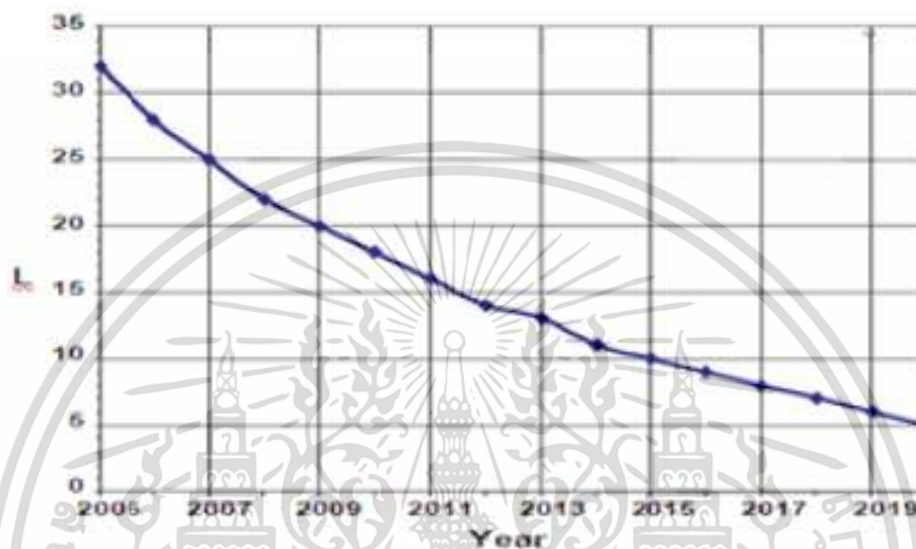
ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นช่วงที่อันตรายสำหรับการนำไปใช้งาน ตัวอย่างเช่น เมื่อนำทรานซิสเตอร์ไปใช้งานเป็นสวิตช์ การเพิ่มขึ้นของกระแสซับเทรชโวลต์ อาจเกิดจากสองปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยแรก การลดลงของแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage shift) หลังจากการฉายรังสี (เส้นปะ) แสดงดังรูปที่ 2.17 (จาก V_{T1} เปลี่ยนไปเป็น V_{T2}) ส่งผลให้กระแสซับเทรชโวลต์เพิ่มขึ้นจาก I_1 ไปเป็น I_2 และปัจจัยที่สอง กระแสซับเทรชโวลต์เพิ่มขึ้นเป็น I_3 ซึ่งเสมือนการเปิดสวิตช์นั่นเอง

2.4 การพัฒนาอุปกรณ์มอสเฟตขนาดเล็ก

ในช่วง 40 ปีที่ผ่านมาการลดลงของขนาดชิปนั้นประสบความสำเร็จอย่างมาก การทำให้ชิปมีขนาดเล็กลงนั้นเป็นไปตามกฎของมัวร์^[5] ซึ่งคาดการณ์ว่าขนาดโครงสร้างจะลดลง 0.7 เท่าทุกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้ชิปทำงานเร็วขึ้น 15-30 % ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานและยังสามารถเพิ่มหน่วยความจำ (Dynamic ynamic Random Access Memory หรือ ดีแรม) ขึ้น 2 เท่าอีกทั้งราคาก็ถูกลง ซึ่งปัจจุบันทรานซิสเตอร์ที่มีความยาวเกดเล็กที่สุด มีขนาด 28 นาโนเมตร และคาดว่าจะมีขนาด 5 นาโนเมตร ในปี ค.ศ.2020 ^[6]



รูปที่ 2.18 แสดงแนวโน้มของความยาวเกด (หน่วย:ไมโครเมตร) ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละปี

การลดขนาดของชิปนั้นมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ชิปมีประสิทธิภาพสูงและลดต้นทุนในการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.18 ขนาดของชิปที่เล็กลงนั้น ทำให้ขนาดของวงจรโดยรวมเล็กลง ทำให้สามารถใช้ชิปได้มากขึ้นในขณะที่มีขนาดวงจรเท่าเดิม ซึ่งการลดขนาดมอสเฟตนั้น ทำได้โดยการปรับความยาวช่องทางเดินกระแส และเพิ่มความเร็วพาหะ ดังนั้นเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพ พบว่ามอสเฟตสามารถทำงานได้ดีขึ้น ข้อดีอีกอย่างคือ การลดการใช้พลังงานซึ่งเป็นประโยชน์มาก เช่น การนำไปใช้ใน โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์พกพา อุปกรณ์การแพทย์ที่สามารถฝังในตัวคนไข้ได้ หรือ อุปกรณ์พกพาอื่นๆ เป็นผลให้สามารถใช้งานแบตเตอรี่ได้นานขึ้นอีกด้วย

กฎการปรับขนาดนั้นถูกเสนอครั้งแรกโดย Dennard et al ^[7] ด้วยแนวความคิดการลดขนาดของอุปกรณ์ แต่ยังคงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่นเดิม กฎการปรับขนาดรู้จักกันในชื่อ constant field scaling ซึ่งจะส่งผลให้สนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ไม่ได้ปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ทางการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดซึ่งในอุปกรณ์ที่ได้ทำการปรับขนาดนั้นจะต้องหลีกเลี่ยงผลกระทบของสนามไฟฟ้าสูง ที่อาจเกิดขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น mobility degradation , impact ionization , hot-carrier effect เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการสร้างมอสเฟตและกระบวนการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาการออกแบบและกระบวนการผลิตมอสเฟตทรานซิสเตอร์ ด้วยเทคโนโลยีซีมอสระดับ 0.8 ไมครอน (0.8-CMOS technology) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสร้างมอสเฟตของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center : TMEC) เนื่องจากคุณลักษณะทางไฟฟ้าที่สำคัญของอุปกรณ์มอสเฟตนั้นสามารถกำหนดได้ด้วยการออกแบบและกระบวนการผลิตดังกล่าว และแสดงถึงการเตรียมการทดลองการฉายรังสีแกมมาด้วยโคบอลต์-60 เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟต

3.1 การออกแบบโครงสร้างมอสเฟต

การออกแบบอุปกรณ์มอสเฟตนั้น แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบมอสคาปาซิเตอร์ และการออกแบบมอสเฟตทรานซิสเตอร์แบบชนิดเอ็น และ ชนิดพี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

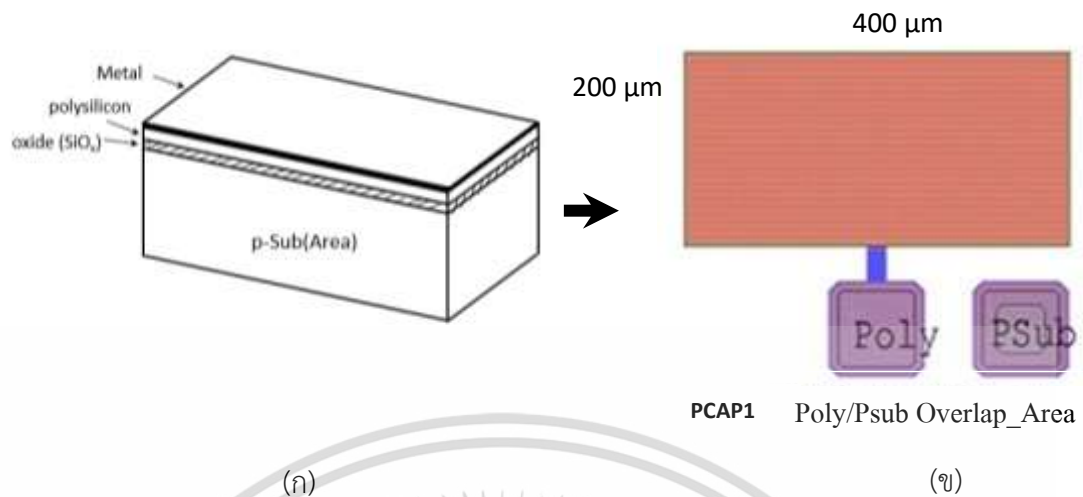
3.1.1 การออกแบบโครงสร้างมอสคาปาซิเตอร์ (Mos Capacitor)

มอสคาปาซิเตอร์นั้นเป็นโครงสร้างพื้นฐานของมอสทรานซิสเตอร์ ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบมอสคาปาซิเตอร์จำนวน 4 โครงสร้าง ดังนี้

- มอสคาปาซิเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Area
- มอสคาปาซิเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Perimeter
- มอสคาปาซิเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Area
- มอสคาปาซิเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Nwell_Perimeter

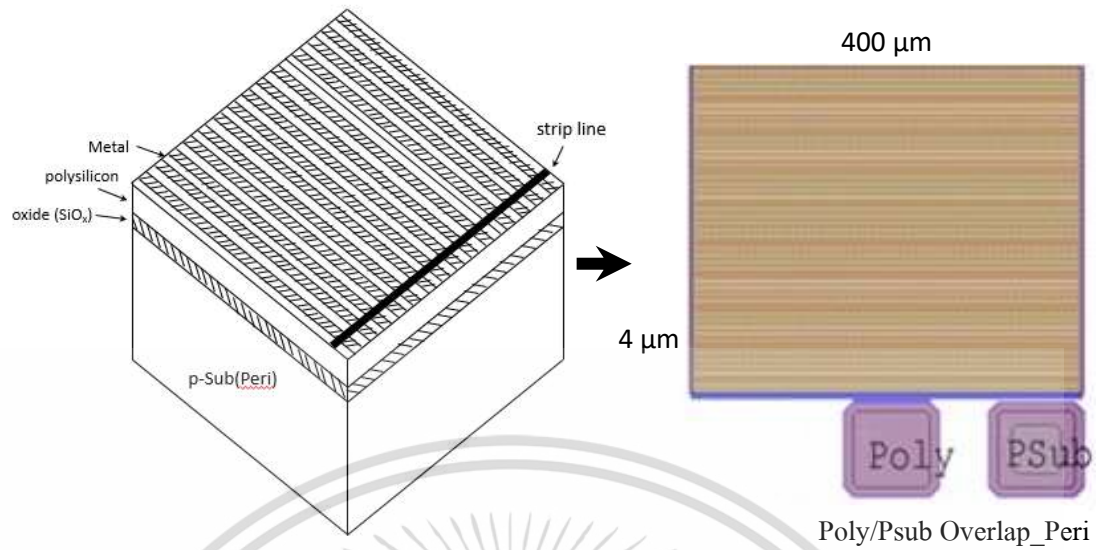
โดยการกำหนดพื้นที่ มอสคาปาซิเตอร์ของบริเวณ Area ให้มีขนาด 80,000 ตารางไมโครเมตร โดยมีความยาว 400 ไมโครเมตร และความกว้าง 200 ไมโครเมตร ทำให้มีขนาดเส้นรอบรูป เท่ากับ 1200 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.3 สำหรับพื้นที่มอสคาปาซิเตอร์ของบริเวณ Peri มีพื้นที่รวม 80,000 ตารางไมโครเมตรเท่ากัน แต่มีขนาดเส้นรอบรูปรวม 40,400 ตารางไมโครเมตร โดยมีความยาว 400 ไมโครเมตร และความกว้าง 4 ไมโครเมตร จำนวน 50 แถบ และมีระยะห่างระหว่าง แถบ 4 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



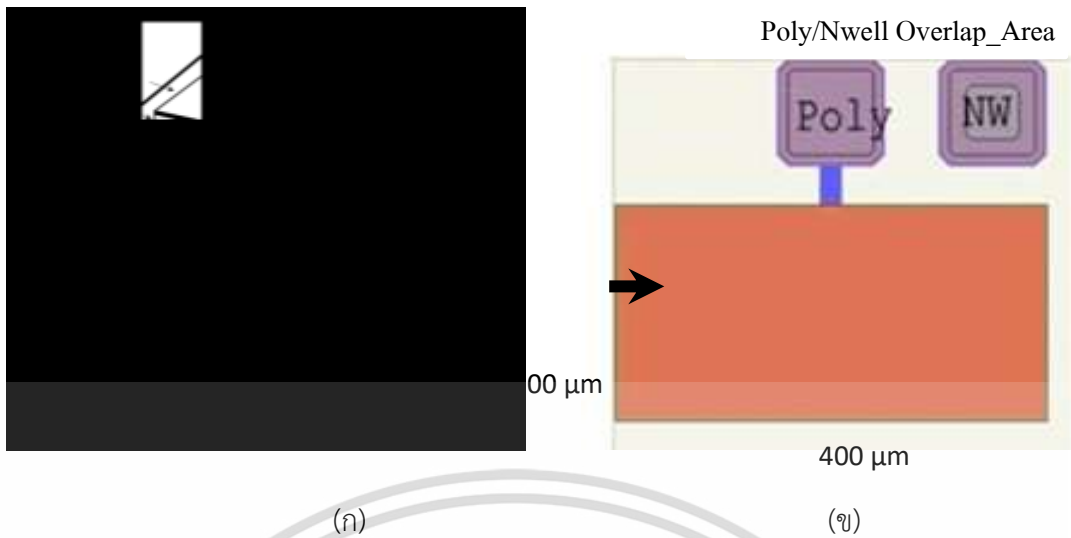
รูปที่ 3.1 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Area
 (ข) การออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Area
 (ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



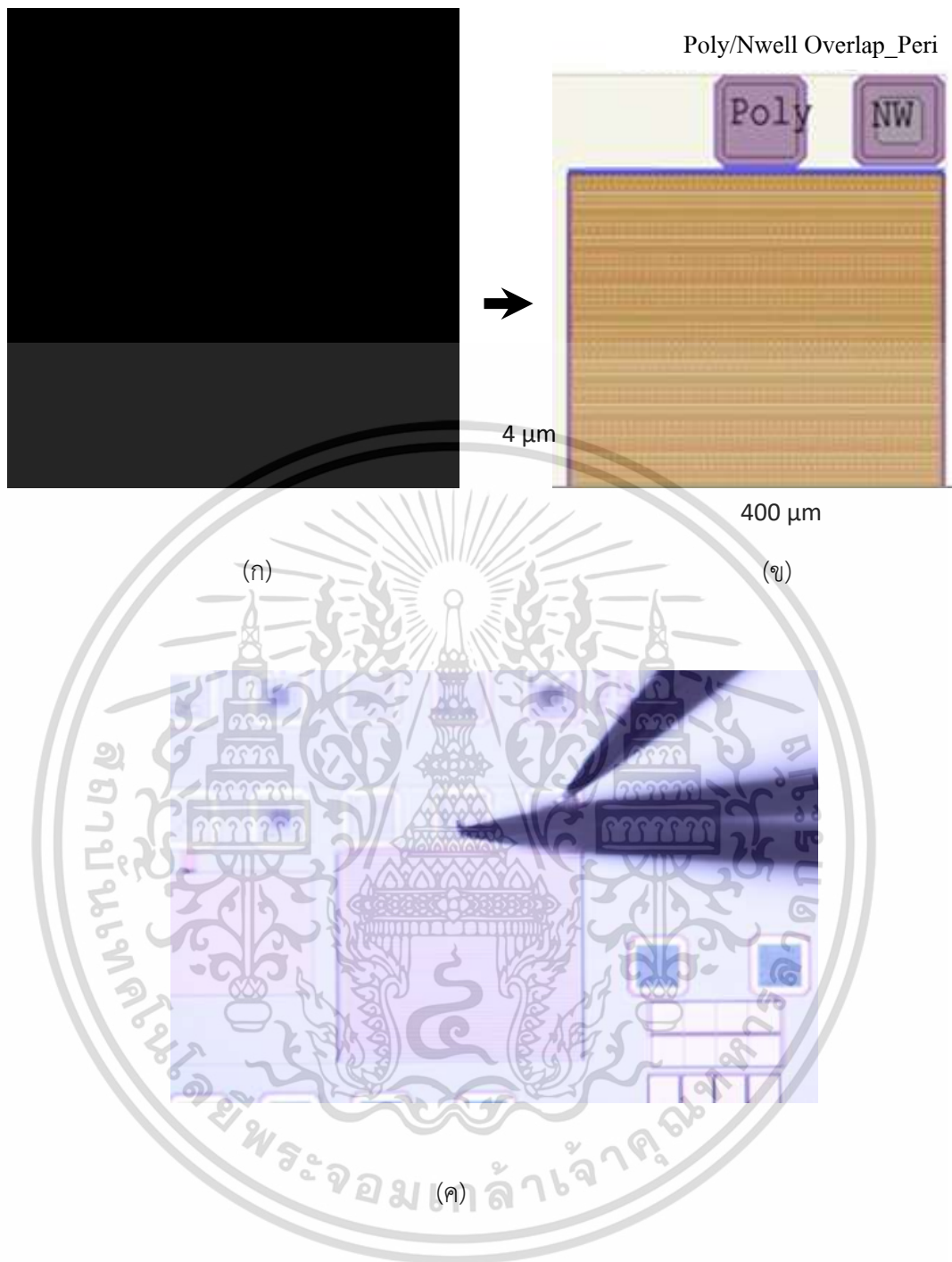
รูปที่ 3.2 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Psub_Peri และ
 (ข) การออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Peri
 (ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Psub_Peri

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Nwell_Area
 (ข) การออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Area
 (ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดง (ก) ภาคตัดขวางของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/ Nwell_Per
 (ข) การออกแบบ Layout ด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Per
 (ค) ภาพมุมมองด้านบน (top view) ของมอสคาปาซีเตอร์ โครงสร้าง Poly/Nwell_Per

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างมอสทรานซิสเตอร์

สำหรับการออกแบบโครงสร้างมอสเฟท จะประกอบด้วย 4 ชั้น คือ เกต (Gate : G), ซอส (Source : S) , เดรน (Drain : D) and ซับสเตรต (Substrate : B) ในกรณีมอสทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น ชั้นซอสและชั้นเดรนนั้นทำการเจือสารชนิดเอ็น "n" และบริเวณบอดี้ (body terminal) นั้นทำการเจือสารชนิดพี "p" และในกรณีมอสทรานซิสเตอร์ชนิดพี ชั้นซอสและชั้นเดรนนั้นทำการเจือสารชนิดพี "p" และบริเวณบอดี้ (body terminal) นั้นทำการเจือสารชนิดเอ็น "n" ด้วยการยิงฝังประจุที่มีความหนาแน่นสารเจือ (Concentration) เท่ากับ $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ซึ่งถูกสร้างบนฐานรองซิลิกอนชนิดพี มีค่าพิทความต้านทาน 20-25 โอห์ม-เซนติเมตร ในส่วนของชั้นเกต Gate (G) ดังกล่าวประกอบด้วย n+ โพลีซิลิกอน ที่ทำการยิงฝังประจุอาร์เซนิก (As) ที่ความเข้มข้นสารเจือ (Dose) เท่ากับ $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ใช้พลังงาน 100 keV สำหรับเอ็นมอสและพีมอส ซึ่งการกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์เอ็นมอสและพีมอสนั้น เลือกชดเชยโดยการยิงฝังประจุไอออนโบรอนไดฟลูออไรด์ (BF_2) บริเวณรอยต่อของซอสและเดรนมีค่าความลึกประมาณ 0.4 ไมโครเมตร และมีค่าความต้านทานแผ่น (sheet resistance) เท่ากับ $75 \Omega/\text{square}$ ซึ่งสามารถสรุปผลพารามิเตอร์ที่สำคัญดังตารางที่ 3.1

อุปกรณ์มอสเฟทที่ได้ทำการออกแบบในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบความกว้างของช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร และความยาวช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20, 1.2, 0.8, 0.7 และ 0.6 ไมโครเมตร เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อนที่จะนำไปทำการฉายรังสีแกมมาต่อไป

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบโครงสร้างเอ็นมอสเฟทและพีมอสเฟท

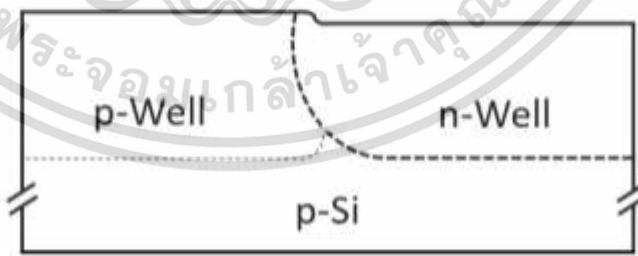
Parameter	Value	Unit
N-well sheet	1,200	Ω/sq
P-substrate sheet	2,000	Ω/sq
N+ active sheet	50	Ω/sq
N+ active junction depth	0.4	μm
P+ active sheet	90	Ω/sq
P+ active junction depth	0.35	μm
N+poly gate sheet	30	Ω/sq
N+poly gate thickness	3,500	\AA
Gate oxide thickness	150	\AA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้างซีมอสทรานซิสเตอร์

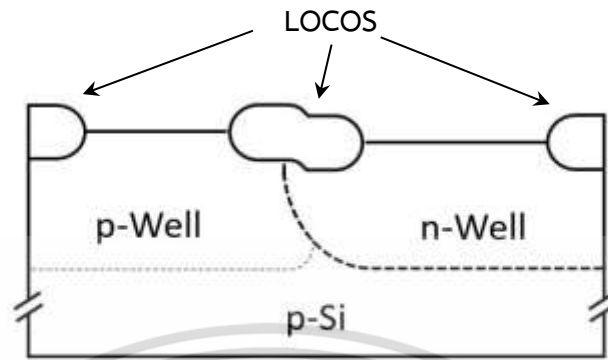
โครงสร้างของซีมอสทรานซิสเตอร์ ประกอบด้วย เอ็นมอสเฟทและพีมอสเฟท ซึ่งในกระบวนการสร้าง แบ่งออกเป็นขั้นตอนของกระบวนการสร้างอุปกรณ์ 8 ขั้นตอน และขั้นตอนของการสร้างลวดลายโลหะ 5 ขั้นตอน โดยเริ่มจากฐานรองเป็นซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดพี ระบาย (100) มีค่าพิกต์ความต้านทาน 20-25 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้เทคนิคการยิงฝัประจุ เจือสารโบรอน เพื่อสร้างบ่อพีที่ความเข้มข้นสารเจือเท่ากับ $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และยิงฝัประจุ เจือสารอาร์เซนิก (As) เพื่อสร้างบ่อเอ็น ที่ความหนาแน่นสารเจือเท่ากับ $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ สำหรับเอ็นมอสและพีมอส ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.5 ถึง 3.20

รูปที่ 3.5 ฐานรองซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดพี ระบาย (100) พิกต์ความต้านทาน 20-25 โอห์ม-เซนติเมตร

