

การวิจัยอุปกรณ์ประเภท MOIS ในฟอสฟอรัสและซิลิคอน

SUBTHRESHOLD OPERATION OF MOIS DEVICE RESEARCH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

พ.ศ. 2544

ISBN 974-09-198-1

การวิจัยอุปกรณ์ประเภท MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

SUBTHRESHOLD OPERATION OF MOIS DEVICE RESEARCH



ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์

PHUMIN JINDAJITAWAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 40607

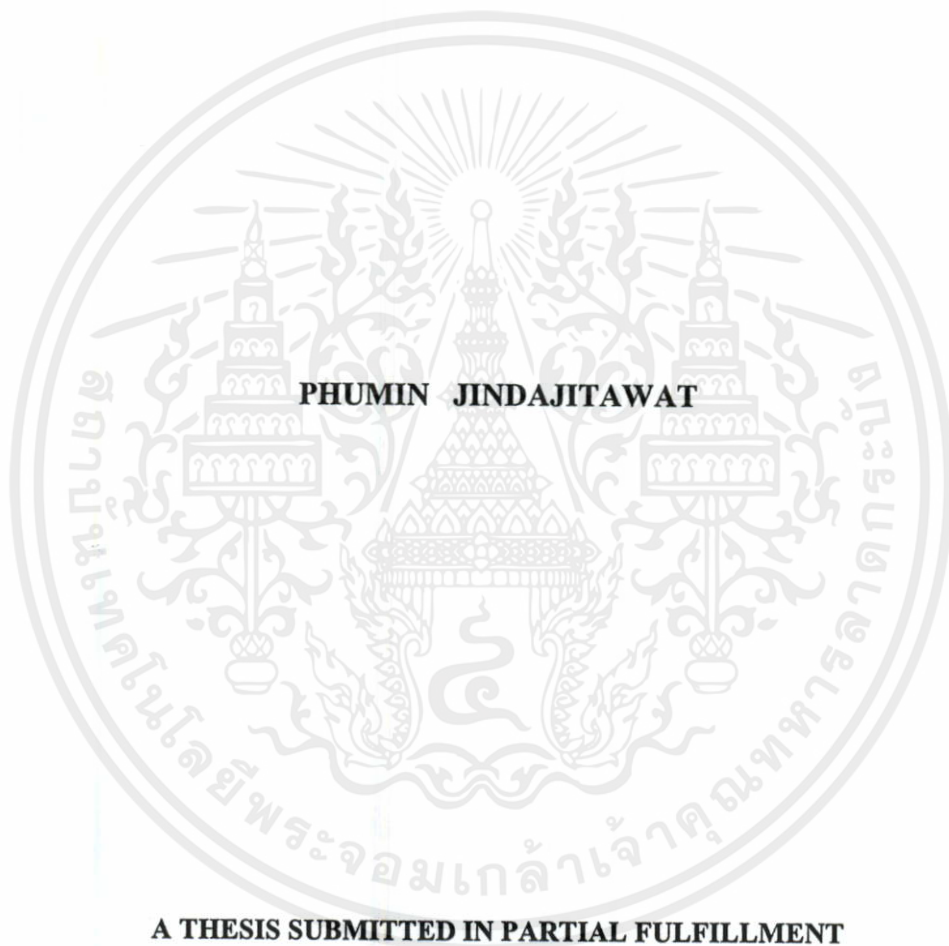
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2544

สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ พ.ศ. 2544

ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ ISBN 974-648-393-5

Library stamp box containing fields for 'b' and 'i' with dotted lines for text entry.

SUBTHRESHOLD OPERATION OF MOIS DEVICE RESEARCH



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อออก 2001 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง ISBN 974-648-393-5 เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิจัยอุปกรณ์ประเภท MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม
SUBTHRESHOLD OPERATION OF MOIS DEVICE RESEARCH
ชื่อนักศึกษา นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์
รหัสประจำตัว 42061106
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.จิรวัดณ์ ปานกลาง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตรุ่งเรือง	
ผศ.ดร.วรากร	เกษมสุวรรณ	
ดร.อภิรักษ์	ชนชยานนท์	
รศ.จิรวัดณ์	ปานกลาง	

วัน/เดือนปี ที่สอบ 19 กรกฎาคม 2544 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิจัยอุปกรณ์ประเภท MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม
นักศึกษา	นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์
รหัสประจำตัว	42061106
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ จิรวัดน์ ปานกลาง

บทคัดย่อ

เนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นผลการศึกษา และวิจัยการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS (Metal-Oxide-Intrinsic Semiconductor Transistor) ที่มีย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งเป็นการศึกษาต่อจากวิทยานิพนธ์ในปี พ.ศ. 2532 ที่ได้ทำการศึกษา และวิจัยทรานซิสเตอร์แบบนี้ ในย่านการทำงานเหนือแรงดันขีดเริ่มมาแล้ว การทำงานในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มมีความสำคัญกับการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) ที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากเป็นย่านการทำงานที่มีกระแสอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-9} A ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวงจรที่ต้องใช้กำลังงานอย่างจำกัด เช่น วงจรที่ใช้แบตเตอรี่เป็นส่วนจ่ายกำลังงาน นอกจากนี้การเข้าใจการทำงานในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มยังเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในงานเชิงอุปมา (Analog applications) อีกด้วย แนวทางการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษา และวัดคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการทางอุณหภูมิกายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เทียบเคียงกับทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม โดยมีรายละเอียดของการศึกษาประกอบไปด้วย การศึกษาค่าแรงดันขีดเริ่ม เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการกำหนดแรงดันไบแอสในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม การวัดและการกำหนดย่านปฏิบัติการในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม การหาค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม และผลการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม จากผลที่ได้ทำการศึกษาพบว่าทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS จะสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันเกตไบแอสมีค่าต่ำประมาณ 0.5 ถึง 2 V ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ PMOIS จะสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันเกตไบแอส -3 ถึง -5 V ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มของ NMOIS จะมีค่าสูงกว่า PMOIS ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องจากความแตกต่างกันของค่าความจุไฟฟ้าดีพลีชัน (depletion capacitive input) ภายใต้ช่องทางเดินกระแส ซึ่งค่าเฉลี่ยความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มที่วัดได้ใน NMOIST จะเท่ากับ 1.08 V/dec. และ สำหรับ PMOIST จะเท่ากับ 0.59 V/dec.

Thesis Title	Subthreshold Operation of MOIS Device Research
Student	Mr. Phumin Jindajitawat
Student ID.	42061106
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2001
Thesis Advisor	Associate Professor Jirawath Parnklang

ABSTRACT

The study of MOIST (Metal-Oxide-Intrinsic Semiconductor Transistor) in subthreshold operation is presented in this thesis. It was continued from S. Songsiri's thesis that concerned about above threshold operation. The subthreshold operation is important for low power applications, because this regime of operation operates on very low drain current (about 10^{-6} - 10^{-9} A). That is suitable for limited power applications, such as the system that is supplied by batteries. The understanding of subthreshold regime is also useful for analog application. The subthreshold experiments of MOIST were compared with the theory of MOST. The aims of this thesis are 1) to measure threshold voltage of the devices used for determining bias voltage in subthreshold operation, 2) to determine boundary of operation, 3) to study subthreshold slope, and 4) to research the effect of capacitive input. The experimental results show that the voltage ranges of subthreshold operation are 0.5 to 2 V, and -3 to -5 V for NMOIST and PMOIST, respectively. The subthreshold slope characteristic of NMOIST is higher than PMOIST, because of the depletion capacitive input under inversion channel of each device. The average values of subthreshold slope are 1.08 V/dec. and 0.59 V/dec. for NMOIST and PMOIST, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จลุล่วงด้วยการได้รับคำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอดจาก รศ.จิรวัดน์ ปานกลาง ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ กระผมรู้สึกทราบบ้างใจที่ได้ได้รับความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ พี่ นุจรินทร์ งามัญกุล ที่ได้คำปรึกษา และขัดเกลาความรู้ในส่วนทฤษฎีการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วรากร เกษมสุวรรณ ที่ได้ให้คำแนะนำในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มกับความจุไฟฟ้าดีพลีชันในอุปกรณ์ MOIS และกลไกการนำไฟฟ้าในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาเป็นพื้นความรู้สำหรับการทำงาน และสำหรับการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณ รัตน์สุดา ทองแดง ที่ช่วยพิมพ์ฉบับร่างของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในส่วนของการจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับสร้างและทดสอบสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ทั้งหมด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการนำเสนอบทความทางวิชาการ

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อ, คุณแม่ และผู้ปกครองทุกท่าน ที่คอยเลี้ยงดู, อบรมสั่งสอน พร้อมทั้งให้ความสนับสนุนด้านการเรียนมาโดยตลอด