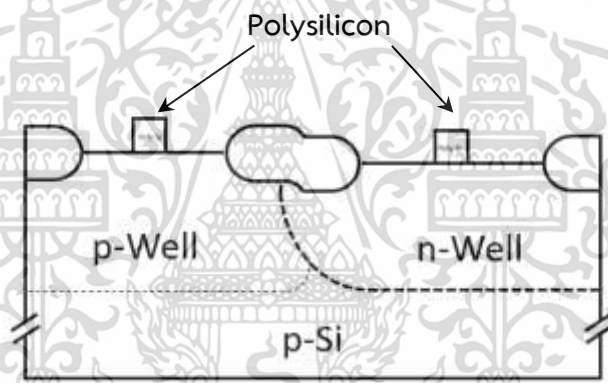


รูปที่ 3.6 แสดงส่วน p-Well และ n-Well ที่สร้างบน Psub

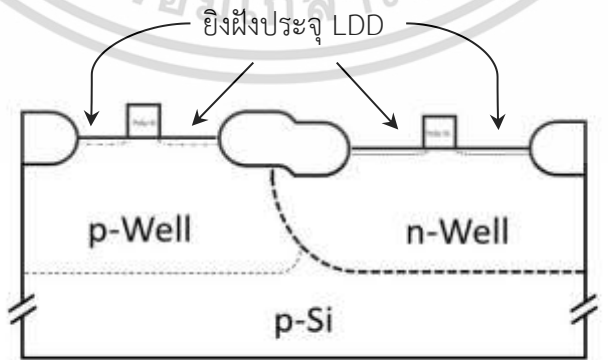
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงส่วน LOCOS

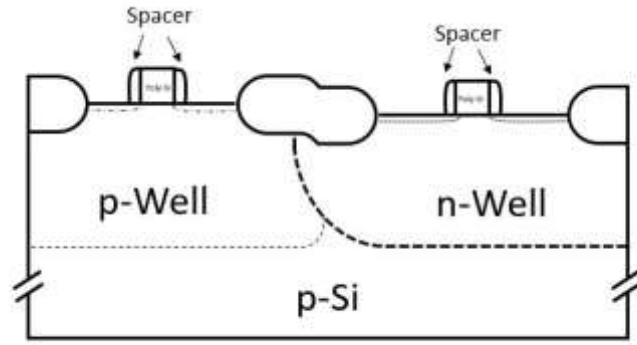


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการสร้างเกตด้วยโพลีซิลิคอน

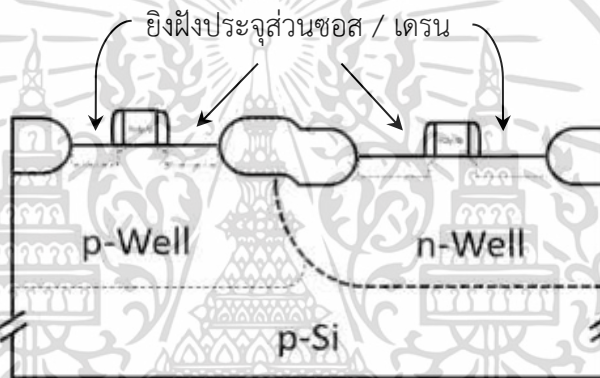


รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการยิงฝังประจุ LDD

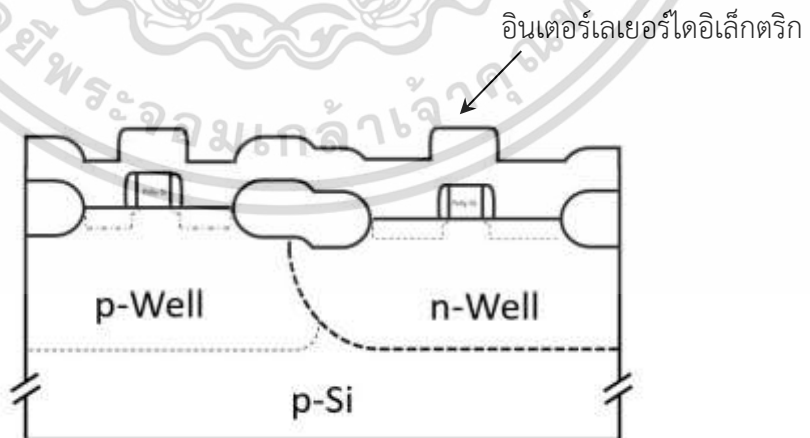
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการสร้าง Sidewall Spacer

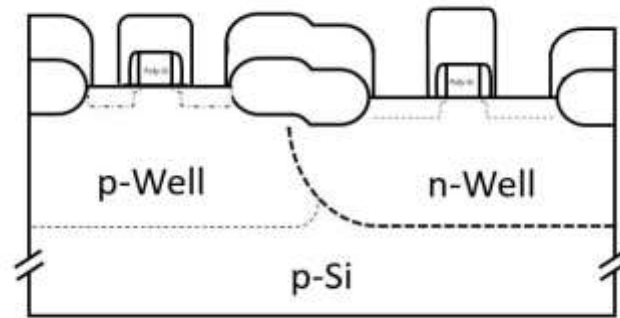


รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการยিংฝิ่งประจุส่วนซอส/เดรน

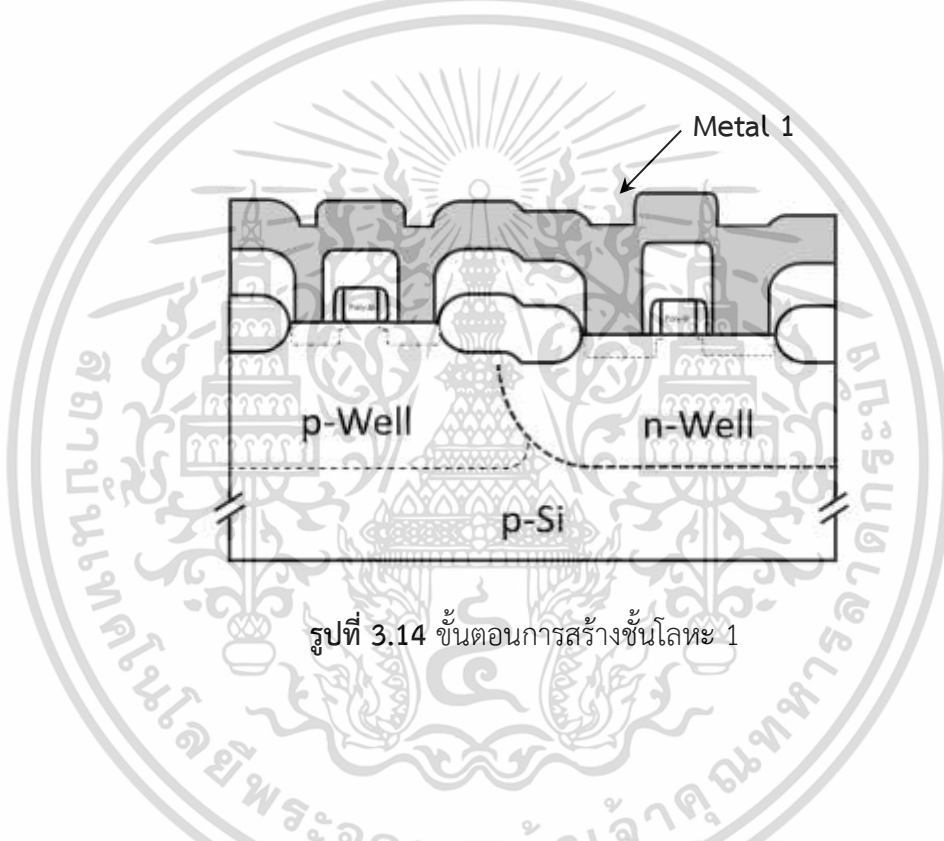


รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการสร้างชั้นอินเตอร์เลเยอร์ไดอิเล็กตริก

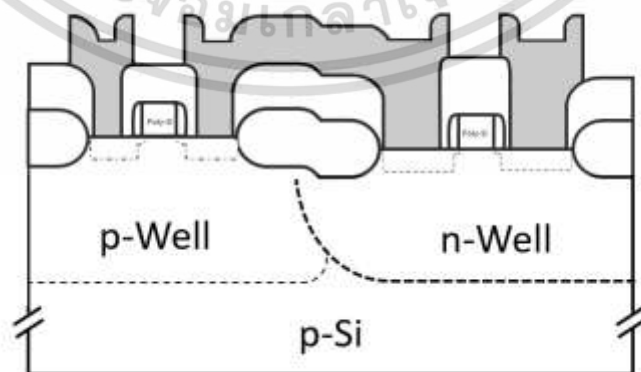
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการกัดรูเชื่อมต่อ (Contact)

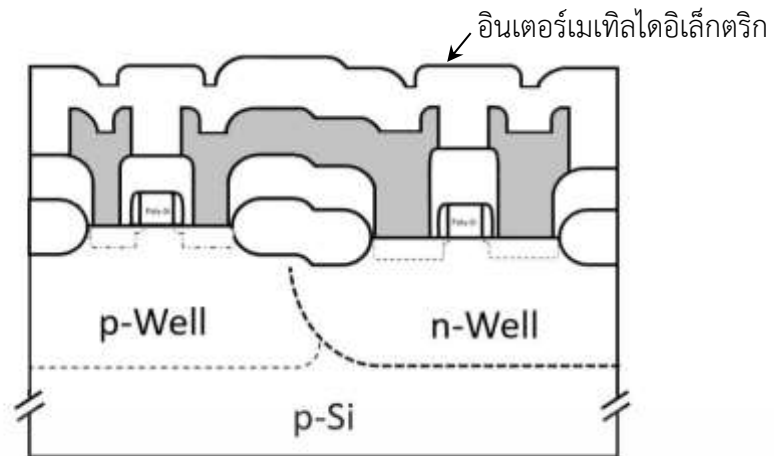


รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการสร้างชั้นโลหะ 1

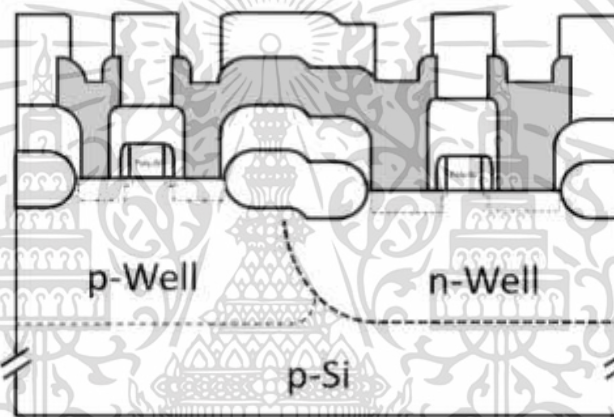


รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการกัดละลายชั้นโลหะ 1

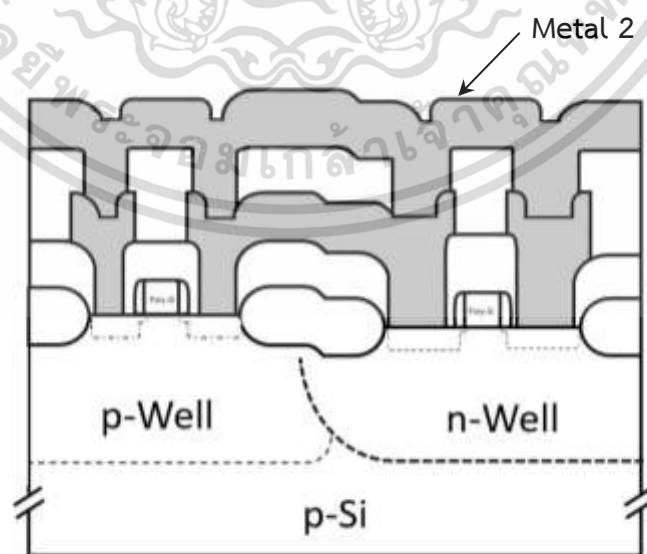
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการสร้างชั้นอินเทอร์เมทัลไดอิเล็กทริก

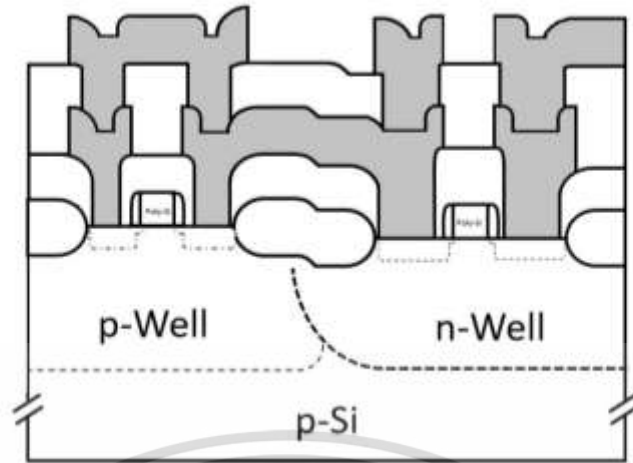


รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการกัดรูเชื่อมต่อ Via

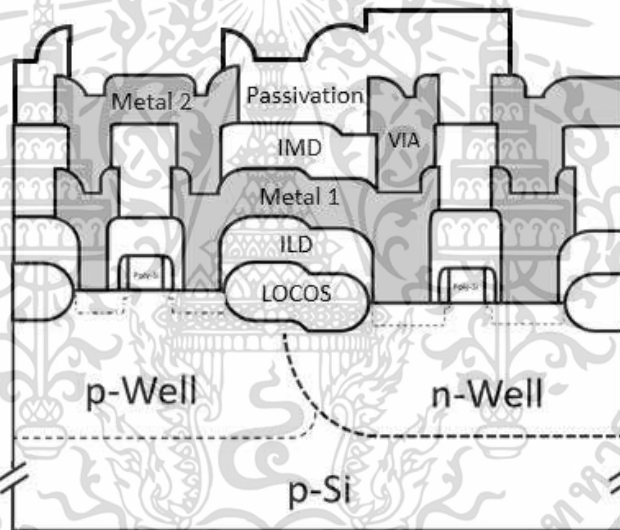


รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการสร้างชั้นโลหะ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



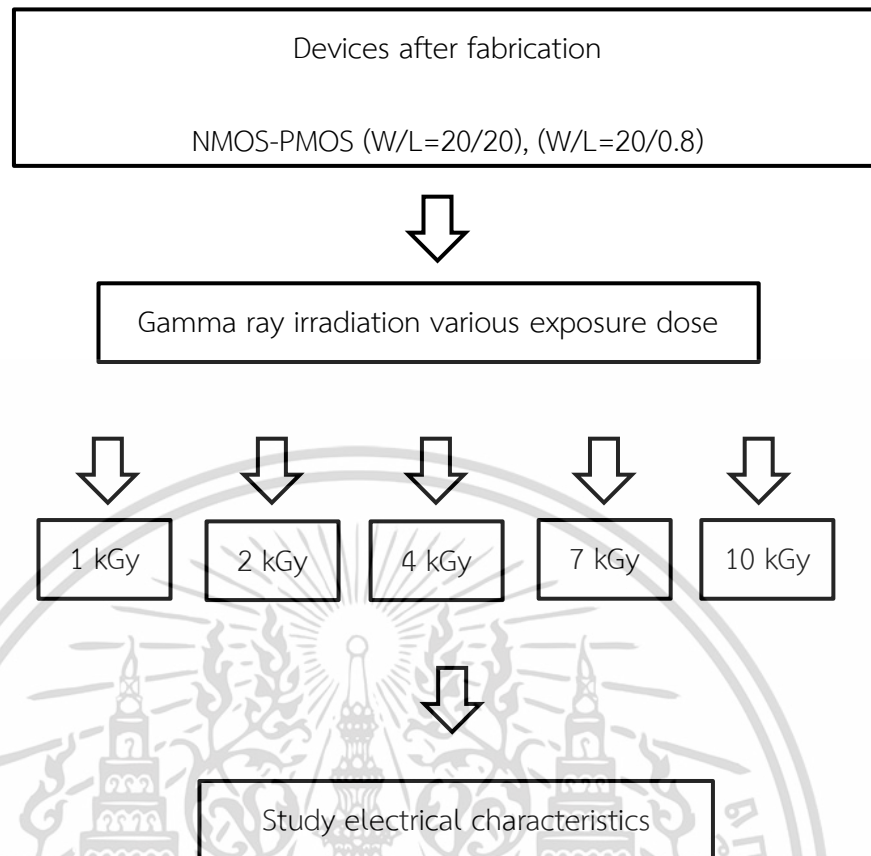
รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการกัดลวดลายชั้นโลหะ 2



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการสร้างชั้น Passivation และเปิด PAD

3.3 การฉายรังสีแกมมาและการจัดวางอุปกรณ์มอสเฟต

การทดลองนี้ได้นำเอ็นมอสเฟตและพีมอสเฟตที่ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วไปทำการฉายรังสีแกมมา แผนผังแสดงลำดับการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.21 พลังงานรังสีที่ใช้มีความเข้ม 1 , 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์ ใช้เวลาในการฉาย 15.38 , 30.77, 61.54, 107.69 และ 153.85 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ไดอะแกรมการทดลองการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟท

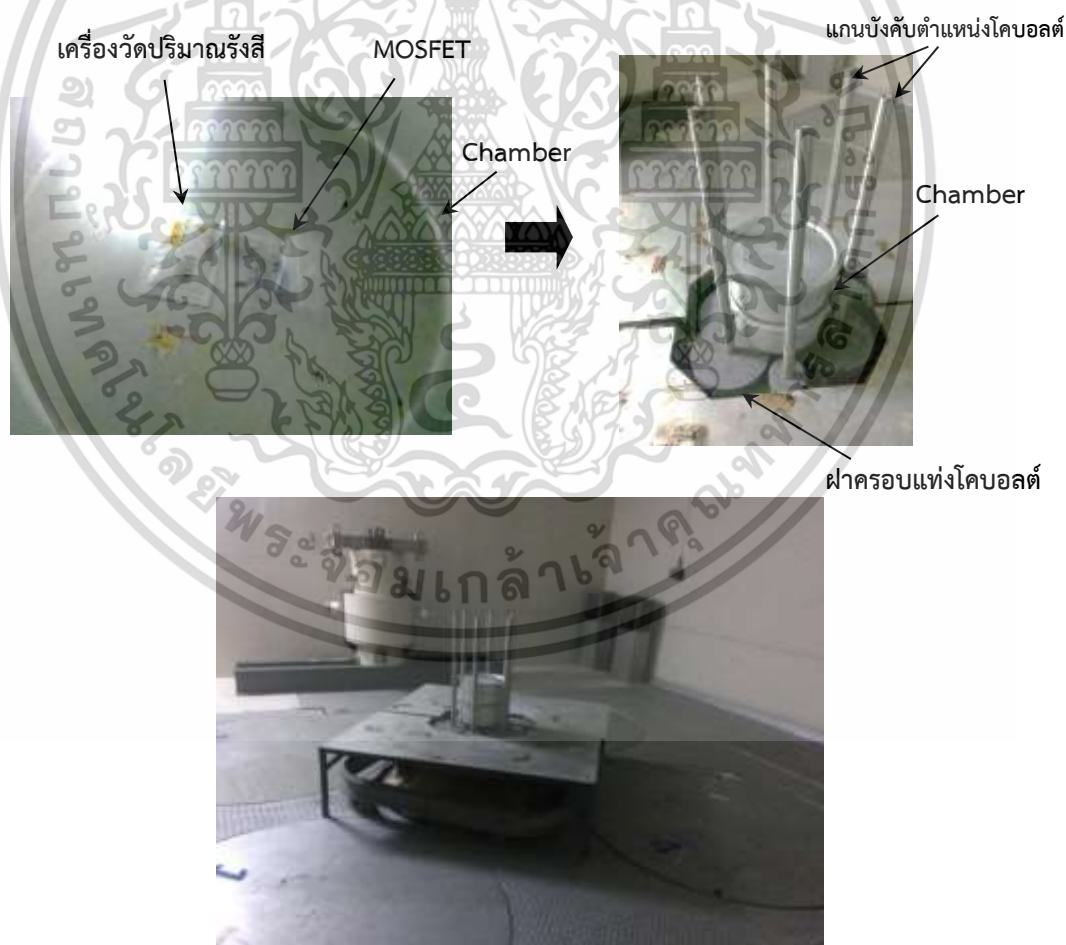
การฉายรังสีแกมมาลงบนเอ็นมอสเฟทและพีมอสเฟทนั้น ได้รับการอนุเคราะห์จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สทท. โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ที่พลังงาน 1.25 MeV ที่อุณหภูมิตั้ง 6 แห่ง ซึ่งแต่ละแห่งมีความแรงประมาณ 12,000 คูรี ความแรงรังสีรวมทั้งหมด 70,500 คูรี (ปัจจุบันความแรงรังสีลดลงเหลือ 49,374 คูรี) ผลิตโดยบริษัท Paul Stephens Consultancy ประเทศอังกฤษ ปริมาณรังสีที่วัดได้ปัจจุบันที่ตำแหน่ง Center ได้เท่ากับ 12 kGy/hr ตำแหน่งอื่นๆ ลดลงตามระยะทางที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสี แห่งของต้นกำเนิดรังสีจัดเก็บแบบแห้ง ในที่กำบังรังสีซึ่งทำจากตะกั่วหนาขณะที่ไม่ได้ใช้งาน ในขณะที่ใช้งานแห่งต้นกำเนิดรังสีจะถูกดันด้วยลมออกจากตัวกำบังรังสี เพื่อให้รังสีแผ่ออกมา ก่อนการทดลองต้นกำเนิดรังสีมีความแรงรังสี 49,374 คูรี การจัดวางเรียงอุปกรณ์มอสเฟท เพื่อการฉายรังสีแกมมาแสดงดังรูปที่ 3.22 การกำหนดเงื่อนไขในการฉายแกมมาครั้งนี้ กำหนดให้ transient dose = 290.68 Gy/hr, GC3 centre turn: 3.9 kGy/hr โดยทำใช้ชิพมอสทั้งหมดจำนวน 5 ตัวอย่าง แล้วทำการฉายรังสีทั้ง 5 ตัวอย่างที่ปริมาณ 1 กิโลเกรย์ ใช้เวลา 15.38 นาที จากนั้นนำชิพมอสตัวอย่างที่ 1 (ได้รับ

ปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์) ออกมาจากห้องปฏิบัติการฉายรังสี แล้วทำการฉายรังสีต่อทั้ง 4 ตัวอย่างที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้ไปใช้ประโยชน์ในการทำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ 1 กิโลเกรย์ ใช้เวลา 30.77 นาที (ได้รับปริมาณรังสี 2 กิโลเกรย์) จากนั้นนำซิมอสตัวอย่างที่ 2 (ได้รับปริมาณรังสี 2 กิโลเกรย์) ออกมาจากห้องปฏิบัติการฉายรังสี แล้วทำการฉายรังสีแกมมาลงบนซิมอสตัวอย่างที่ 3, 4 และ 5 จนครบ เพื่อให้ซิมอสได้รับปริมาณรังสีแกมมาสะสม เท่ากับ 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีแกมมาด้วยรังสีโคบอลต์-60 ที่พลังงาน 1.25 MeV ที่ อุณหภูมิห้อง

Exposure dose	Irradiation energy				
	1 kGy				
เวลาที่ใช้(นาที)	15.38	30.77	61.54	107.69	153.85



รูปที่ 3.22 แสดงการจัดวางอุปกรณ์มอสเฟต ภายในห้องฉายรังสีแกมมาของสถาบันเทคโนโลยี

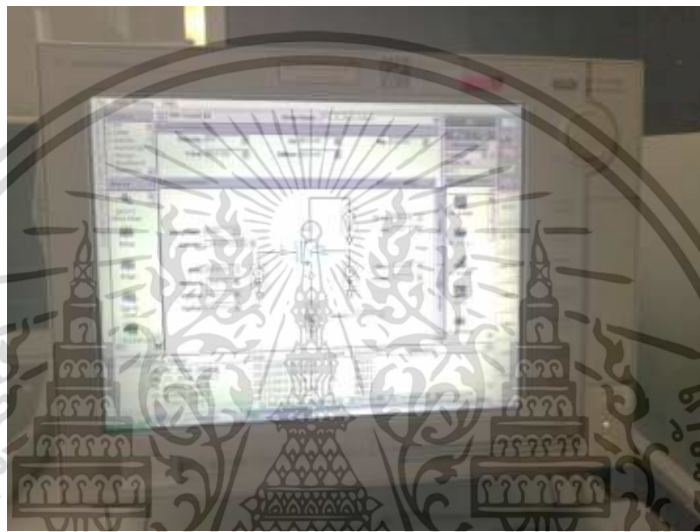
นิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

อุปกรณ์มอสเฟตที่ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้านั้น ได้ดำเนินการทดสอบก่อนและหลังจากการได้รับรังสีแกมมา โดยใช้เครื่องมือการวัด ดังนี้

- Precision semiconductor parameter analyser B-1500A และ Probe Station แสดงดังรูปที่ 3.23
- Probe station Cascade Microtech รุ่น M150 แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 แสดง Precision semiconductor parameter analyser B-1500A



รูปที่ 3.24 แสดง Probe station Cascade Microtech รุ่น M150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบอุปกรณ์พีมอสเฟตและเอ็นมอสเฟตที่สร้างขึ้น เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ด้วยการนำเสนอการทบทวนความสัมพันธ์ของสภาพคล่องของประจุพาหะที่เกิดจากผลกระทบของรังสีแกมมา จากการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากผลกระทบของรังสีแกมมา เพื่ออธิบายผลรวมของอัตราปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อความหนาแน่นของประจุอินเทอร์เฟซ

4.1 การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าความจุไฟฟ้าของมอสคาปาซิเตอร์ เพื่อหาค่าแรงดันแถบเรียบ

การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าของมอสคาปาซิเตอร์ มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลกระทบของรังสีแกมมาที่ให้ค่าของประจุไฟฟ้าในออกไซด์ (C_{ox}) เปลี่ยนแปลง โดยทำการทดสอบในมอสคาปาซิเตอร์ ทั้ง 4 โครงสร้าง ได้แก่

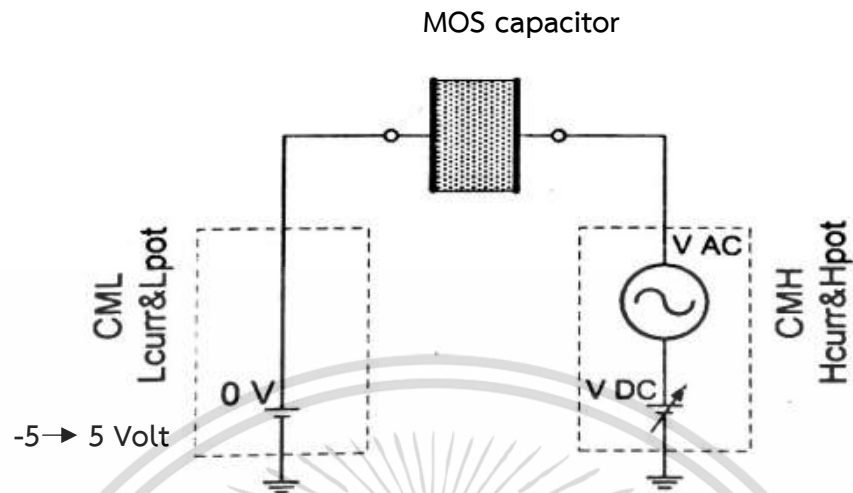
- 1.) โครงสร้าง Poly/Psub_Area
- 2.) โครงสร้าง Poly/Psub_Perimeter
- 3.) โครงสร้าง Poly/Nwell_Area และ
- 4.) โครงสร้าง Poly/Nwell_Perimeter ซึ่งการออกแบบโครงสร้างนั้นกำหนดให้

- โครงสร้าง Area มีเส้นรอบรูปเท่ากับ 1,200 ไมโครเมตร และ โครงสร้าง Peri มีเส้นรอบรูปเท่ากับ 40,400 ไมโครเมตร และ

- โครงสร้าง Area และ Peri มีขนาดพื้นที่ทั้งหมดเท่ากัน คือ 80,000 ตารางไมโครเมตร

จากนั้นทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเกต ($C-V_G$) ทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัด Probe station และ Microtech M150 model, Semiconductor device analyzer B1500A โดยป้อนแรงดันไฟตรง (DC voltage) ไปยัง ขั้วเกต (V_G) ตั้งแต่ -5 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ ที่ค่าความถี่ 100 kHz ซึ่งทำการทดสอบอุปกรณ์ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา (Co-60) ที่ปริมาณรังสีขนาดต่างๆ สามารถแสดงวงจรการทดสอบดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



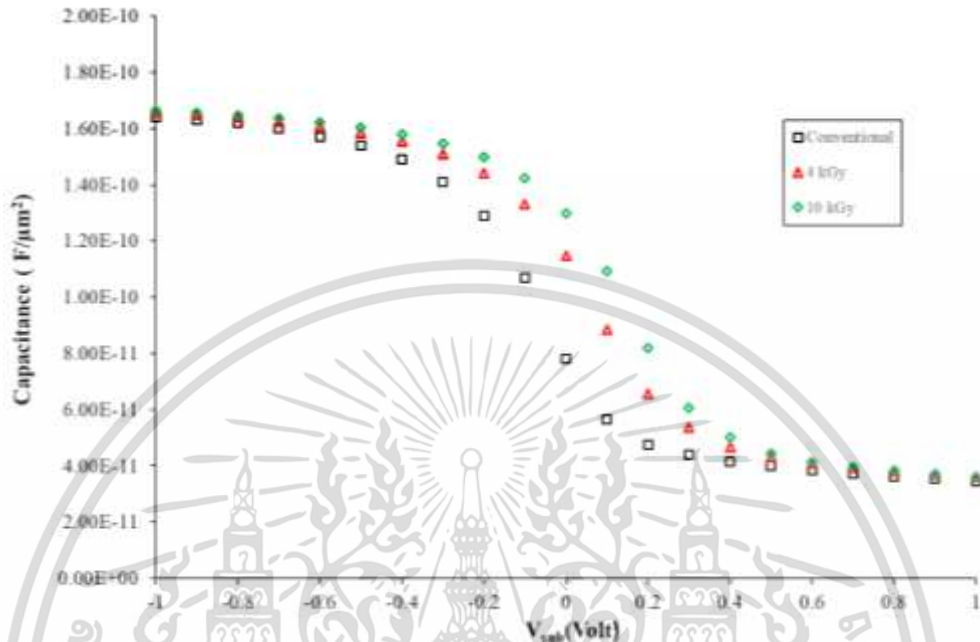
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรทดสอบค่าความจุไฟฟ้าของ MOS Capacitor

ผลการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเกต ($C-V_G$) แสดงให้เห็นถึงช่วงของแรงดันไบอัสที่เกต ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างมอสของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ฐานรองชนิดเอ็น Poly/ Psub_Area และ Peri) เกิดภาวะแอกคิวมูเลชัน, ดีพลีชัน และอินเวอร์ชันของชั้นเกตออกไซด์ เนื่องจากไบอัสแรงดันลบที่ขั้วเกต ประจุไฟฟ้าลบจะเหนี่ยวนำให้โฮล ซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก เข้าไปสะสมที่บริเวณผิวสัมผัส ภาวะนี้จึงถูกเรียกว่า ภาวะแอกคิวมูเลชัน และเมื่อแรงดันขั้วเกตมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นบวกโดยมีค่าไม่สูงมากส่งผลให้โฮลถูกผลักออกจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ในบริเวณนี้จะประกอบด้วยประจุไฟฟ้าลบของอะตอมสารเจือผู้รับ เนื่องจากความหนาแน่นของโฮลลดลง จึงเรียกว่า ภาวะลดลง หรือ ภาวะดีพลีชัน เมื่อแรงดันเกตมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ภาวะอินเวอร์ชัน บริเวณปลอดพาหะจะมีความกว้างสูงสุดและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป แต่จะมีอิเล็กตรอนเข้ามาอยู่ในบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำเป็นจำนวนมากและเกิดเป็นชั้นกลับ ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มในการเปลี่ยนแปลงสมบัติสารกึ่งตัวนำอย่างสมบูรณ์ โดยเปลี่ยนจากสมบัติสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นชนิดเอ็น จึงเรียกภาวะว่านี้ว่า ภาวะย้อนกลับ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเกต ($C-V_G$) ก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมา พบว่ามีการเลื่อนของเส้นกราฟประจุไฟฟ้าไปทางด้านขวา เมื่อเพิ่มปริมาณขนาดของรังสีที่ 4 และ 10 กิโลเกรย์

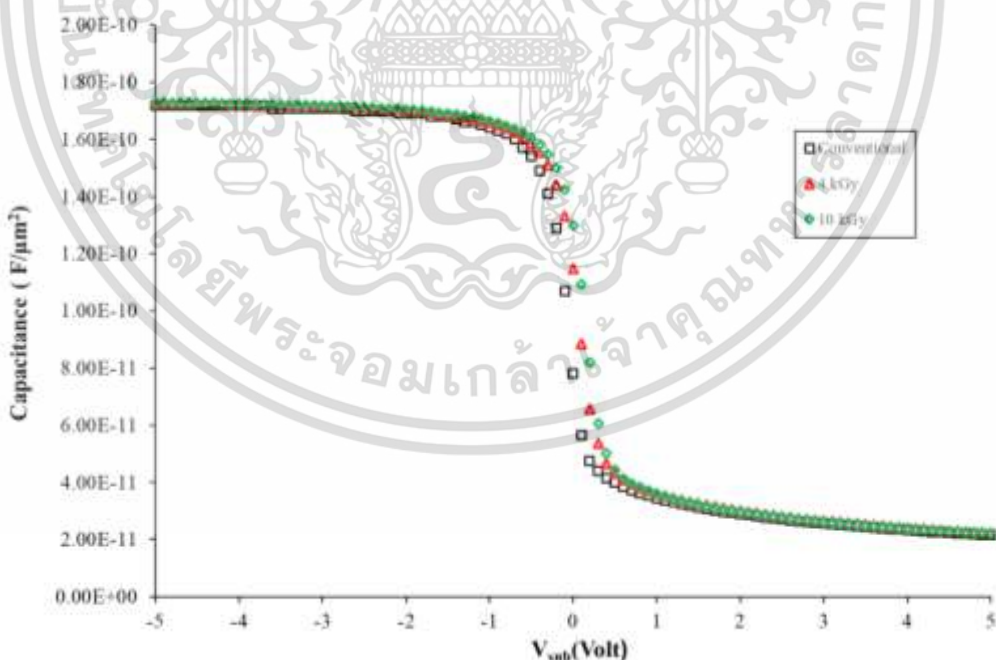
สำหรับโครงสร้างมอสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนั้น แสดงให้เห็นถึงช่วงของแรงดันไบอัสที่เกต ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างมอสของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ฐานรองชนิดเอ็น Poly/Nwell_Area และ Peri) เกิดภาวะอินเวอร์ชัน, ดีพลีชัน และแอกคิวมูเลชัน ของชั้นเกตออกไซด์ สามารถแสดงดังรูปที่

4.4 และ 4.5 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเกต ($C_{ox}-V_G$) ก่อนและหลังจาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับรังสีแกมมา พบว่ามีการเลื่อนของเส้นกราฟประจุไฟฟ้าไปทางด้านขวา เมื่อเพิ่มปริมาณขนาดของรังสีที่ 4 และ 10 กิโลเกรย์



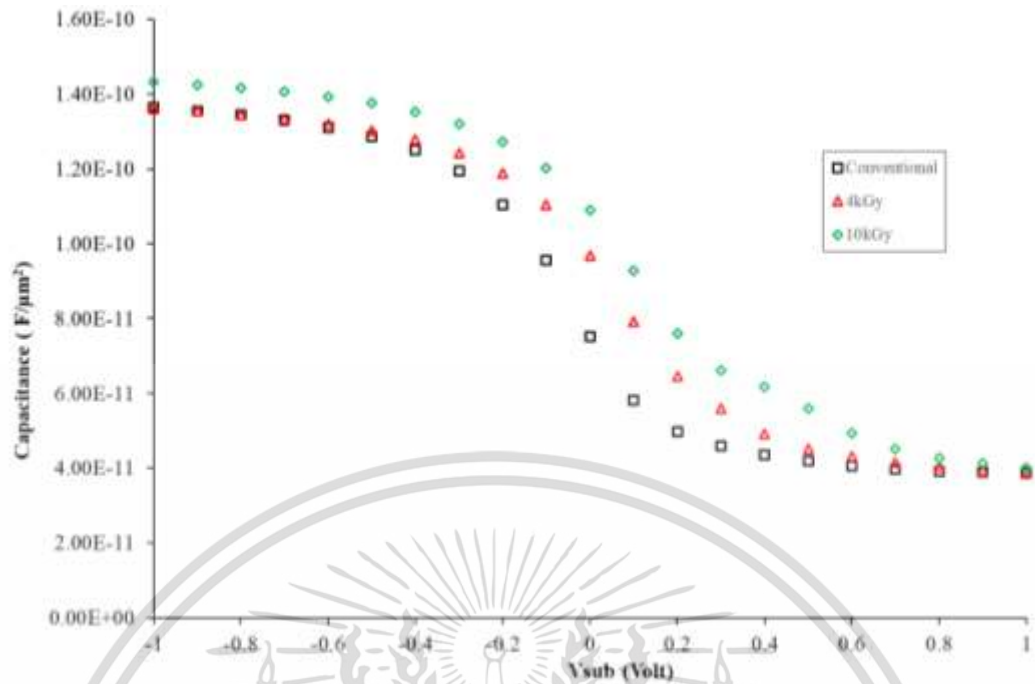
(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{Sub} = -1$ ถึง 1 โวลต์



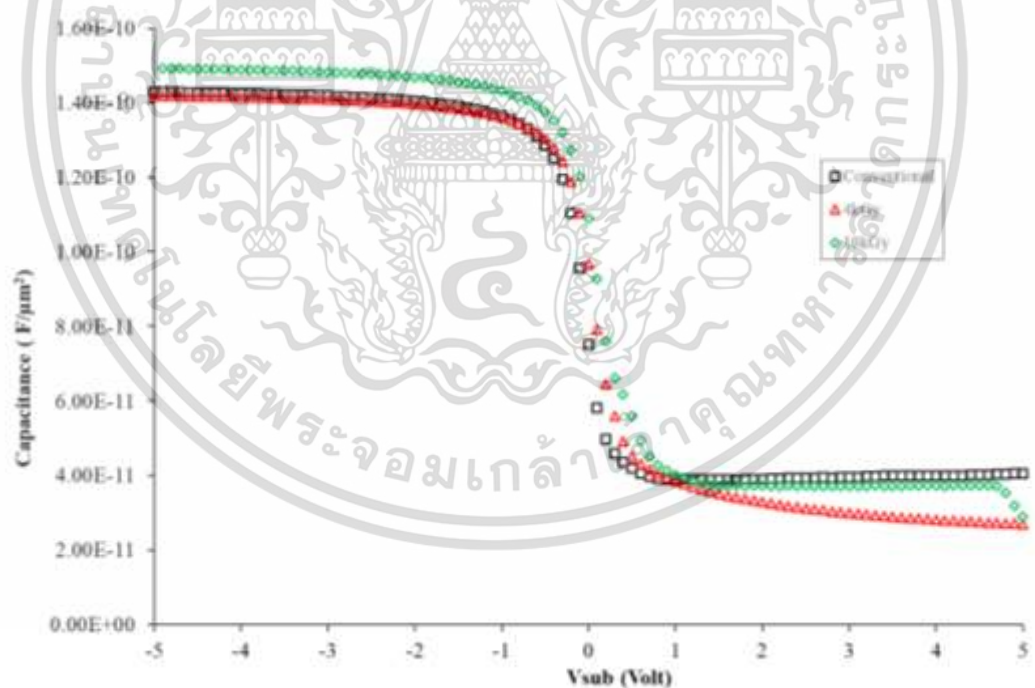
(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{Sub} = -5$ ถึง 5 โวลต์

รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ ของโครงสร้าง Poly/Psub_Area ก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{Sub} = -1$ ถึง 1 โวลต์

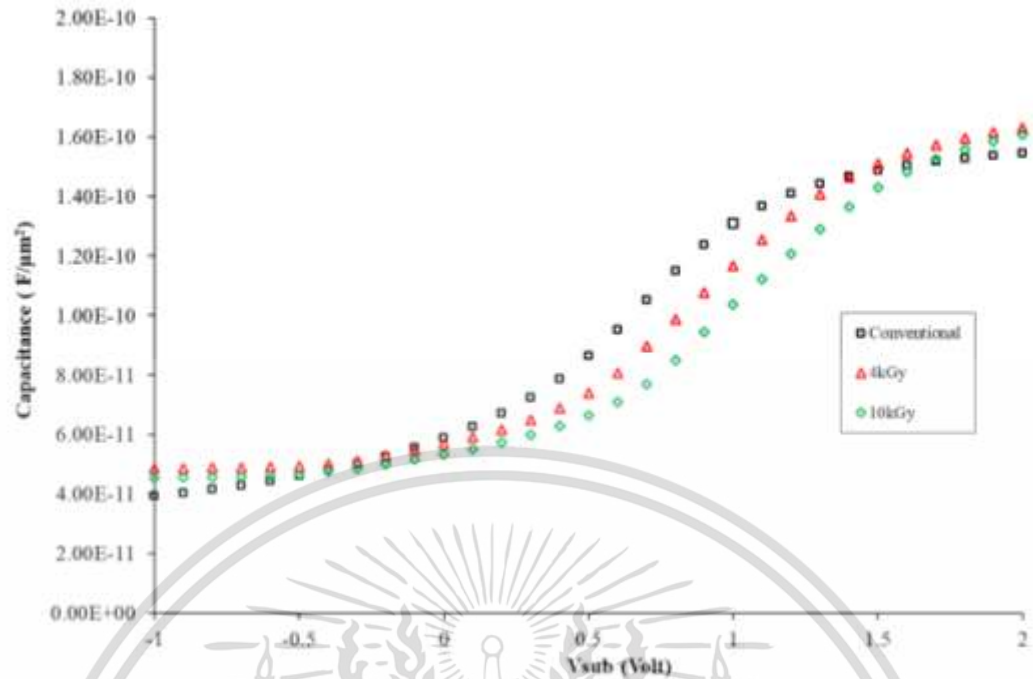


(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{Sub} = -5$ ถึง 5 โวลต์

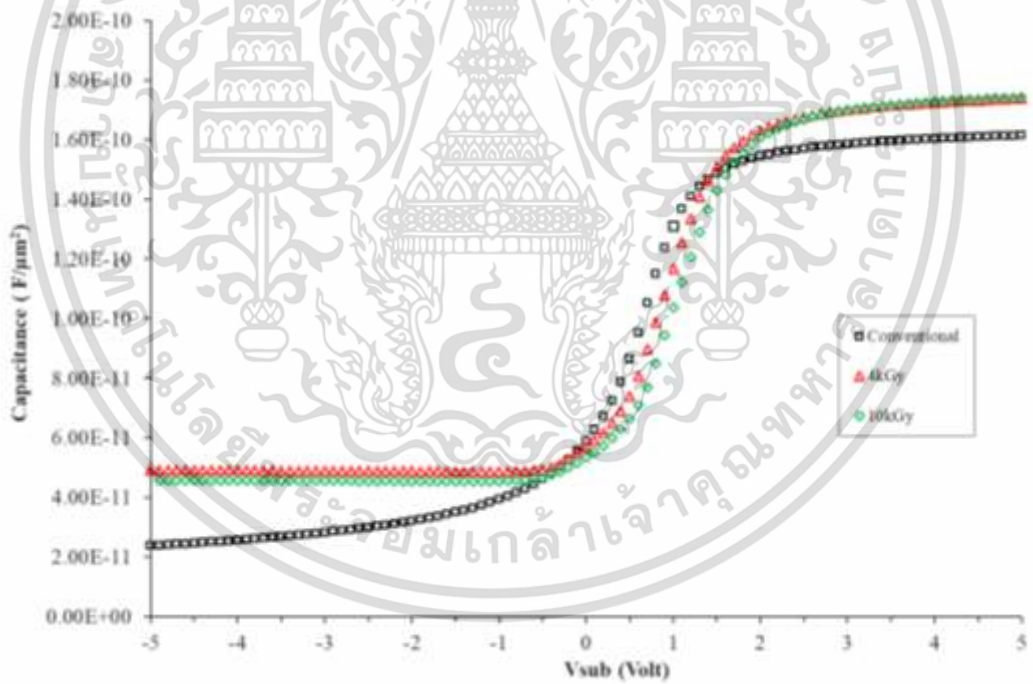
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ของโครงสร้าง