ภูมินทร์ จินดาจิราวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
บทที่ 2 ทรานซิสเตอร์แบบ MOS และทฤษฎีการนำไฟฟ้า	4
2.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MOS	7
2.2 ปรัชญาการณในช่องทางเดินกระแส	11
2.2.1 ตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าไบแอส	12
2.2.2 ตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ภายใต้สภาวะไบแอสแรงดัน	17
2.2.3 คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS	23
2.3 กระบวนการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS	28
2.3.1 ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสยาว	28
2.3.2 แบบจำลองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS	30
2.3.3 Charge-sheet model	31
2.3.3.1 แรงดันเกตไบแอส และประจุอินเวอร์ชัน	35
2.3.4 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์แบบ MOS	41
2.4 การทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	45
2.4.1 ขอบเขตของช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นต้นฉบับที่คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.2 สมการกระแสในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม.....	48
2.4.3 กลไกการไหลของกระแสในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม	51
2.4.4 ความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	56
2.5 สรุป	57
บทที่ 3 ซิลิคอนและผลของอะตอมสารเจือทองคำ	59
3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน	59
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมि	60
3.3 คุณสมบัติของอะตอมทองคำในซิลิคอน	65
3.3.1 สารเจืออะตอมทองคำในซิลิคอน	69
3.3.2 ระดับเฟอร์มิของซิลิคอนเมื่อทำการเติมอะตอมสารเจือทองคำ	73
3.4 การเคลื่อนที่ของประจุในช่องทางเดินกระแส	78
3.5 สรุป	82
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	83
4.1 กระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS	83
4.2 การวัดคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม	86
4.2.1 การทดลอง และผลการทดลองหาค่าแรงดันขีดเริ่ม เพื่อระบุตำแหน่ง ของย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS....	87
4.2.2 การกำหนดย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่ม	96
4.2.3 การทดลอง และผลการทดลองหาค่าความชันย่านการทำงาน ก่อนแรงดันขีดเริ่ม	104
4.2.4 การทดลอง และผลการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า โชน์ด้านการค้า ใน MOIS	106
บทที่ 5 สรุปและบทวิจารณ์	110

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	113
ภาคผนวก ก ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติสำคัญของวัสดุ	116
ภาคผนวก ข แนวทางจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	119
ประวัติผู้เขียน	123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แรงดันไฟฟ้าไบอัสและทิศทางของกระแสสำหรับทรานซิสเตอร์ ชนิดผลของสนามไฟฟ้า	10
2.2 ย่านการทำงานของสัคย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในตัวเก็บประจุ MOS	16
3.1 ระดับเฟอร์มิของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ($T = 300 \text{ K}$)	77
4.1 เปรียบเทียบทิศทางของกระแส และแรงดันที่ใช้ในการหาแรงดันขีดเริ่ม	89
4.2 ความกว้างช่วงปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบของ PMOIS ที่มี W/L ต่างกัน โดยพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเท่ากับ $600 \Omega\text{-cm}$	97
4.3 ความกว้างช่วงปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบของ PMOIS ที่มี W/L ต่างกัน โดยพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเท่ากับ $5 \Omega\text{-cm}$	97
4.4 ความกว้างช่วงปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบระหว่าง PMOIS และ NMOIS ที่มี $W = 40 \mu\text{m}$, $L = 40 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$	102
4.5 ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มของ MOIS ที่มี W/L ต่างกัน	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า 4
2.2	โครงสร้างทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ดีพลีชันโหมด 5
2.3	สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า, กราฟคุณสมบัติการส่งผ่าน, และ กราฟคุณสมบัติทางด้านเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ทั้ง 4 โครงสร้าง 6
2.4	โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด 7
2.5	ภาพ 3 มิติของทรานซิสเตอร์แบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์โหมดช่องทางเดินกระแสเอ็น...9
2.6	ช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์แบบ MOS 11
2.7	แถบพลังงานของวัสดุชนิดต่างๆที่นำมาสร้างเป็นตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ในสถานะที่เป็นอิสระต่อกัน 13
2.8	แผนภาพแถบพลังงานของการเชื่อมต่อกันระหว่างอะลูมิเนียม-ซิลิคอน ไดออกไซด์-ซิลิคอน เมื่อ ไม่มีการ ไบอัสแรงดัน ไฟฟ้า 15
2.9	แผนภาพแถบพลังงานและการสะสมประจุของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพี 17
2.10	พลังงาน, ประจุ, สนามไฟฟ้า, และแรงเคลื่อนไฟฟ้าในสถานะอินเวอร์ชัน 21
2.11	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุในสารกึ่งตัวนำที่เป็นฟังก์ชันกับศักย์ไฟฟ้า บริเวณผิวหน้าสำหรับฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี 22
2.12	แผนภาพการโค้งงอของแถบพลังงานที่ผิวหน้าของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ในสถานะอินเวอร์ชันที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี 27
2.13	กราฟความสัมพันธ์ C-V ของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS 27
2.14	ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแสเอ็น ภายใต้สถานะไบอัส และการสะสมประจุในบริเวณช่องทางเดินกระแส 28
2.15	กราฟการไหลของกระแสเดรนใน MOSFET โดยมีองค์ประกอบเนื่องจากการแพร่ของประจุ และการเร่งเนื่องจากสนามไฟฟ้า 30
2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสารกึ่งตัวนำกับแรงดันเกต-ฐานรอง 36
2.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุอินเวอร์ชันกับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ 36
2.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุอินเวอร์ชันกับแรงดันเกต-ฐานรอง เปรียบเทียบระหว่างสมการประมาณในช่วงวีคอินเวอร์ชัน และสมการในรูปทั่วไป 39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ประจุในชั้นอินเวอร์ชันที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันเกต-ฐานรอง ในรูปเชิงเส้น	41
2.20 ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแสเอ็น ที่ไบแอสแรงดันภายนอกอย่างเหมาะสม	43
2.21 นิยามแรงดันย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่วงต่าง ๆ	46
2.22 ย่านปฏิบัติการของทรานซิสเตอร์แบบ MOS และค่าแรงดันขีดเริ่ม.....	47