Poly/Psub_Peri ก่อนและหลังจากรับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



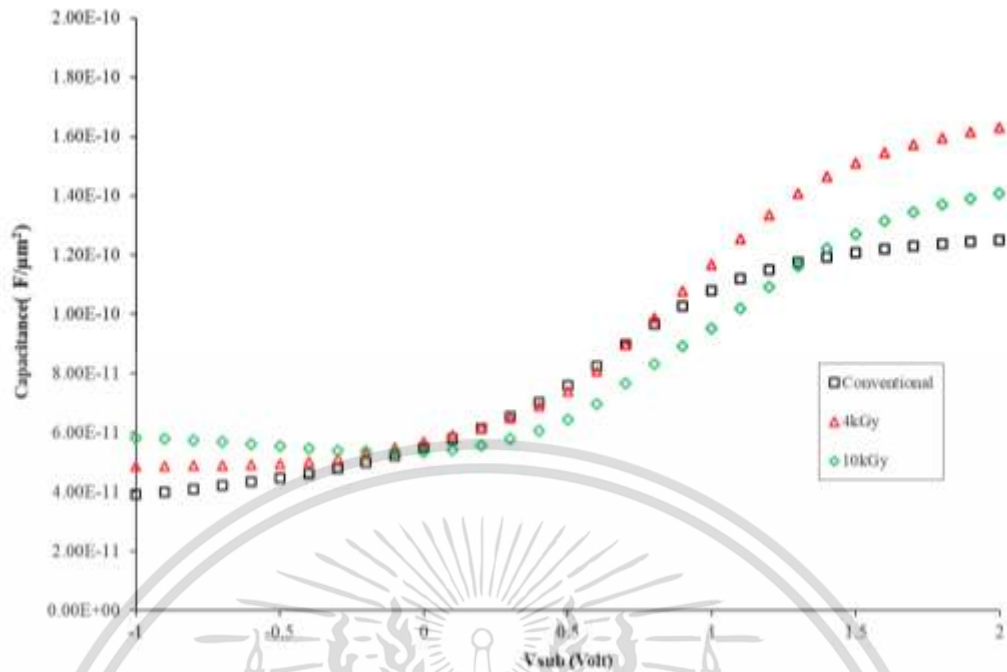
(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{Sub} = -1$ ถึง 2 โวลต์



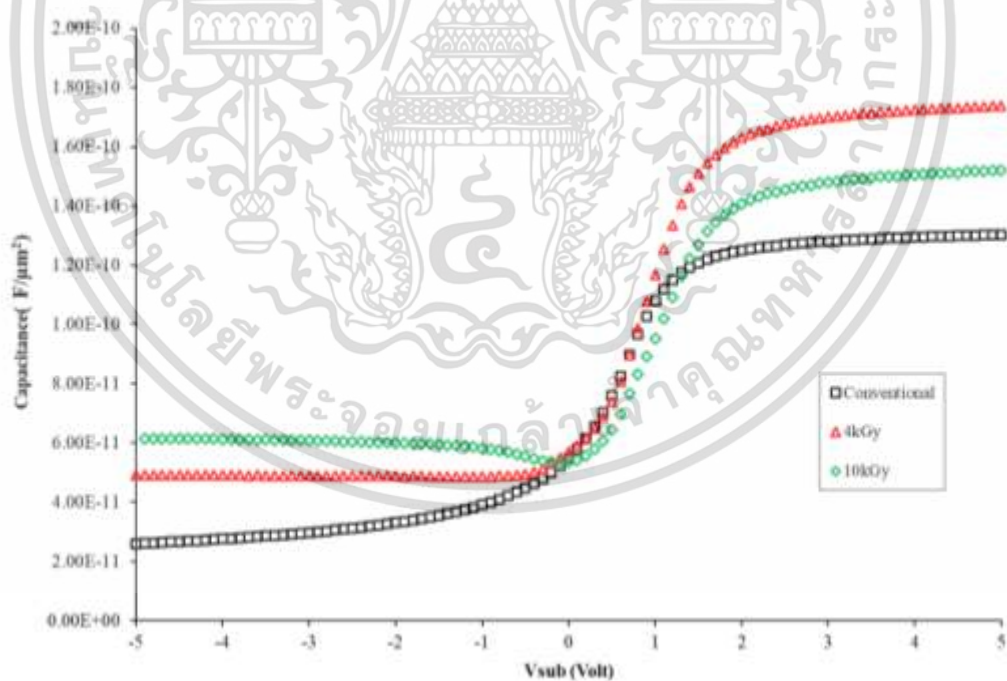
(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{Sub} = -5$ ถึง 5 โวลต์

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ของโครงสร้าง Poly/Nwell_Area ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{sub} = -1$ ถึง 2 โวลต์

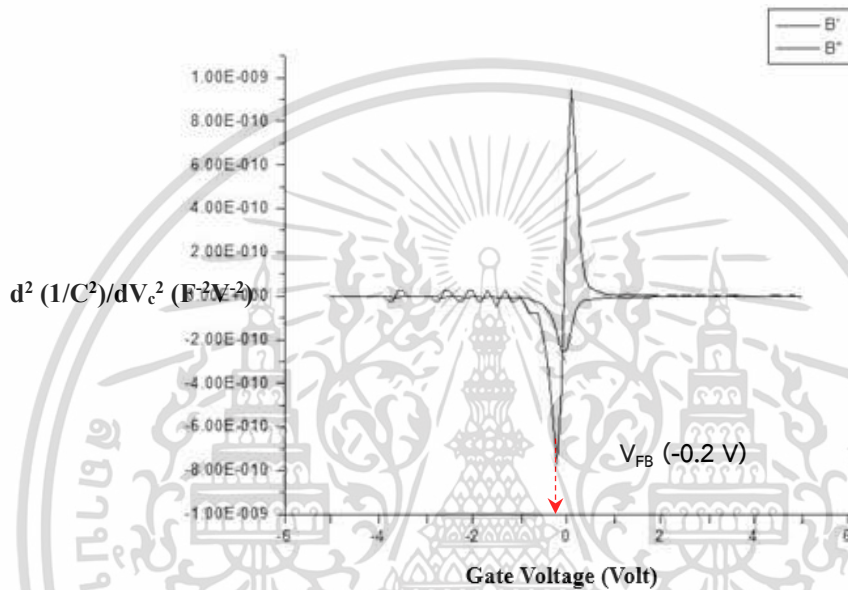


(ข) ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{sub} = -5$ ถึง 5 โวลต์

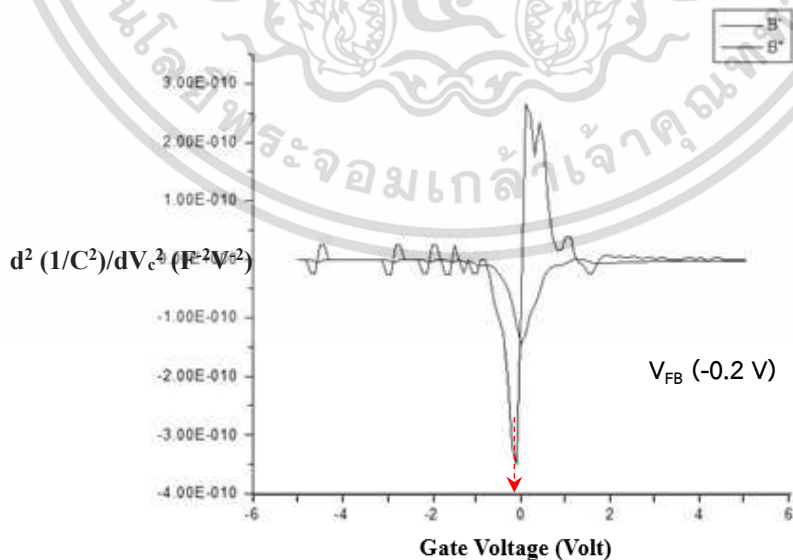
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ของโครงสร้าง Poly/Nwell_Perि ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันของชั้นเกตออกไซด์ เพื่อนำมาหาอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกต จะสามารถหาค่าแรงดันแถบเรียบ (V_{FB}) ได้ พบว่าโครงสร้าง Poly/ Psub_Area และ Poly/ Psub_Peri ก่อนได้รับรังสีแกมมา มีค่าแรงดันแถบเรียบ(V_{FB}) เท่ากับ -0.2 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 สำหรับโครงสร้าง Poly/ Nwell_Area และ Poly/ Nwell_Peri ก่อนได้รับรังสีแกมมา มีค่าแรงดันแถบเรียบ (V_{FB}) เท่ากับ 0.5 โวลต์ ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



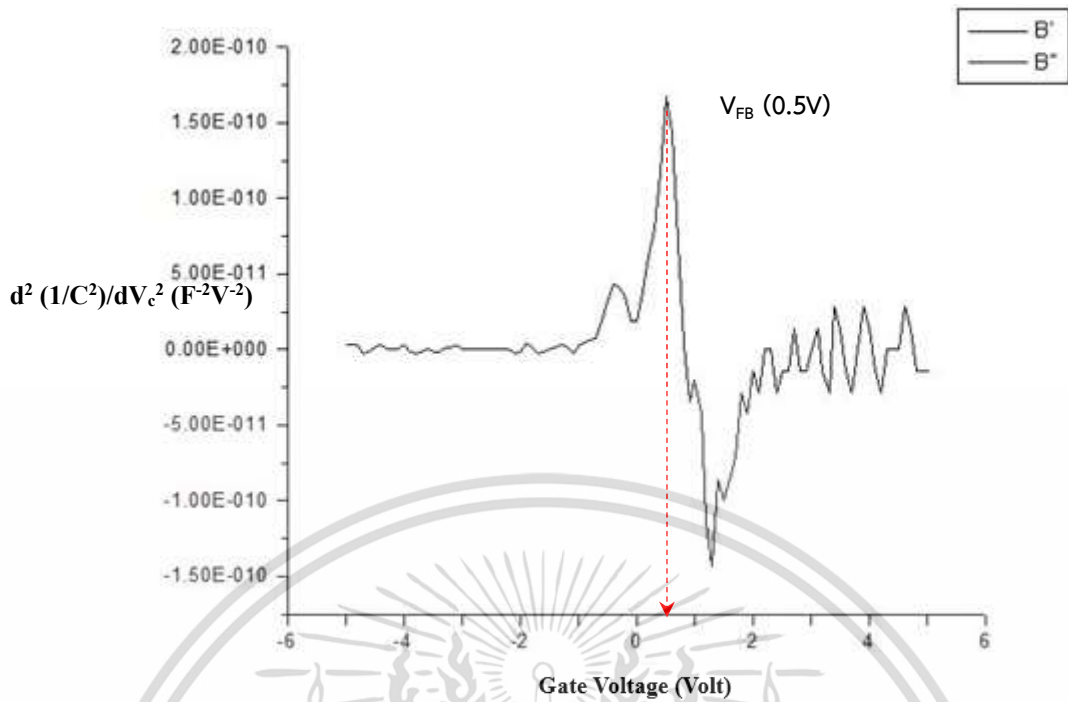
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของโครงสร้าง Poly/ Psub_Area ก่อนได้รับรังสีแกมมา



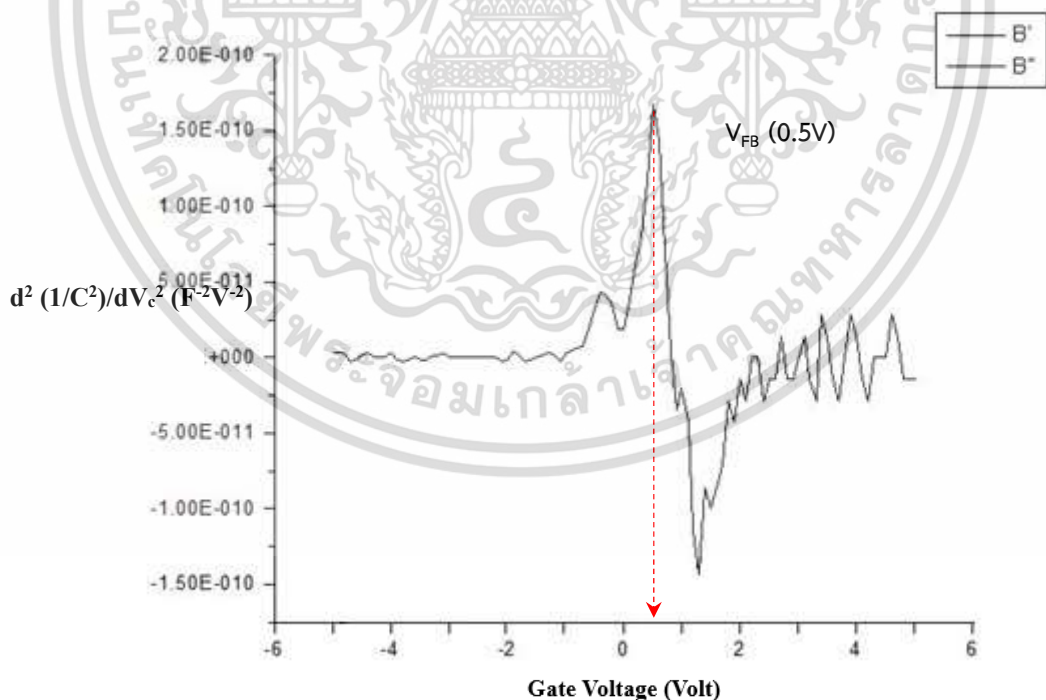
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของ

โครงสร้าง Poly/ Psub_Peri ก่อนได้รับรังสีแกมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของโครงสร้าง Poly/ Nwell_Area ก่อนได้รับรังสีแกมมา



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ค่าอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกตที่ค่าต่างๆ ของโครงสร้าง Poly/Nwell_Perimeter ก่อนได้รับรังสีแกมมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุปกรณ์ได้รับรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆแล้ว พบว่าโครงสร้าง Poly/ Psub_Area และ Poly/ Psub_Peri มีค่าแรงดันแถบเรียบเลื่อนลดลง และโครงสร้าง Poly/ Nwell_Area และ Poly/ Nwell_Peri มีค่าแรงดันแถบเรียบเลื่อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมานั้นเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าในออกไซด์ และประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส (Oxide Charge Density) เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดพื้นที่ของโครงสร้าง Area และ Peri นั้น พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่มีนัยสำคัญของความแตกต่าง เนื่องจากมีขนาดพื้นที่เท่ากัน โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นรอบรูป สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันแถบเรียบ (flat band voltage) จากกราฟอนุพันธ์อันดับสองกับแรงดันไฟฟ้าเกต ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์

Exposure dose (kGy)	Poly/ Psub_Area	Poly/ Psub_Peri	Poly/ Nwell_Area	Poly/ Nwell_Peri
	V_{FB} (Volts)	V_{FB} (Volts)	V_{FB} (Volts)	V_{FB} (Volts)
0	-0.2	-0.2	0.5	0.5
1	-0.2	-0.1	0.6	0.5
2	-0.1	-0.1	0.5	0.5
4	-0.1	-0.1	0.6	0.6
7	0	0	0.7	0.7
10	0	0	0.7	0.7

เมื่อทำการทดลองความหนาของชั้นออกไซด์ในเกต ที่มีความหนาเท่ากับ 15 นาโนเมตร พบว่าบริเวณเกตของอุปกรณ์ก่อนได้รับรังสี สามารถทนแรงดันไฟฟ้าพังทลายได้ อยู่ในช่วง 14-16 V และเมื่ออุปกรณ์ได้รับรังสีแกมมา พบว่าเกตของอุปกรณ์มอสคาปาซิเตอร์ ยังสามารถทนแรงดันไฟฟ้าพังทลายได้ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันพังทลายของชั้นเกตออกไซด์ ก่อนและหลังได้รับปริมาณรังสีแกมมาค่าต่างๆ

ก่อนได้รับรังสี (Before-irradiation)	ตำแหน่งชิ้นงานที่ทดสอบ				
	A6	A7	B6	B7	C7
	(Volt)	(Volt)	(Volt)	(Volt)	(Volt)
Nwell_Area	14.465	14.472	15.377	15.403	15.382
Nwell_Perimeter	14.599	14.617	15.527	15.55	15.538
Psub_Area	15.415	15.426	14.419	14.464	14.485
Psub_Perimeter	15.427	15.438	14.595	14.614	14.643

หลังได้รับรังสี (After-irradiation)	ปริมาณรังสีที่ได้รับ (Exposure dose)				
	A6 = 1kGy	A7 = 2kGy	B6 = 4kGy	B7 = 7kGy	C7 = 10kGy
	(Volt)	(Volt)	(Volt)	(Volt)	(Volt)
Nwell_Area	15.411	15.408	15.436	15.363	15.352
Nwell_Perimeter	15.441	15.443	15.466	15.543	15.421
Psub_Area	14.441	15.8	15.786	15.538	15.432
Psub_Perimeter	14.614	15.936	15.992	15.993	15.961

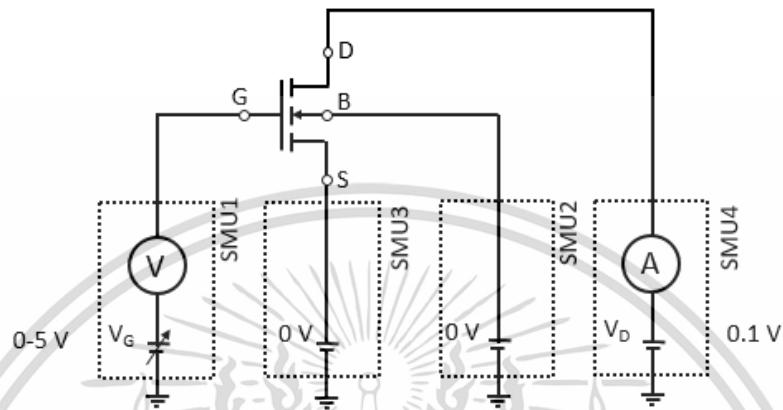
4.2 การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์

จากหัวข้อการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าในมอสคาปาซิเตอร์ เราพบว่ารังสีแกมมานั้นส่งผลให้ประจุในชั้นออกไซด์และชั้นอินเตอร์เฟซ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ เปลี่ยนแปลง (N_{ot} , N_{it}) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลง ดังความสัมพันธ์ค่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้อุปกรณ์มอสเฟทเริ่มทำงาน แสดงดังสมการ (2.29)

$$\Delta V_{TH} = -e \cdot \frac{1}{C_{ox}} \cdot \Delta N_{ot} \pm e \cdot \frac{1}{C_{ox}} \cdot \Delta N_{it} \quad (2.29)$$

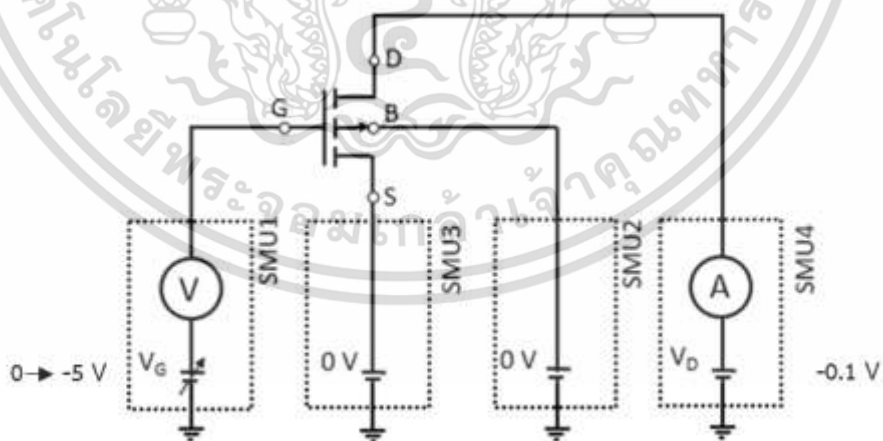
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงทำการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟท เป็นการทดสอบที่ย่านทำงานเชิงเส้น (Linear Region) โดยที่เอ็นมอสเฟทจะถูกป้อนแรงดันที่ขั้วเดรน $V_{DS} = 0.1$ โวลต์ และป้อนแรงดันที่ขั้วเกต V_{GS} ตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ และขั้วซอสและฐานรองต่อกับกราวด์ แสดงดังรูปที่ 4.10(ก)



(ก) เอ็นมอสเฟท

และทำการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของพีมอสเฟท ทำการทดสอบโดยที่พีมอสเฟทจะถูกป้อนแรงดันที่ขั้วเดรน $V_{DS} = -0.1$ โวลต์ และป้อนแรงดันที่ขั้วเกต V_{GS} ตั้งแต่ 0 ถึง -5 โวลต์ และขั้วซอสและฐานรองต่อกับกราวด์ แสดงดังรูปที่ 4.10 (ข)



(ข) พีมอสเฟท

รูปที่ 4.10 วงจรทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟทที่ย่านเชิงเส้น