2.23 กราฟคุณสมบัติ I_D - V_{DS} ของ MOSFET ในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่ม	50
2.24 โครงสร้างรอยต่อของทรานซิสเตอร์ NMOS บริเวณช่องทางเดินกระแสในอุดมคติ...52	
2.25 ภาพขยายรอยต่อไดโอดแบบ high-low ภายใต้การไบแอส V_{DS}	53
2.26 การกระจายตัวของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในช่องทางเดินกระแสในสภาวะก่อนแรงดันขีดเริ่ม	54
2.27 การกระจายตัวของความหนาแน่นอิเล็กตรอน เมื่อได้รับการไบแอส V_{DS} เปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่ไบแอส V_{DS}	54
2.28 แผนภาพแถบพลังงาน MOSFET ในสภาวะการทำงานวีคอินเวอร์ชัน	55
3.1 ภาพการจัดเรียงตัวของอะตอมซิลิคอนในโครงผลึก	60
3.2 แผนภาพสถานะพลังงานของอะตอมสารเจือในแถบพลังงาน	66
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงชีวิตของโฮล และความหนาแน่นของอะตอมทองคำ ในซิลิคอนชนิดเอ็น	68
3.4 ความสามารถในการซึมผ่านของเงี่ยงของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในโครงผลึกซิลิคอน	69
3.5 Interstitial-substitutional diffusion by the kick-out mechanism	70
3.6 สภาพต้านทานไฟฟ้า และความหนาแน่นอะตอมสารเจือของซิลิคอนที่ 300 K.....78	
3.7 เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบระหว่างระดับเฟอร์มิ(E_F), ระดับ Recombination(E_r), กึ่งกลางแถบพลังงาน(E_i) และ ระดับ demarcation (E_{de})....80	
4.1 แผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาด และสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ปกคลุมผิว...83	
4.2 การสร้างขั้วซอร์ส และแคโรนของทรานซิสเตอร์ PMOIS	84
4.3 การสร้างขั้วซอร์ส และแคโรนของทรานซิสเตอร์ NMOIS	84
4.4 การสร้างฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ที่บริเวณช่องทางเดินกระแส	85
4.5 การแพร่สารเจือทองคำเข้าไปในฐานรองทรานซิสเตอร์	85
4.6 โครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์.....86	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 รูปถ่ายทรานซิสเตอร์ที่ได้ออกแบบ และสร้างในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.....	86
4.8 Model HP 4061A Semiconductor /Component Test System with System Controller	87
4.9 กราฟแสดงการหาแรงดันขีดเริ่มด้วยวิธีประมาณกราฟเส้นตรงหาจุดตัดแกน.....	88
4.10 การวัดกระแสเดรนกับแรงดันเกต-ซอร์ส ของ MOISFET	89
4.11 วงจรสำหรับการวัดกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอร์ส ของ MOISFET	90
4.12 กราฟคุณสมบัติของ PMOIS หมายเลข 25 มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $600 \Omega\text{-cm}$	91
4.13 กราฟคุณสมบัติของ NMOIS หมายเลข 27 มี $W = 200 \mu\text{m}$ และ $L = 20 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $600 \Omega\text{-cm}$	92
4.14 กราฟคุณสมบัติของ PMOIS หมายเลข 25 มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $5\Omega\text{-cm}$	93
4.15 กราฟคุณสมบัติของ NMOIS หมายเลข 14 มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $5 \Omega\text{-cm}$	94
4.16 แสดงการหาขอบเขตย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่ม.....	97
4.17 กราฟเปรียบเทียบกระแสเดรน และแรงดันเกต-ซอร์ส ระหว่าง PMOIS และ NMOISพิกัดความต้านทาน $600 \Omega\text{-cm}$	98
4.18 กราฟเปรียบเทียบกระแสเดรน และแรงดันเกต-ซอร์ส ระหว่าง PMOIS และ NMOISพิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$	99
4.19 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแสและแรงดันเกต-ซอร์ส ระหว่าง PMOIS และNMOISพิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$	103
4.20 วงจรสมมูลในการวัดค่าความจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS	106
4.21 กราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น	106
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันเกต-ซอร์ส ในการวัดด้วย สัญญาณความถี่สูง ของ NMOIS ที่มีพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $5 \Omega\text{-cm}$	108
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันเกต-ซอร์ส ในการวัดด้วย สัญญาณความถี่สูง ของ NMOIS ที่มีพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $600 \Omega\text{-cm}$	108