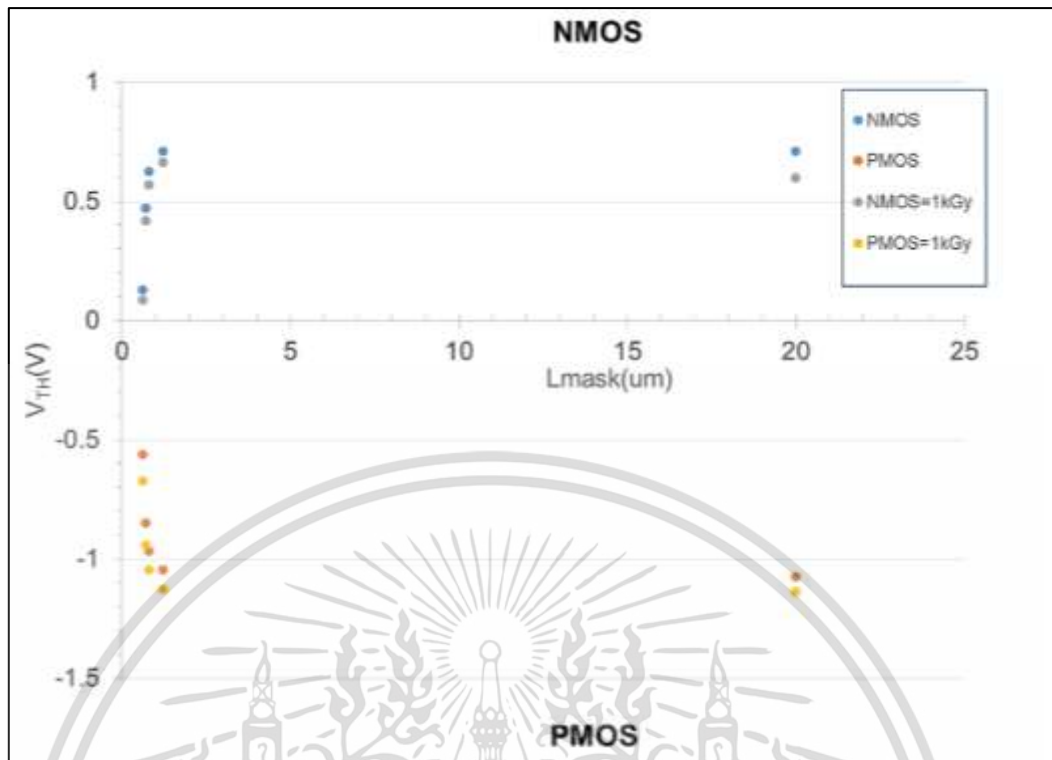
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอสเฟทก่อนได้รับรังสีแกมมา พบว่าเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มลดลงเช่นเดียวกัน และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสมีค่าน้อยกว่า 0.7 ไมโครเมตร ทั้งในเอ็นมอสเฟทและพีมอสเฟท แสดงดังตารางที่ 4.3 และเมื่อเอ็นมอสเฟทและพีมอสเฟทได้รับรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ พบว่ารังสีแกมมาเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกในออกไซด์ ส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟทลดลง ส่วนพีมอสเฟทนั้นจะมีค่าแรงดันขีดเริ่มเพิ่มขึ้น (ค่าเป็นลบมากขึ้น) เนื่องจากต้องเหนี่ยวนำประจุบวกขึ้นมาหักล้างประจุอิเล็กตรอนในช่องทางเดินกระแสที่เพิ่มขึ้น จากการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกในออกไซด์ดังกล่าว

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟทและพีมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสีแกมมา

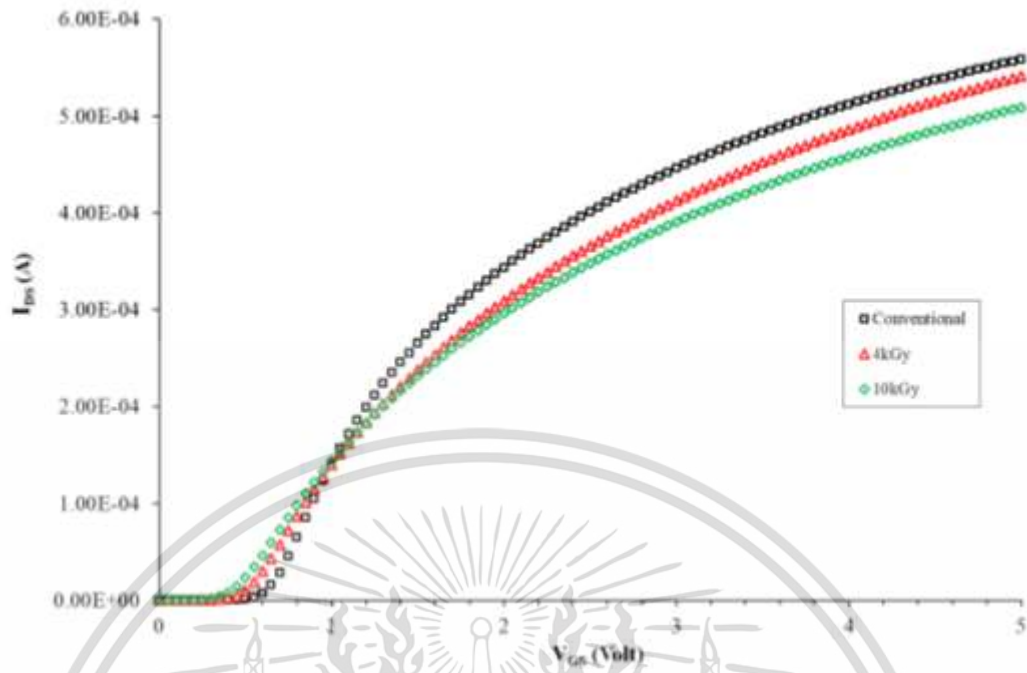
Width (μm)	Length (μm)	V_{th} NMOS (Volt)	V_{th} PMOS (Volt)
20	20	0.710	-1.0511
20	1.2	0.709	-1.045
20	0.8	0.625	-0.967
20	0.7	0.469	-0.850
20	0.6	0.127	-0.563

เมื่อนำค่าแรงดันขีดเริ่มและความยาวช่องทางเดินกระแสของเอ็นมอสและพีมอส จากตารางที่ 4.3 มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.11

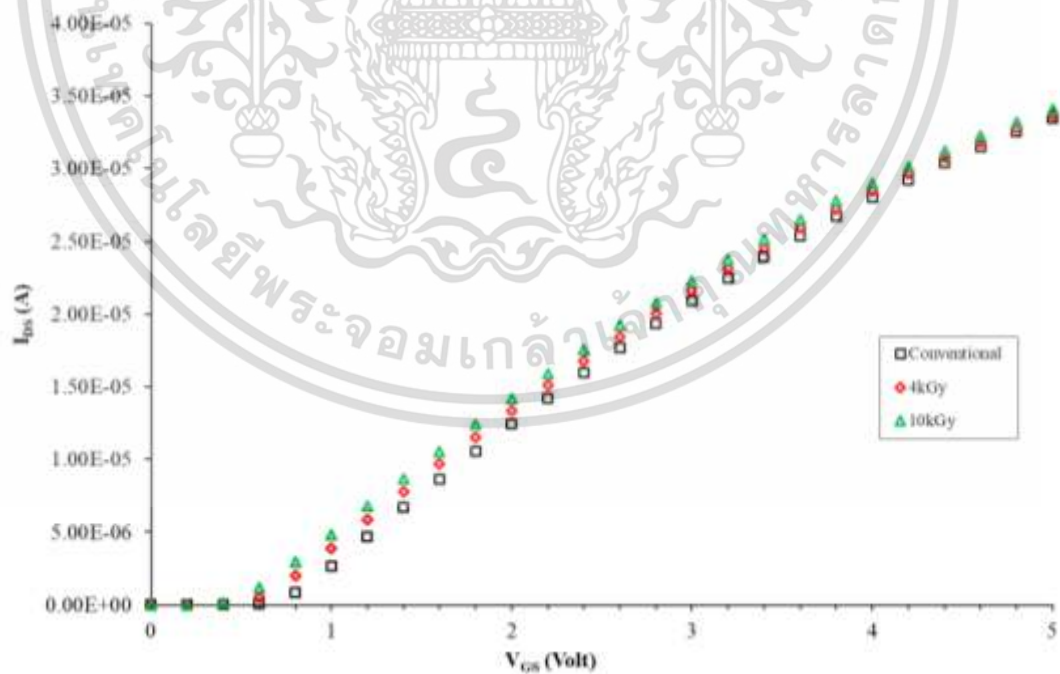


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงขีดเริ่มต้นของเอ็นและพีมอสเฟท กับความยาวช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 , 1.2, 0.8, 0.7, 0.6 ไมโครเมตร ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมา ปริมาณ 1 กิโลเกรย์

ผลการทดสอบคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มต้นของเอ็นมอสเฟทที่ความกว้างช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร และความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มลดลง จาก 0.625 โวลต์ (ก่อนฉายรังสีแกมมา) เปลี่ยนแปลงเป็น 0.454 และ 0.371 โวลต์ (ที่ปริมาณรังสี 4 และ 10 กิโลเกรย์) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.12 และผลการทดสอบของเอ็นมอสเฟท ที่ความกว้างและความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มลดลง จาก 0.71 โวลต์ (ก่อนฉายรังสีแกมมา) เปลี่ยนแปลงเป็น 0.55 และ 0.45 โวลต์ (ที่ปริมาณรังสี 4 และ 10 กิโลเกรย์) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.13



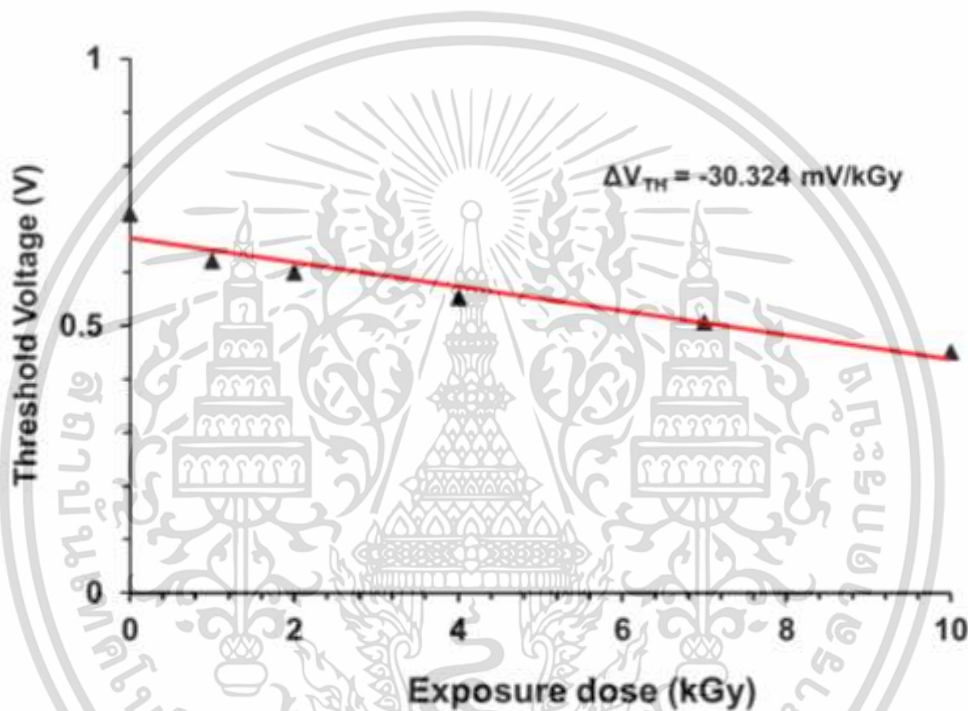
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

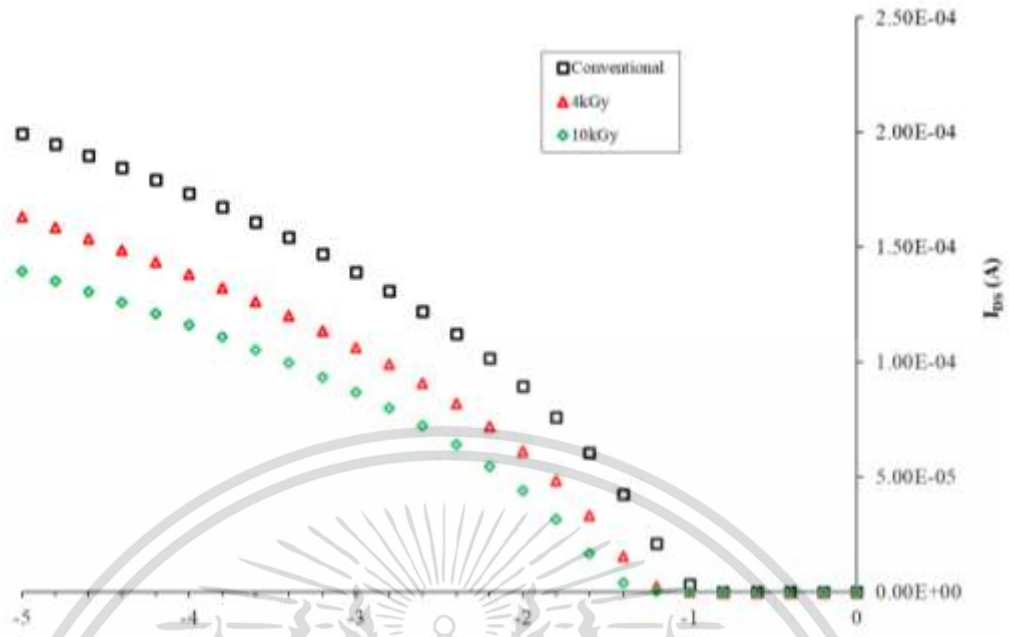
เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มนั้นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในอัตราเชิงเส้น 30.324 mV/kGy แสดงดังรูปที่ 4.14 สามารถอธิบายค่าแรงดันขีดเริ่มที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากผลของค่าแรงดันแถบเรียบ (V_{FB}) เปลี่ยนไป และค่าความจุไฟฟ้า (C_{ox}) ของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป นั้นส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) เปลี่ยนแปลง



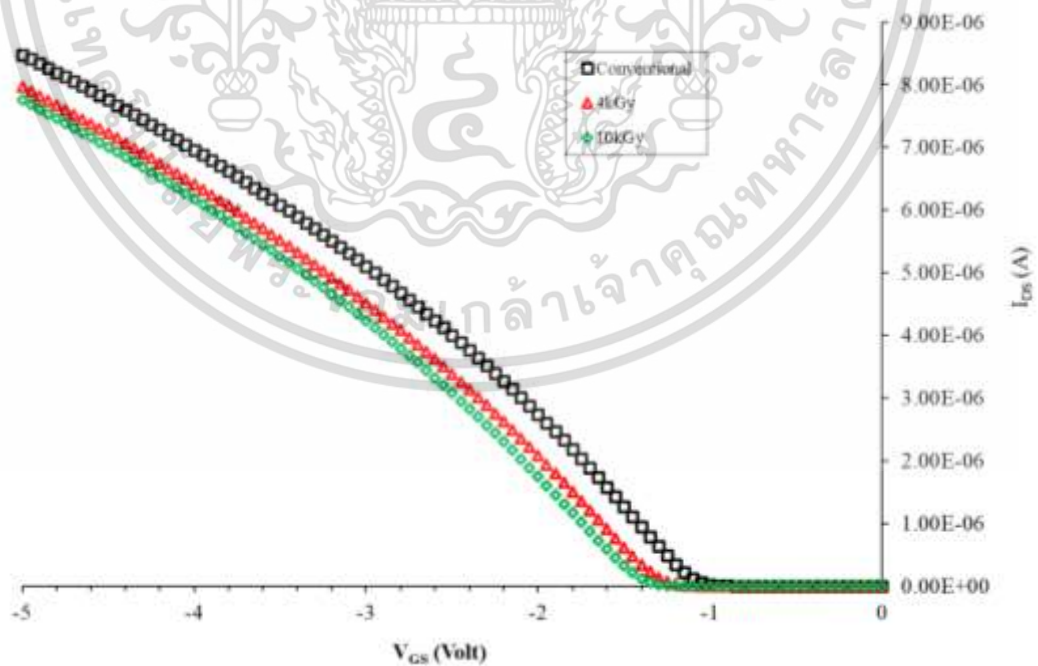
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0 , 1, 2, 4, 7, 10 กิโลเกรย์

ผลการทดสอบคุณสมบัติค่าแรงดันขีดเริ่มของพีมอสเฟทที่ความกว้างช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร และความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเพิ่มขึ้นจาก -0.967 โวลต์ (ก่อนฉายรังสีแกมมา) เปลี่ยนแปลงเป็น -1.178 และ -1.328 โวลต์ (เมื่อได้รับปริมาณรังสี 4 และ 10 กิโลเกรย์) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.15 และผลการทดสอบของพีมอสเฟท ที่ความกว้างและความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 20 ไมโครเมตร พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มลดลง จาก -1.073 โวลต์ (ก่อนฉายรังสีแกมมา) เปลี่ยนแปลงเป็น -1.248 และ -1.354 โวลต์ (เมื่อได้รับปริมาณรังสี 4 และ 10 กิโลเกรย์) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



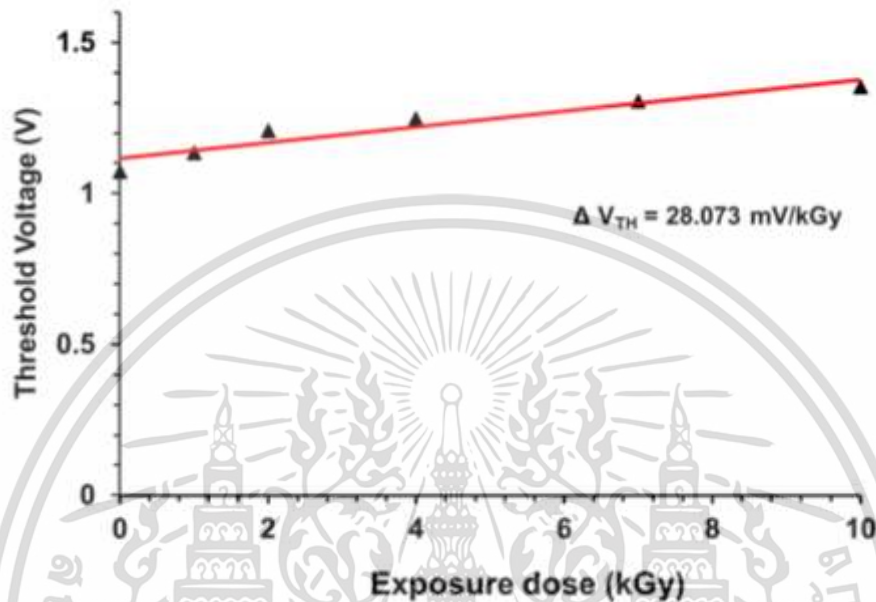
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต (I_{DS} - V_{GS}) ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต (I_{DS} - V_{GS}) ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

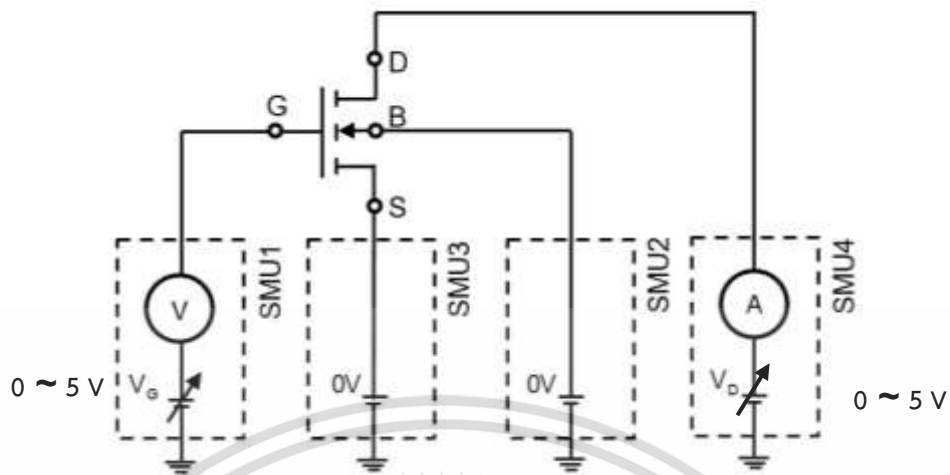
เมื่อทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ พบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในอัตรา 28.073 mV/kGy แสดงดังรูปที่ 4.17



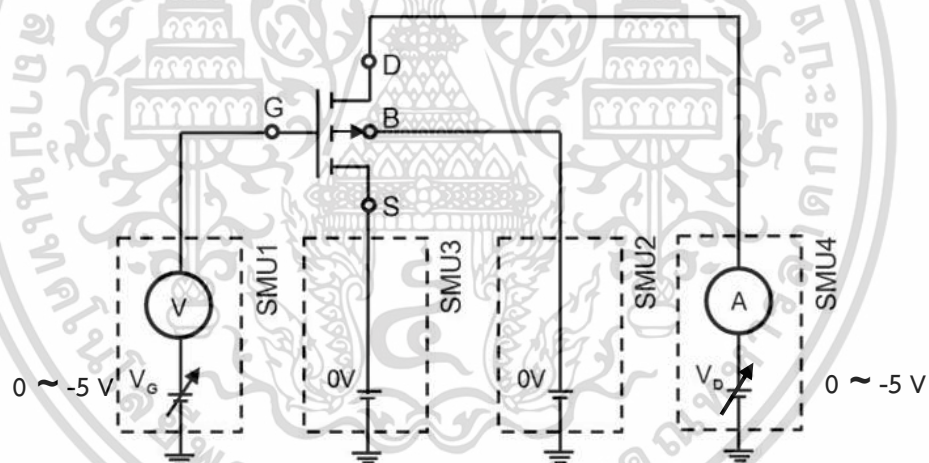
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มของฟิโอสเฟทขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0, 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์

4.3 การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน (I_D - V_D characteristics)

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดันเดรน (V_D) ของมอสทรานซิสเตอร์ สามารถวัดค่าโดยการป้อนแรงดันที่ขั้วเดรน ตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ และป้อนแรงดันขั้วเกต V_{GS} ตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ สำหรับเอ็นมอสเฟท ส่วนกรณีฟิโอสเฟทจะป้อนแรงดันที่ขั้วเดรน ตั้งแต่ 0 ถึง -5 โวลต์ และป้อนแรงดันขั้วเกต V_{GS} ตั้งแต่ 0 ถึง 5 โวลต์ ส่วนขั้วซอสและฐานรองทั้งสองกรณีจะต่อกับกราวด์ แสดงดังรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) เอ็นมอสเฟต



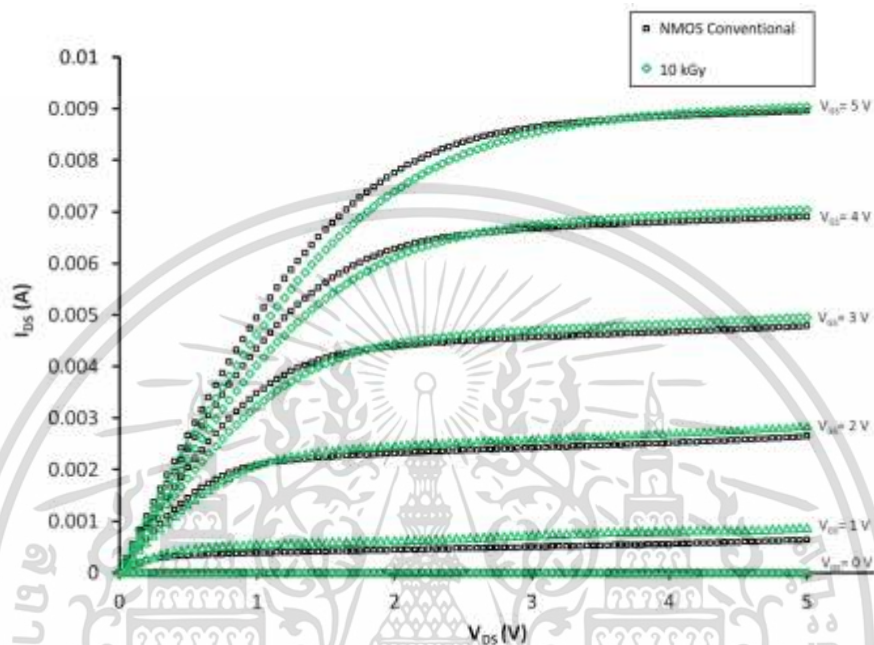
(ข) พีมอสเฟต

รูปที่ 4.18 วงจรทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรนของมอสทรานซิสเตอร์

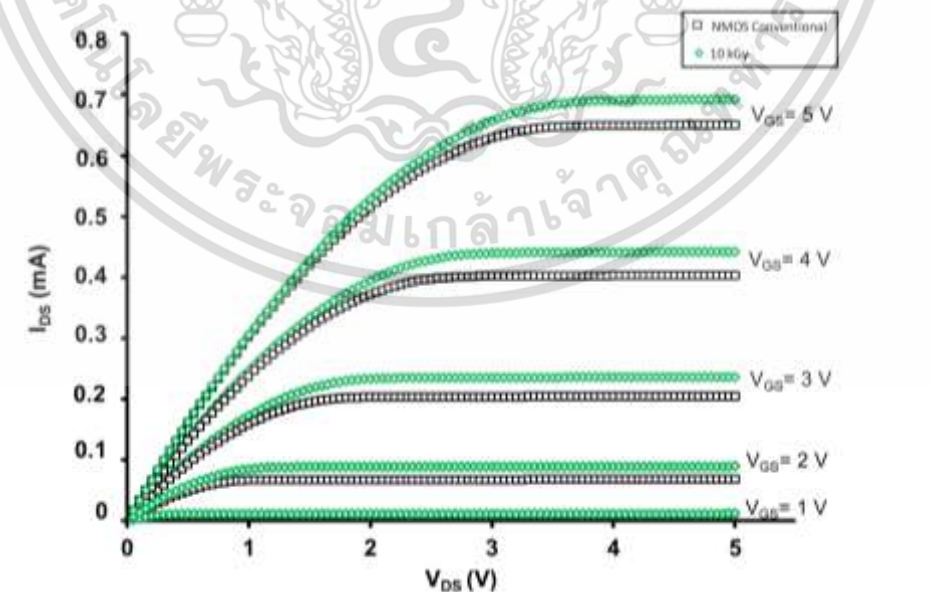
(ก) เอ็นมอสเฟต และ (ข) พีมอสเฟต

ในกรณีเอ็นมอสเฟตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเดรน ($I_{DS}-V_{DS}$) ที่ค่าแรงดันเกตต่างๆ ทั้งก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมา 10 กิโลเกรย์ สำหรับเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.19 และสำหรับเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.20 ผลการทดสอบพบว่าเมื่อแรงดันเดรนมีค่าสูงกว่าแรงดันเดรนอิ่มตัว หรือ $V_D > V_{D(sat)}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสเดรนจะยังคงมีค่าคงที่ เช่นเดิมไม่เปลี่ยนแปลง แต่หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์ พบว่าค่ากระแสเดรนอิมิตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมานั้นมีผลทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟลดลง ส่งผลให้ผลต่างของเทอม $(V_{GS}-V_T)^2$ มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้กระแสเดรนอิมิตัวมีค่าเพิ่มขึ้น



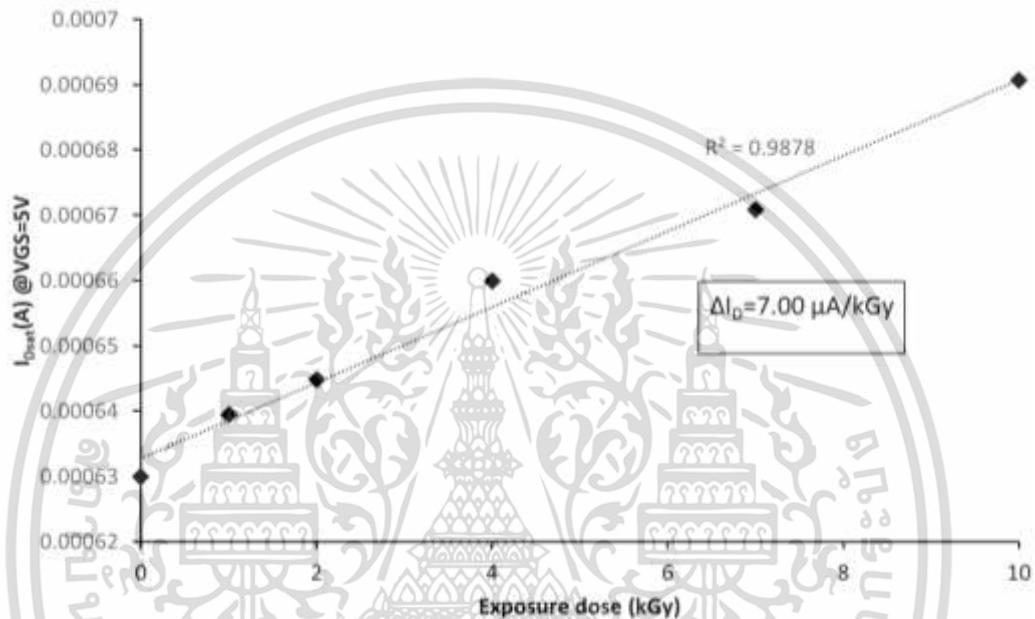
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (I_{DS} - V_{DS}) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (I_{DS} - V_{DS}) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์

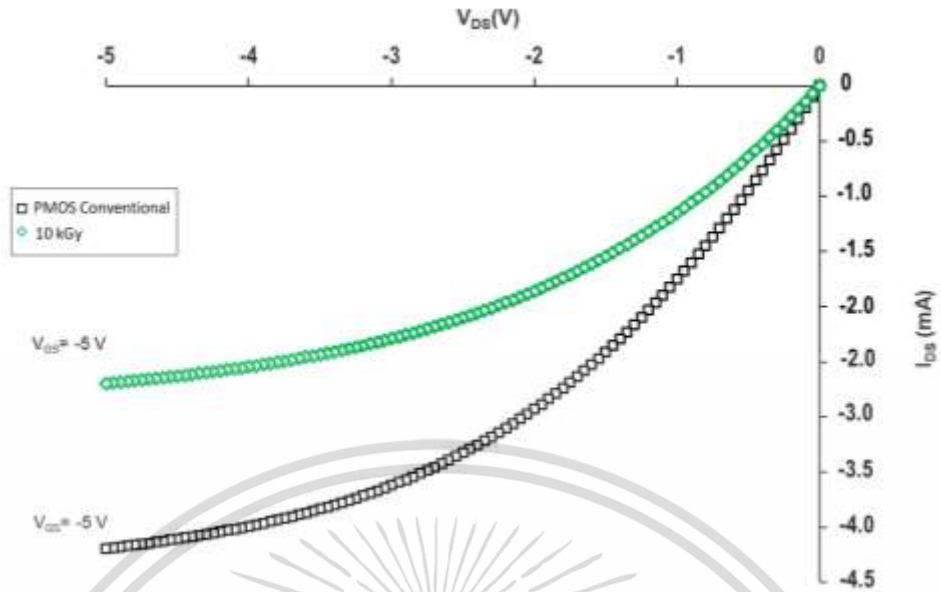
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรนอิมิตัวของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ที่ค่าแรงดันเกต $V_{GS}=5 \text{ V}$ พบว่าค่ากระแสเดรนอิมิตัวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในอัตรา $\Delta I_D=7.00 \mu\text{A/kGy}$ แสดงดังรูปที่ 4.21 ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนอิมิตัวดังกล่าวนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น detector หรือ dosimeter ตรวจจบบรังสีแกมมาที่ความปริมาณรังสีค่าต่างๆ

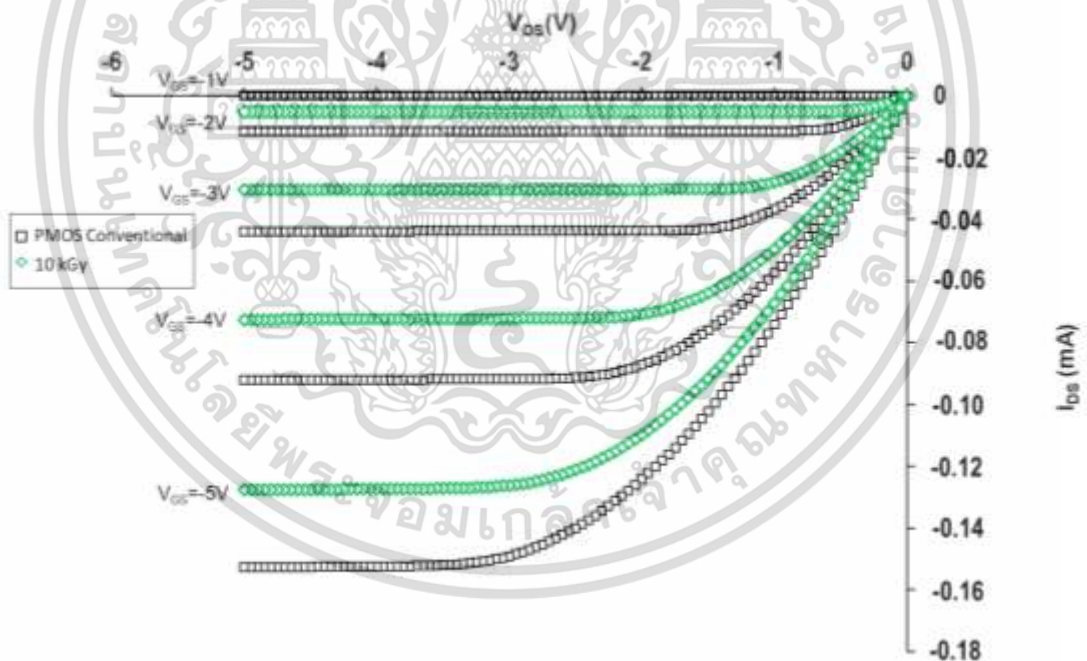


รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรนอิมิตัวของเอ็นมอสเฟทขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0, 1,2,4,7 และ 10 กิโลเกรย์

เมื่อพิจารณากรณีพิมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$ พบว่าหลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์ ค่ากระแสเดรนอิมิตัวจะมีค่าลดลง เนื่องจากรังสีแกมมานั้นเหนี่ยวนำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผลต่างของเทอม $(V_{GS}-V_T)^2$ มีค่าลดลง จึงทำให้กระแสเดรนอิมิตัวมีค่าลดลง กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(I_{DS}-V_{DS})$ ของพิมอสที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.22 และสำหรับพิมอสที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (I_{DS} - V_{DS}) ของพีมอสเฟต ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์

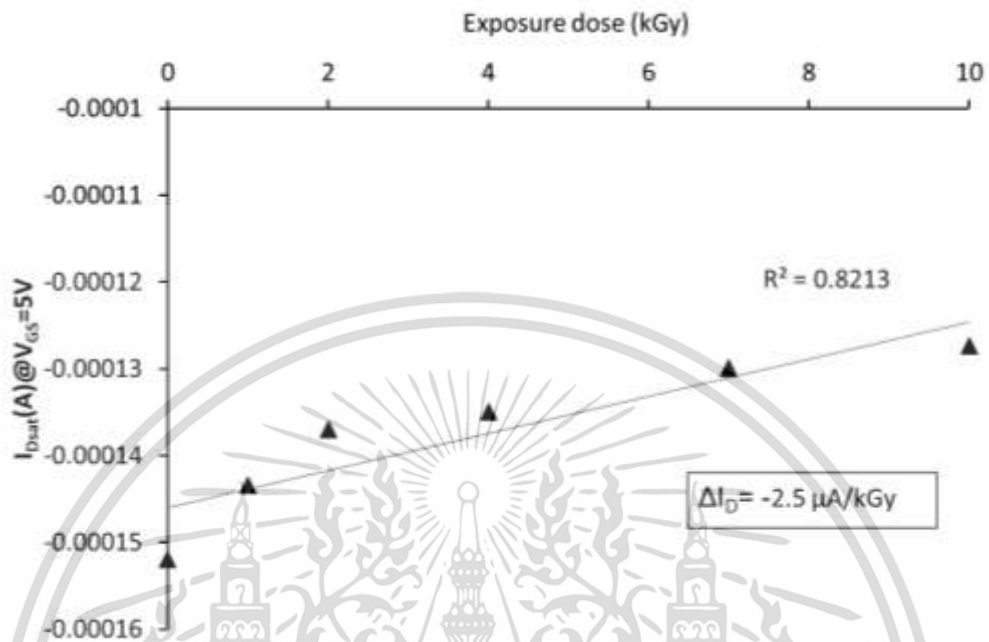


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (I_{DS} - V_{DS}) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์

และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรนอิมิตัวของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ที่ค่าแรงดันเกต $V_{GS} = -5 \text{ V}$ พบว่าค่ากระแสเดรนอิมิตัวนั้นมีการเปลี่ยนแปลงลดลง

ในอัตรา $\Delta I_D = -2.5 \mu\text{A/kGy}$ แสดงดังรูปที่ 4.24 ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนอิมิตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น dosimeter ตรวจจับรังสีแกมมาที่ความปริมาณรังสีค่าต่างๆ ได้เช่นกัน



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเดรนอิ่มตัวของเอ็นมอสเฟตขนาด $W/L=20/20 \mu m$ ที่ได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 0, 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์

4.4 ผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าสภาพคล่องของประจุพาหะ (μ)

จากหัวข้อการหาค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์มอสเฟตด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) นั้นยังสามารถหาค่าสภาพคล่องหรือโมบิลิตี้ (mobility) ของพาหะในแชนแนล ซึ่งเป็นสภาพคล่องที่ผิว (surface mobility) อีกด้วย โดยกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากันตลอดทั้งแชนแนล ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.26) แสดงดังสมการ (4.1)

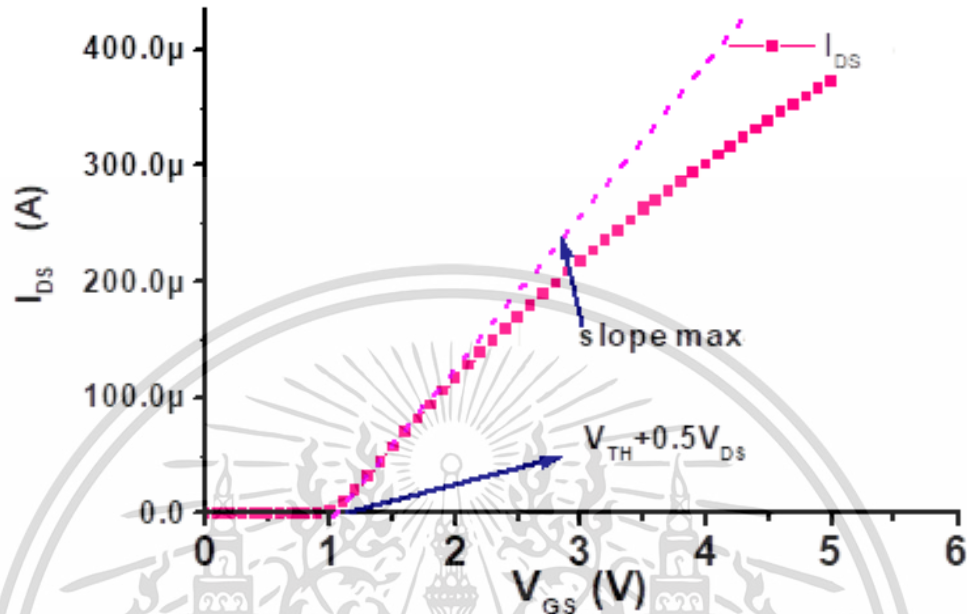
$$\mu = \frac{dI_D / dV_{GS}}{V_{DS}} \cdot \left(\frac{L}{W}\right) \cdot \left(\frac{1}{C_{ox}}\right) \quad (4.1)$$

หรือหาได้จากความชันสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ดังสมการที่ 4.2

$$\mu = \frac{(SlopeMax)}{V_{DS}} \cdot \left(\frac{L}{W}\right) \cdot \left(\frac{1}{C_{ox}}\right) \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างกราฟแสดงการหาค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน และแรงดันเกต ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟหาค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน และแรงดันเกต ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$

ข้อมูลของค่าความชันจากรูปที่ 4.25 ที่ค่าแรงดันเกตต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสีแกมมา

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
1.1	1.00×10^5 (maximum)
2	9.24×10^6
3	8.92×10^6
4	8.37×10^6
5	7.70×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 1 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
1.2	9.90×10^6 (maximum)
2	9.07×10^6
3	8.79×10^6
4	8.27×10^6
5	7.62×10^6

ตารางที่ 4.6 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 2 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
1.15	9.80×10^6 (maximum)
2	8.80×10^6
3	8.60×10^6
4	8.11×10^6
5	7.48×10^6

ตารางที่ 4.7 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
1.1	9.80×10^6 (maximum)
2	8.49×10^6
3	8.40×10^6
4	7.95×10^6
5	7.35×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 7 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
1.1	9.66×10^6 (maximum)
2	8.16×10^6
3	8.16×10^6
4	7.75×10^6
5	7.17×10^6

ตารางที่ 4.9 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของเอ็นมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu m$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
1	9.70×10^6 (maximum)
2	7.92×10^6
3	8.01×10^6
4	7.64×10^6
5	7.08×10^6

ค่าสภาพคล่องพาหะ (μ) จะมีค่าลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าแนวตั้ง (Vertical Electric Field) ซึ่งนิยมอธิบายในรูปของการลดประสิทธิภาพของสภาพคล่อง (Mobility Degradation) ใช้สัญลักษณ์ “ θ ” (Theta) ดังนั้นค่าสภาพคล่องของพาหะที่ได้รับผลจากสนามไฟฟ้าแนวตั้ง (Vertical Field mobility : μ_v) ได้จากสมการ (4.3)

$$\mu_v = \frac{\mu}{1 + \theta(V_{GS} - V_{TH})} \quad (4.3)$$

โดยพารามิเตอร์ THETA (θ) สามารถหาได้จากสมการ (4.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

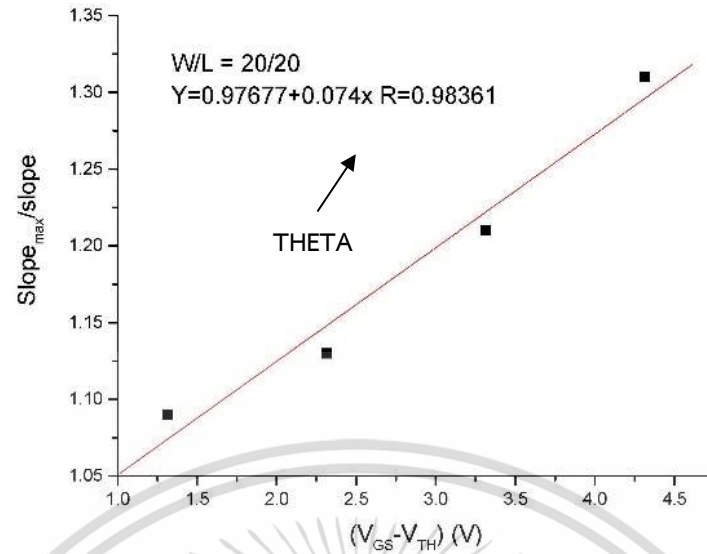
$$\frac{\text{SlopeMax}(I_{DS}V_S.V_{GS})}{\text{Slope}(I_{DS}V_S.V_{GS})} = 1 + \theta(V_{GS} - V_{TH}) \quad (4.4)$$

ผลการคำนวณหาค่าสภาพคล่องของพาหะในช่องทางเดินกระแสของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมาในปริมาณรังสี ที่ 1 , 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์ พบว่าค่าสภาพคล่องของพาหะในช่องทางเดินกระแสมีค่าลดลง เนื่องจากผลของรังสีแกมมานั้นเหนี่ยวนำให้สนามไฟฟ้าแนวตั้งมีค่าสูงมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สภาพคล่องของประจุพาหะ (μ) ของ nMOSFETs ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$

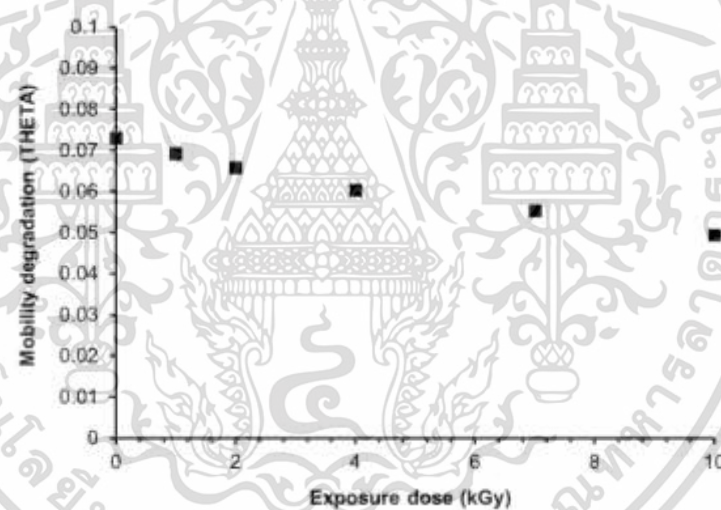
Exposure dose (kGy)	Parameter of nMOSFETs	
	W/L = 20/0.8 μm surface mobility (cm^2/Vs)	W/L = 20/20 μm surface mobility (cm^2/Vs)
0	194.69	467.89
1	152.43	458.49
2	151.86	453.87
4	135.90	453.58
7	127.33	448.87
10	120.58	447.44

เมื่อทำการพล็อตกราฟจากสมการที่ (4.4) โดยใช้ข้อมูลความชันของกราฟจากรูปที่ 4.25 ตารางที่ 4.4 จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.19 จากรูปที่ 4.19 จะพบว่าค่าความชันของกราฟมีค่า 0.074 V^{-1} ซึ่งก็คือค่า Theta นั้นเอง ในทำนองเดียวกัน เมื่อเอ็นมอสได้รับรังสีแกมมา ปริมาณ 1 , 2 , 4 , 7 และ 10 กิโลเกรย์ จะทำให้ความชันของกราฟ I_D-V_{GS} มีค่าเปลี่ยนไป ข้อมูลของค่าความชันดังกล่าวที่ค่าปริมาณรังสีแกมมาแต่ละค่า แสดงในตารางที่ 4.5 ถึง 4.9 เมื่อนำค่าความชันในแต่ละตารางไปพล็อตกราฟ ก็จะหาค่า Theta ที่เกิดจากผลของรังสีแกมมาได้ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Theta และค่าปริมาณรังสีแกมมา แสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.26 แสดงการสกัด (extraction) พารามิเตอร์ THETA (θ) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด

W/L=20/20 μm ก่อนได้รับรังสี



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ THETA (θ) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด

W/L=20/20 μm กับปริมาณรังสีแกมมาขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าเอ็นมอสเฟตขนาด W/L=20/20 μm จะมีค่า Theta ลดลงเมื่อได้รับปริมาณรังสีแกมมามากขึ้น ($\theta = 0.049 \text{ V}^{-1}$ ที่ปริมาณรังสีแกมมา 10 kGy) ผลการคำนวณหาค่าสภาพคล่องของพาหะในช่องทางเดินกระแสของพีมอสเฟต ที่มีขนาด W/L=20/0.8 μm และ W/L=20/20 μm ก่อนและหลังจากได้รับรังสีแกมมาในปริมาณรังสีที่ 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์ พบว่าค่าสภาพคล่องของพาหะในช่องทางเดินกระแสมีค่าลดลง เช่นเดียวกันกับในเอ็นมอสเฟต

เนื่องจากผลของรังสีแกมมานั้นเหนี่ยวนำให้สนามไฟฟ้าแนวตั้งมีค่าสูงมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.11 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 สภาพคล่องของประจุพาหะ (μ) ของ pMOSFETs ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$

Exposure dose (kGy)	Parameter of pMOSFETs	
	$W/L = 20/0.8 \mu\text{m}$ surface mobility (cm^2/Vs)	$W/L = 20/20 \mu\text{m}$ surface mobility (cm^2/Vs)
0	482.783	147.1921
1	469.947	142.3837
2	455.111	139.5273
4	416.560	139.0282
7	375.597	136.8444
10	351.667	136.1398

เมื่อทำการพล็อตกราฟจากสมการที่ (4.4) โดยใช้ข้อมูลความชันของกราฟจากตารางที่ 4.12 จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.12 ค่าความชันของกราฟ I_D-V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของพีมอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสีแกมมา

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
-1.4	9.499×10^7 (maximum)
-2	2.83×10^6
-3	2.59×10^6
-4	2.34×10^6
-5	2.13×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 1 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
-1.5	3.08×10^6 (maximum)
-2	2.73×10^6
-3	2.54×10^6
-4	2.30×10^6
-5	2.10×10^6

ตารางที่ 4.14 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 2 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
-1.65	3.01×10^6 (maximum)
-2	2.70×10^6
-3	2.53×10^6
-4	2.30×10^6
-5	2.09×10^6

ตารางที่ 4.15 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
-1.65	3.00×10^6 (maximum)
-2	2.68×10^6
-3	2.54×10^6
-4	2.31×10^6
-5	2.10×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

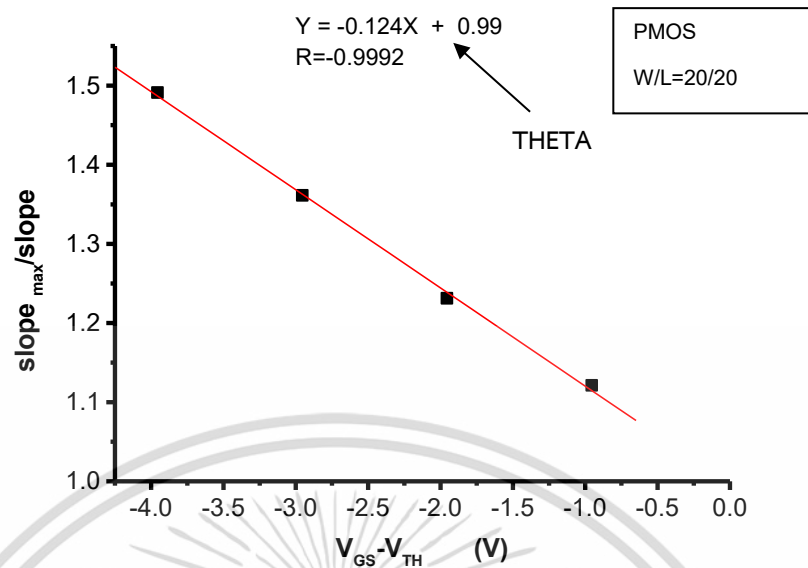
ตารางที่ 4.16 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 7 กิโลเกรย์

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
-1.75	(maximum)
-2	2.64×10^6
-3	2.53×10^6
-4	2.30×10^6
-5	2.10×10^6

ตารางที่ 4.17 ค่าความชันของกราฟ I_D - V_{GS} ที่ค่าแรงดัน V_{GS} ค่าต่างๆ ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ หลังจากได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์

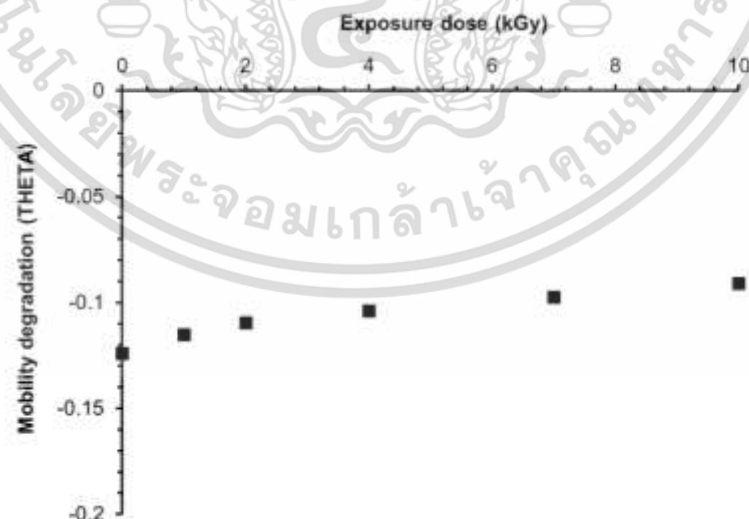
V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
-1.8	2.94×10^6 (maximum)
-2	2.61×10^6
-3	2.54×10^6
-4	2.31×10^6
-5	2.11×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงการสกัดพารามิเตอร์ THETA (Θ) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสี

จากรูปที่ 4.28 จะพบว่าค่าความชันของกราฟมีค่า -0.124 V^{-1} ซึ่งก็คือค่า Theta นั้นเอง ในทำนองเดียวกันเมื่อพีมอสเฟตได้รับรังสีแกมมาที่ปริมาณ 1, 2, 4, 7 และ 10 กิโลเกรย์ จะทำให้ความชันของกราฟ I_D-V_{GS} มีค่าเปลี่ยนไป ข้อมูลของค่าความชันดังกล่าวที่ค่าปริมาณรังสีแกมมาแต่ละค่าแสดงในตารางที่ 4.13 ถึง 4.17



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง THETA ที่เหนี่ยวนำให้สภาพคล่องตัวพาหะลดลงกับปริมาณรังสี

ขนาดแกมมาต่างๆ ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนได้รับรังสี

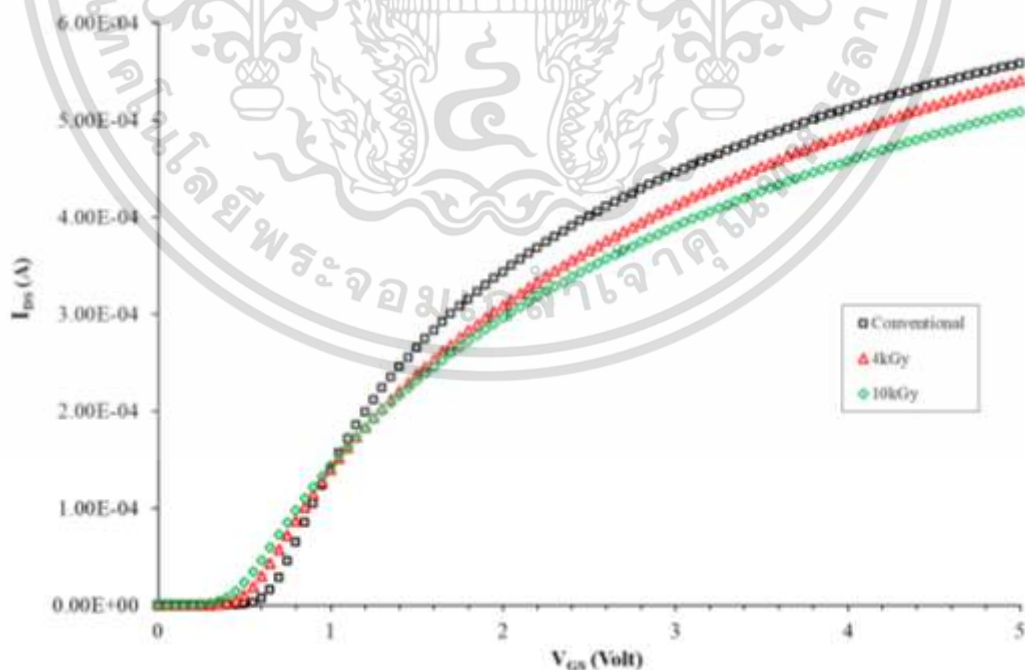
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าความชันในแต่ละตารางไปพล็อตกราฟ ก็จะหาค่า Theta ที่เกิดจากผลของรังสีแกมมาได้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Theta และค่าปริมาณรังสีแกมมา แสดงในรูปที่ 4.29

4.5 การทดสอบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อค่าความนำถ่ายไอออน (Transconductance: g_m)

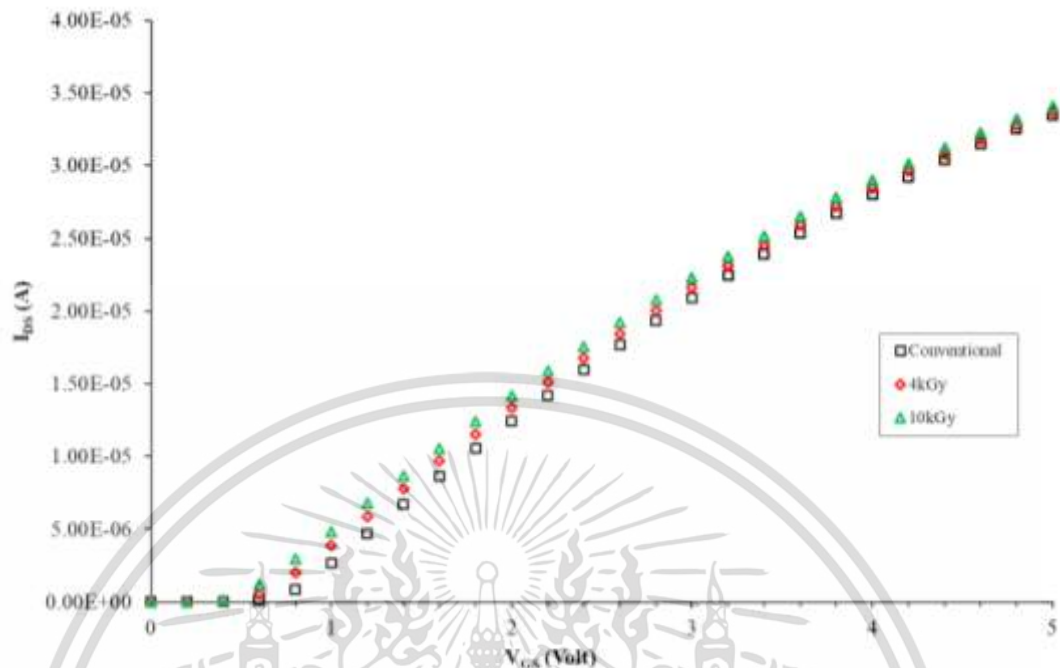
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า ($I_{DS}-V_{GS}$) จะสามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่มของมอสเฟตได้ ยิ่งกว่านั้นยังสามารถหาพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ได้คือ ค่าความนำถ่ายไอออน (Transconductance : g_m) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงประสิทธิภาพการทำงานของมอสเฟต หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเดรนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกต (dI_D/dV_{GS}) หรือก็คือความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกตนั่นเอง

เมื่อนำเอ็นมอสเฟตและพีมอสเฟตมาทำการทดลองวัดหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกต ทั้งก่อนการฉายรังสีแกมมาและหลังจากการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์ จะแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.30 ถึง 4.33

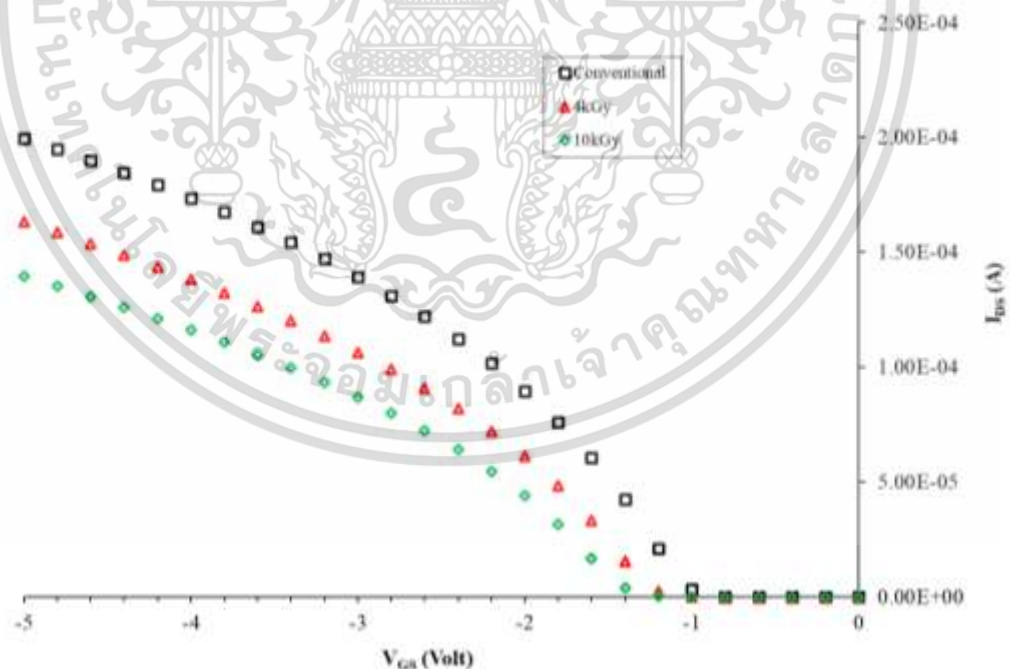


รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด

$W/L=20/0.8 \mu m$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



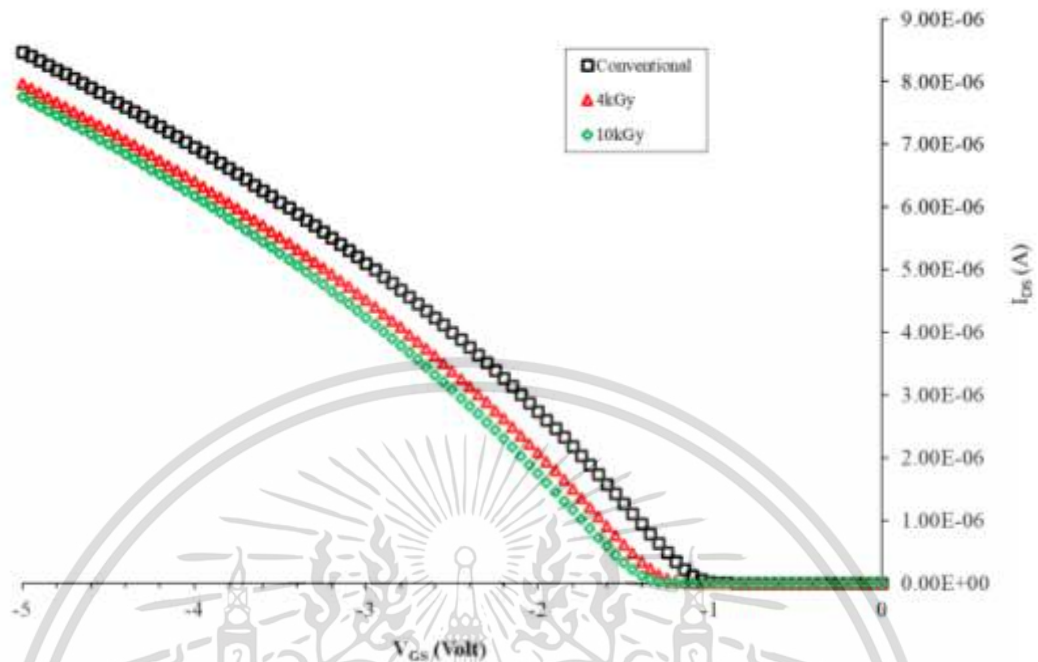
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพีมอสเฟตที่มีขนาด

$W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของฟิโอสเฟทที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เมื่อพิจารณาค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.30 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.12 และแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกตและความชันหรือค่าความนำถ้ายอนดังรูปที่ 4.34 ทำนองเดียวกันค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.31 จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.17 และแสดงเป็นกราฟ G_m-V_{GS} ดังรูปที่ 4.32 ถึงรูป 4.33

จะพบว่าเมื่อมอสเฟทได้รับรังสีแกมมาปริมาณมากขึ้น จะทำให้ค่าความนำถ้ายอนมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.18 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของ ีเอ็มมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$

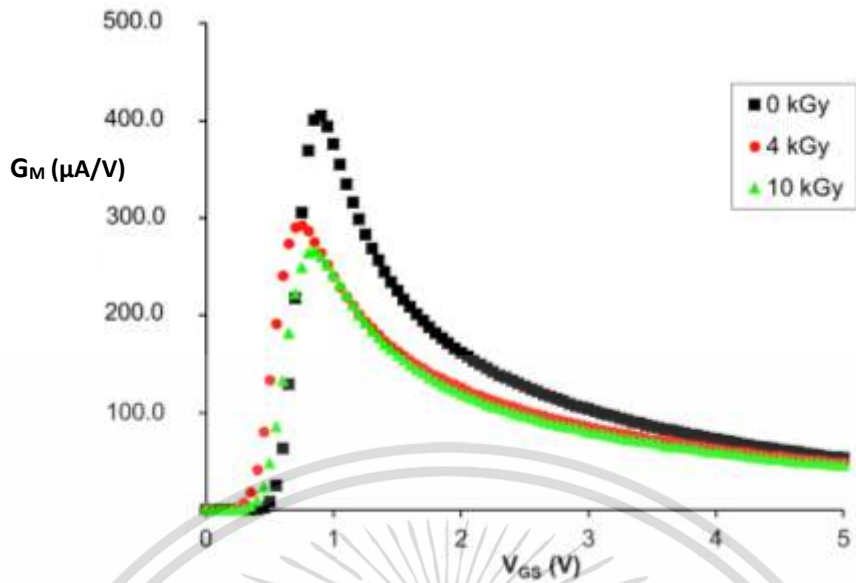
V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)	V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
0	7.55×10^{11}	2.6	9.58×10^5
0.2	1.35×10^8	2.8	8.75×10^5
0.4	2.64×10^6	3	8.01×10^5
0.6	1.26×10^4	3.2	7.37×10^5
0.8	3.96×10^4	3.4	6.81×10^5
1	3.36×10^4	3.6	6.35×10^5
1.2	2.57×10^4	3.8	5.90×10^5
1.4	2.07×10^4	4	5.46×10^5
1.6	1.74×10^4	4.2	5.11×10^5
1.8	1.50×10^4	4.4	4.74×10^5
2	1.32×10^4	4.6	4.49×10^5
2.2	1.17×10^4	4.8	4.19×10^5
2.4	1.06×10^4	5	3.98×10^5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

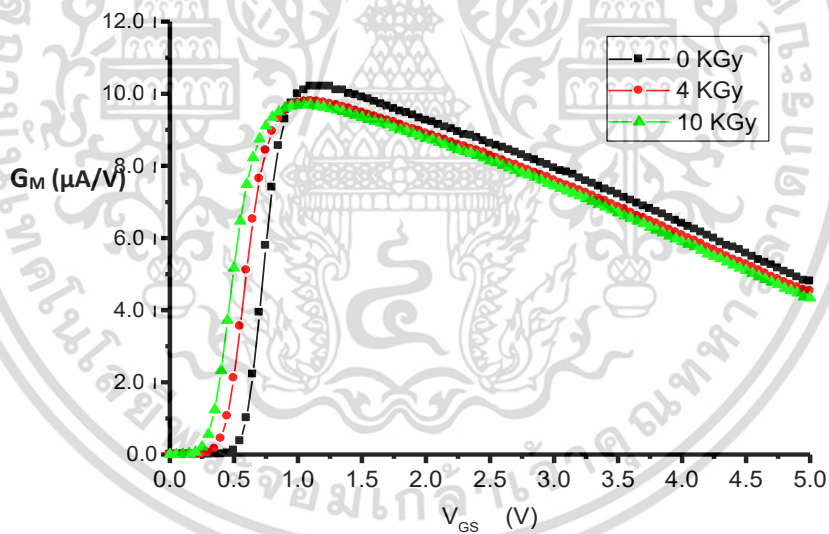
ตารางที่ 4.19 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของ ี้นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)	V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
0	1.59×10^{12}	2.6	8.38×10^6
0.2	4.50×10^{11}	2.8	8.12×10^6
0.4	8.69×10^9	3	7.83×10^6
0.6	1.06×10^6	3.2	7.55×10^6
0.8	7.41×10^6	3.4	7.26×10^6
1	9.90×10^6	3.6	6.93×10^6
1.2	1.01×10^5	3.8	6.63×10^6
1.4	9.91×10^6	4	6.31×10^6
1.6	9.66×10^6	4.2	5.99×10^6
1.8	9.40×10^6	4.4	5.65×10^6
2	9.15×10^6	4.6	5.34×10^6
2.2	8.90×10^6	4.8	5.01×10^6
2.4	8.65×10^6	5	4.72×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ G_m - V_{GS} ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ G_m - V_{GS} ของเอ็นมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพี
มอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu m$

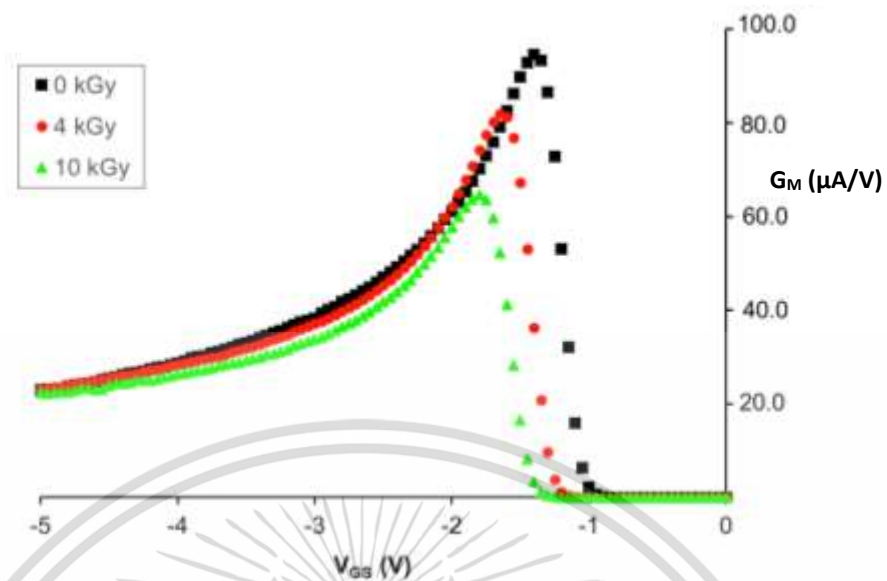
V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)	V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
0	4.4×10^{13}	-2.6	4.68×10^5
-0.2	8.8×10^{13}	-2.8	4.31×10^5
-0.4	2.76×10^{11}	-3	4.01×10^5
-0.6	6.2×10^9	-3.2	3.74×10^5
-0.8	1.27×10^6	-3.4	3.5×10^5
-1	4.83×10^5	-3.6	3.3×10^5
-1.2	11.0×10^5	-3.8	3.12×10^5
-1.4	9.96×10^5	-4	2.94×10^5
-1.6	8.4×10^5	-4.2	2.79×10^5
-1.8	7.22×10^5	-4.4	2.65×10^5
-2	6.33×10^5	-4.6	2.52×10^5
-2.2	5.65×10^5	-4.8	2.41×10^5
-2.4	5.11×10^5	-5	2.33×10^5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

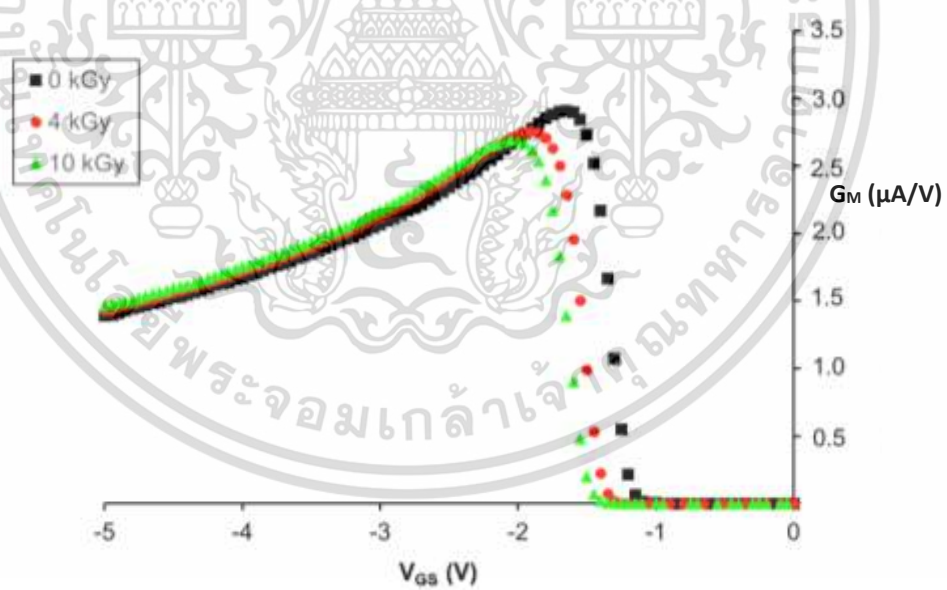
ตารางที่ 4.21 ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเกต ($I_{DS}-V_{GS}$) ของพี
มอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20/20 \mu\text{m}$

V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)	V_{GS} (Volt)	Slope (A/V)
0	8.00×10^{14}	-2.6	2.28×10^6
-0.2	4.50×10^{13}	-2.8	2.17×10^6
-0.4	-9.30×10^{13}	-3	2.06×10^6
-0.6	1.27×10^{11}	-3.2	1.97×10^6
-0.8	3.92×10^9	-3.4	1.89×10^6
-1	5.19×10^7	-3.6	1.81×10^6
-1.2	2.63×10^6	-3.8	1.73×10^6
-1.4	3.18×10^6	-4	1.66×10^6
-1.6	3.09×10^6	-4.2	1.60×10^6
-1.8	2.91×10^6	-4.4	1.54×10^6
-2	2.73×10^6	-4.6	1.49×10^6
-2.2	2.55×10^6	-4.8	1.43×10^6
-2.4	2.41×10^6	-5	1.39×10^6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ G_m - V_{GS} ของพีมอสเฟต ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ G_m - V_{GS} ของพีมอสเฟตที่มีขนาด $W/L=20//20 \mu\text{m}$ ก่อนและหลังได้รับรังสีแกมมาปริมาณ 4 และ 10 กิโลเกรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ายอดกราฟ ถูกเรียกว่า ค่าความนำถ่ายไอออนสูงสุด (maximum transconductance) จะเห็นว่าเมื่อปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มมากขึ้นค่าความนำถ่ายไอออนสูงสุด (maximum transconductance) จะลดลงทั้งในเอ็นมอสและพีมอส แสดงได้ดังตารางที่ 4.22-4.23 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.22 ค่าความนำถ่ายไอออนสูงสุด (maximum transconductance) ของ nMOSFETs ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$

Exposure dose (kGy)	Parameter of nMOSFETs	
	$W/L = 20/0.8 \mu\text{m}$	$W/L = 20/20 \mu\text{m}$
	Maximum transconductance (A/V^2)	Maximum transconductance (A/V^2)
0	414×10^{-6}	1.01×10^{-5}
1	329×10^{-6}	9.90×10^{-6}
2	328×10^{-6}	9.80×10^{-6}
4	293×10^{-6}	9.79×10^{-6}
7	275×10^{-6}	9.69×10^{-6}
10	260×10^{-6}	9.66×10^{-6}

ตารางที่ 4.23 ค่าความนำถ่ายไอออนสูงสุด (maximum transconductance) ของ pMOSFETs ที่มีขนาด $W/L=20/0.8 \mu\text{m}$ และ $W/L=20/20 \mu\text{m}$

Exposure dose (kGy)	Parameter of pMOSFETs	
	$W/L = 20/0.8 \mu\text{m}$	$W/L = 20/20 \mu\text{m}$
	Maximum transconductance (A/V^2)	Maximum transconductance (A/V^2)
0	104×10^{-6}	3.18×10^{-6}
1	101×10^{-6}	3.07×10^{-6}
2	98.03×10^{-6}	3.01×10^{-6}
4	89.97×10^{-6}	3.00×10^{-6}
7	81.12×10^{-6}	2.95×10^{-6}
10	75.96×10^{-6}	2.94×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหัววัดรังสีแกมมา โดยการศึกษาทั้งพีมอสเฟต (PMOS) และเอ็นมอสเฟต (NMOS) ที่ความหนาของเกตออกไซด์ (gate oxide) เท่ากับ 15 นาโนเมตร มีความกว้างช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 ไมโครเมตร และมีความยาวช่องทางเดินกระแส เท่ากับ 20 และ 0.8 ไมโครเมตร ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตเมื่อได้รับรังสีแกมมาด้วยโคบอลต์-60 ที่ปริมาณ 1 ,2 ,4 ,7 และ 10 กิโลเกรย์

จากการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าออกไซด์ของมอสคาปาซิเตอร์ พบว่าเมื่ออุปกรณ์ได้รับรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆแล้ว พบว่าโครงสร้าง Poly/Psub_Area และ Poly/Psub_Peri มีค่าแรงดันแถบเรียบเลื่อนลดลง และโครงสร้าง Poly/Nwell_Area และ Poly/Nwell_Peri มีค่าแรงดันแถบเรียบเลื่อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมานั้นเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกในออกไซด์ และที่อินเตอร์เฟส ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) เป็นผลให้เกิดการเหนี่ยวนำประจุอิเล็กตรอนในฐานรอง (substrate) เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบของโครงสร้าง Area และ Peri นั้น พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสองโครงสร้างมีขนาดพื้นที่เท่ากัน โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นรอบรูป

จากการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) ของเอ็นมอสเฟตที่ความกว้างและยาวช่องทางเดินกระแส 20 ไมโครเมตร พบว่ารังสีแกมมานั้นส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) ลดลง เมื่อได้รับปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในอัตรา 30.32 mV/kGy สำหรับของพีมอสเฟต พบว่ารังสีแกมมานั้นส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{TH}) เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในอัตรา 28.07 mV/kGy

นอกเหนือจากข้างต้น เมื่อนำผลจากการทดสอบค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสเฟตและพีมอสเฟต มาใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพคล่องพาหะบริเวณผิว (surface mobility) พบว่ารังสีแกมมานั้นส่งผลให้สภาพคล่องของประจุพาหะของเอ็นมอสเฟต มีการเปลี่ยนแปลงลดลง 20.45 cm^2/Vs ที่ปริมาณรังสี 10 กิโลเกรย์ และ สภาพคล่องของประจุพาหะของพีมอสเฟต มีการ

เปลี่ยนแปลงลดลง 11.06 cm^2/Vs ที่ปริมาณรังสี 10 กิโลเกรย์ และเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์การลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญต์เห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของสภาพคล่อง พบว่าค่าสัมบูรณ์ (Absolute) ของพารามิเตอร์การลดประสิทธิภาพของสภาพคล่องพหุ มีค่าลดลง 5 % และ 4.5 % สำหรับพิมอสเฟทและเอ็นมอสเฟท ตามลำดับ

จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดันเกต (V_{GS}) พบว่ารังสีแกมมาปริมาณ 10 กิโลเกรย์ จะส่งผลให้ค่าความนำถ่ายโอนสูงสุด (maximum tranconductance: G_m) มีการเปลี่ยนแปลงลดลง 7.5% สำหรับพิมอสเฟท และ เปลี่ยนแปลงลดลง 4.35% สำหรับเอ็นมอสเฟท แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของพิมอสเฟทและเอ็นมอสเฟทมีประสิทธิภาพลดลง เมื่อได้รับปริมาณรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น

จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) กับแรงดันเดรน (V_D) พบว่ารังสีแกมมานั้นส่งผลให้อุปกรณ์เอ็นมอส ที่ได้รับรังสีแกมมา 10 กิโลเกรย์ มีค่ากระแสเดรนอิมิต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีแกมมานั้นส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มลดลง ดังนั้นผลต่างของเทอม $(V_{GS}-V_T)^2$ มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเดรนอิมิต์มีค่าเพิ่มขึ้น และอุปกรณ์พิมอสเฟท ที่ได้รับรังสีแกมมา 10 กิโลเกรย์ พบว่าค่ากระแสเดรนอิมิต์มีค่าลดลง เนื่องจากรังสีแกมมานั้นส่งผลให้ค่าแรงดันขีดเริ่มเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผลต่างของเทอม $(V_{GS}-V_T)^2$ จึงมีค่าลดลง ทำให้กระแสเดรนอิมิต์มีค่าลดลง

จากการศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีแกมมาลงบนมอสเฟทนี้จะเป็นความรู้ เพื่อนำไปพัฒนาและต่อยอดงานวิจัยในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจสอบรังสีแกมมาที่มีต้นทุนต่ำและประสิทธิภาพสูงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 4.กรุงเทพมหานคร: แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง.2551
- [2] G. A. Ausman and F. B. McLean, “Electron-hole pair creation energy in SiO₂,” Appl. Phys. Lett., vol. 26, p. 173, 1975
- [3] J.M.Benedetto, H.E.Boesch Jr., The relationship between CO⁶⁰ and 10KEV X-ray damage in MOS devices, IEEE Trans.
- [4] Nisha, Rekha Yadav , Radiation Effect on MOSFET at Deep Submicron Technology, Volume 3, Issue 8, August 2013
- [5] G M Moore, Cramming more components onto integrated circuits, Electronics Magazine, Vol. 3, No. 8, 1965.
- [6] Semiconductor Industry Association (SIA), the International Technology Roadmap for Semiconductors, 2005.
- [7] R H Dennard, F H Gaensslen, H N Yu, V L Ride out, E Bassous and AR Leblanc, Design of ion–implanted MOSFET’s with very small physical dimensions, IEEE Journal of Solid–State Circuits, Vol. 9, No.5, pp. 256–268, 1974.
- [8] D L Critchlow, MOSFET scaling–The driver of VLSI technology,Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 4, pp. 659–667, 1999.
- [9] <https://jra-srf.desy.de/e86/e575/e605/infoboxContent608/care-thesis-06-004.pdf>
- [10] Semiconductor Material and Device Characterization, Second Edition. Dieter K. Schroder,1998.
- [11] C.E. Barnes,D.M Fleetwood,D.C Shaw , and P.S. Winokur. Post irradiation effect (PIE) in integrated circuits. IEEE Transctions on Nuclear science,1992.
- [12] Gennady Zebrev , Modeling of Radiation-Induced Leakage and Low Dose-Rate Effects in Thick Edge Isolation of Modern MOSFETs, IEEE Transactions on Nuclear Science 56(4):2230 - 2236 September 2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Kaushik Roy, Leakage Current Mechanisms and Leakage Reduction Techniques in Deep-Submicrometer CMOS Circuits IEEE, Vol. 91, No. 2, 2003.
- [14] Daniel Forty, Mosfet Modelling with SPICE Principle and Practice. Newjersy: Prentice-Hall,1997.G.Messenger and M.Ash. The effect of Radiation on Electronic Systems.Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986.
- [15] G. A. Ausman and F. B. McLean, “Electron-hole pair creation energy in SiO₂,” Appl. Phys. Lett., vol. 26, p. 173, 1975
- [16] J.M.Benedetto, H.E.Boesch Jr., The relationship between CO60 and 10KEV X-ray damage in MOS devices, IEEE Trans.
- [17] Nisha, Rekha Yadav , Radiation Effect on MOSFET at Deep Submicron Technology, Volume 3, Issue 8, August 2013





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน	m_e	9.1091×10^{-31}	kg
มวลนิ่งของโปรตรอน	m_p	1.6726×10^{-31}	kg
มวลนิ่งของนิวตรอน	m_n	1.675×10^{-31}	kg
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.6021×10^{-19}	C
อัตราส่วนระหว่างประจุกับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	q/m_e	1.75879×10^{-11}	C/kg
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	2.9979×10^8	m/s
เปอร์มิตีวิตีในสุญญากาศ	ϵ_0	8.8542×10^{-12} 8.8542×10^{-14}	F/m F/cm
ค่าคงที่โบลทซ์มันน์	k	1.3805×10^{-23} 8.6171×10^{-5}	J/K eV/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	6.6256×10^{-34} 4.135×10^{-15}	J·s eV·s
เลขอะโวกาโด	μ_0	6.0221×10^{23}	1/mol
ค่าเปอร์มิอะบิลิตีในสุญญากาศ	m_n	1.2566×10^{-6}	$N \cdot A^2$
ค่าคงที่ของแรงคูลอมบ์	$k_e = 1/4\pi\epsilon_0$	8.9876×10^9	$N \cdot m^2/c^2$
ค่ารัศมีของบอร์ก	α_0	5.2918×10^{-11}	m
ค่าคงที่ของริคเบอร์ก	R_∞	1.0974×10^7	1/m
ค่าคงที่ของสเตฟาน	σ	5.6704×10^{-8}	W/m ²
ค่าบอร์ห์แมกนีตรอน	μ_B	9.274×10^{-24}	J/T
ค่าพลังงานจูล	J	6.242×10^{18}	eV
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์	K	$^{\circ}C + 273.15$	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยในระบบเอสไอ

ตารางที่ ข.1 หน่วยในระบบเอสไอ (International System Unit : SI Unit)

ปริมาณ	ชื่อหน่วย	หน่วยอนุพันธ์	หน่วยฐาน
ความยาว (Length)	Meter	-	M
มวล (Mass)	Kilogram	-	Kg
เวลา (Time)	Second	-	s
กระแสไฟฟ้า (Current)	Ampere	-	A
ความถี่ (Frequency)	Hertz	Hz	1/s
แรง (Force)	Newton	N	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
แรงดัน (Pressure)	Pascal	Pa	$\text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
พลังงาน (Energy)	Joule	J	$\text{N}\cdot\text{m} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$
กำลังไฟฟ้า (Power)	Watt	W	$\text{V}\cdot\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$
ประจุไฟฟ้า (Electric Charge)	Coulomb	C	A·s
ศักย์ไฟฟ้า (Potential)	Volt	V	$\text{J}/\text{C} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^3$
ความนำไฟฟ้า (Conductance)	Siemens	S	$\Omega^{-1} = \text{A}^2\cdot\text{s}^3/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)	Ohm	Ω	$\text{V}/\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2\cdot\text{s}^3$
ความจุไฟฟ้า (Capacitance)	Farad	F	$\text{C}/\text{V} = \text{A}^2\cdot\text{s}^4/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux)	Weber	Wb	$\text{V}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^2$
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)	Tesla	T	$\text{Wb}/\text{m}^2 = \text{kg}/\text{A}\cdot\text{s}^2$
ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)	Henry	H	$\text{Wb}/\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2\cdot\text{s}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ค.1 คำอุปสรรค หรือ คำนำหน้าหน่วย(Prefix)

10^n	คำอุปสรรค		ตัวย่อ	ความหมาย	ตัวเลข
10^{24}	ยอตตะ	yotta-	Y	ล้านล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000,000
10^{21}	เซตตะ	zetta-	Z	พันล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000,000
10^{18}	เอกซะ	exa-	E	ล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000
10^{15}	เพตะ	peta-	P	พันล้านล้าน	1,000,000,000,000,000
10^{12}	เทระ	tera-	T	ล้านล้าน	1,000,000,000,000
10^9	จิกะ	giga-	G	พันล้าน	1,000,000,000
10^6	เมกะ	mega-	M	ล้าน	1,000,000
10^3	กิโล	kilo-	k,K	พัน	1,000
10^2	เฮกโต	hector-	H	ร้อย	100
10^1	เดคา	deca-	da	สิบ	10
10^{-1}	เดซี	deci-	d	หนึ่งส่วนสิบ	0.1
10^{-2}	เซนติ	centi-	c	หนึ่งส่วนร้อย	0.01
10^{-3}	มิลลิ	milli-	m	หนึ่งส่วนพัน	0.001
10^{-6}	ไมโคร	micro-	μ	หนึ่งส่วนล้าน	0.000 001
10^{-9}	นาโน	nano-	n	หนึ่งส่วนพันล้าน	0.000 000 001
10^{-12}	พิโก	pico-	p	หนึ่งส่วนล้านล้าน	0.000 000 000 001
10^{-15}	เฟมโต	famto-	f	หนึ่งส่วนพันล้านล้าน	0.000 000 000 000 001
10^{-18}	อัตโต	atto-	a	หนึ่งส่วนล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 001
10^{-21}	เซปโต	zepto-	z	หนึ่งส่วนพันล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 000 001
10^{-24}	ยอกโต	yocto-	y	หนึ่งส่วนล้านล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 000 000 001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ห้องปฏิบัติการฉายรังสีแกมมา ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ



รูปที่ ข.1 แสดงห้องปฏิบัติการฉายรังสีแกมมา ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แสดงหน้าจอควบคุมสถานการณ์ทำงานและแผนผังห้องปฏิบัติการ



รูปที่ ข.3 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์มอสเฟตลงในแฮมเบอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 แสดงเครื่องฉายรังสีแกมมา ใช้ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 จำนวนทั้งหมด 6 แท่ง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวอมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์
 วัน เดือน ปีเกิด 16 กันยายน 2533
 ที่อยู่ 2172 ถนนเพชรบุรีตัดใหม่ แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร
 ประวัติการศึกษา 2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 2557 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2557-2562 ตำแหน่งที่ปรึกษา งานจัดการทรัพย์สินทางปัญญา สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
 พ.ศ.2562-ปัจจุบัน ตำแหน่งที่ปรึกษา งานกลยุทธ์ทรัพย์สินทางปัญญา สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Amonrat Kerdpradist, Anucha Ruangphanit, Wisut Titiroongruang ,Rangson Muanghlua
 “SPICE model extraction parameters of gamma irradiation on drain current and threshold voltage of n-channel MOSFETs” , International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology (IJSST)
- [2] Amonrat Kerdpradist, Anucha Ruangphanit, Wisut Titiroongruang ,Rangson Muanghlua
 “The effect of gamma irradiation on Threshold Voltage and channel mobility degradation of NMOS” The 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON2018), Page 308-311
- [3] Amonrat Kerdpradist, Anucha Ruangphanit, Wisut Titiroongruang ,Rangson Muanghlua
 “The Effects of Gamma Irradiation on Threshold Voltage and Channel Mobility Models of PMOS”, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) , Page 507-510
- [4] ออมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์, มนตรี แสนละมูล, อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง “คุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นฝังชนิดพีต่อการทนแรงดันพังทลายของไอจีบีทีชนิดเกตแบบซุด” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON 35), หน้า 751-754

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [5] Phasapon Manosukritkul , Amonrat Kerdpardist , Montree Saenlamool , Ekalak Chaowicharat , Amporn Poyai , Wisut Titiroonruang “An Improvement of the Breakdown Voltage Characteristics of NPT-TIGBT by Using a P-buried Layer”
Advanced Materials Research Vol.717 (2013) Page 158-163



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้