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$[Au]$	ความหนาแน่นสถานะพลังงานอะตอมทองคำทั้งหมด	cm^{-3}
$[Au^0]$	ความหนาแน่นสถานะพลังงานอะตอมทองคำไม้อิออนไนซ์	cm^{-3}
$[Au^0]_i$	ความหนาแน่นสถานะพลังงานอะตอมทองคำไม้อิออนไนซ์- ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	cm^{-3}
$[Au^+]$	ความหนาแน่นสถานะพลังงานอะตอมทองคำอิออนไนซ์ผู้ให้	cm^{-3}
$[Au^+]_i$	ความหนาแน่นสถานะพลังงานอะตอมทองคำอิออนไนซ์ผู้ให้- ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	cm^{-3}
$[Au^-]$	ความหนาแน่นสถานะพลังงานอะตอมทองคำอิออนไนซ์ผู้รับ	cm^{-3}
B	ส่วนฐานรองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS หรือ MOIS	-
C_{FB}	ค่าความจุไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแสต่อหน่วยพื้นที่- เมื่ออยู่ในสภาวะแถบพลังงานแบนราบ	F.cm^{-2}
$C_{inversion}$	ค่าความจุไฟฟ้าของเกต-ฐานรองต่อหน่วยพื้นที่- ในสภาวะไบแอสแรงดันข่านอินเวอร์ชัน	F.cm^{-2}
C_{ox}	ค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์ที่ช่องทางเดินกระแส ต่อหน่วยพื้นที่	F.cm^{-2}
C_s	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นดีพลีชันในสารกึ่งตัวนำต่อหน่วยพื้นที่	F.cm^{-2}
$C_{S(min)}$	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นดีพลีชันในสารกึ่งตัวนำต่อหน่วยพื้นที่- เมื่อมีการขยายตัวมากที่สุด	F.cm^{-2}
D	ส่วนเดรนของทรานซิสเตอร์แบบ MOS หรือ MOIS	-
d_{drain}	ความกว้างของชั้นปลอดประจุระหว่างรอยต่อเดรน-ฐานรอง	m
d_{source}	ความกว้างของชั้นปลอดประจุระหว่างรอยต่อซอร์ส-ฐานรอง	m
E_A	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับ	eV, J
E_{Au^+}	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้เนื่องจากอะตอมทองคำ	eV, J
E_{Au^-}	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับเนื่องจากอะตอมทองคำ	eV, J
E_C	ระดับพลังงานที่ขอบล่างของแถบความนำ	eV, J
E_D	ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้	eV, J
E_{de}	ระดับ Demarcation	eV, J
E_f	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำใด ๆ	eV, J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$E_{f(intrinsic)}$	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	eV, J
E_{fn}	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	eV, J
E_{fp}	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	eV, J
E_g	ความกว้างของแถบหวงห้าม	eV, J
E_i	ระดับสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก($E_g/2$)	eV, J
E_j	ระดับพลังงานใด ๆ ภายในช่องว่างแถบพลังงาน	eV, J
E_r	ระดับพลังงานของ Recombination center	eV, J
E_v	ระดับพลังงานที่ขอบบนของแถบวาเลนซ์	eV, J
\mathcal{E}_{MS}	สนามไฟฟ้าตกคร่อมจากโลหะไปสารกึ่งตัวนำ	V.cm ⁻¹
\mathcal{E}_{OX}	สนามไฟฟ้าตกคร่อมชั้นออกไซด์	V.cm ⁻¹
\mathcal{E}_s	สนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ	V.cm ⁻¹
\mathcal{E}_x	สนามไฟฟ้าในแนวตั้ง (แนวแกน x)	V.cm ⁻¹
\mathcal{E}_y	สนามไฟฟ้าในแนวราบ (แนวแกน y)	V.cm ⁻¹
$F_{1/2}(\eta_c)$	the Fermi-Dirac integral of order 1/2	-
G	ส่วนเกทของทรานซิสเตอร์แบบ MOS หรือ MOIS	-
$G_{ih}(T)$	อัตราการทำลายพันธะของสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ ณ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ T เคลวิน	pairs.cm ⁻³ .s ⁻¹
I_D	กระแสเดรน	A
$I_{D(diffusion)}$	กระแสเดรนที่มีกระบวนการนำไฟฟ้าจากการแพร่ของประจุพาหะ	A
$I_{D(drift)}$	กระแสเดรนที่มีกระบวนการนำไฟฟ้าจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า	A
$I_{D,sub}$	กระแสเดรนในการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่ม	A
$I_{D,sub(stat)}$	กระแสเดรนในการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่ม ที่สภาวะอิมิตัว	A
I_s	$I_s = \frac{\mu_n W C_{OX} \gamma \phi_T^2}{2 \sqrt{\phi_{SW}} L} e^{(\phi_{SW} - 2\phi_f) / \phi_T}$	A
K_{Si}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซิลิคอน	-
K_{SiO2}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซิลิคอนไดออกไซด์	-
k	ค่าคงที่ของ Boltzmann = 8.627×10^{-5}	eV.K ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของซิลิคอน ถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
k_1, k_2	ค่าคงที่ของปฏิกิริยา	-
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	m
L_D	Debye length	m
$1/m_0$	ค่าอนุพันธ์ของสมการ $V_{GB} = V_{FB} + \phi_f + \gamma(\phi_f)^{1/2}$ เมื่อ $\phi_s = 1.5\phi_f$	-
$[N]$	ความหนาแน่นสถานะ j ทั้งหมด	cm^{-3}
$[N]_{(empty)}$	ความหนาแน่นสถานะ j ที่ไม่มีอิเล็กตรอนครอบครอง	cm^{-3}
$[N]_{(occupy)}$	ความหนาแน่นสถานะ j ที่มีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่	cm^{-3}
N_A	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ	cm^{-3}
N_{Au}	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือทองคำ	cm^{-3}
N_D	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้	cm^{-3}
N_C	ความหนาแน่นสถานะพลังงานในแถบความนำ	cm^{-3}
N_r	ความหนาแน่นสถานะของ Recombination center	cm^{-3}
N_V	ความหนาแน่นสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์	cm^{-3}
n	ความหนาแน่นอิเล็กตรอน	cm^{-3}
n_i	ความหนาแน่นประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	cm^{-3}
n_n	ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	cm^{-3}
n_o	ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	cm^{-3}
n_p	ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	cm^{-3}
p	ความหนาแน่นโฮล	cm^{-3}
p_n	ความหนาแน่นโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	cm^{-3}
p_o	ความหนาแน่นโฮลในสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	cm^{-3}
p_p	ความหนาแน่นโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	cm^{-3}
q	ค่าประจุมูลฐาน 1.60218×10^{-19}	C
Q_B	ประจุภายในชั้นดีฟิสิกซ์ของสารกึ่งตัวนำ	C
Q_{BM}	ประจุภายในชั้นดีฟิสิกซ์ เมื่อ MOSFET ทำงานในสภาวะโมเดอเรต C	C
Q_i	ประจุในชั้นอินเวอร์ชันของสารกึ่งตัวนำ	C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงนิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q_{io}	ค่าประจุคงที่ชั้นอินเวอร์ชันจากการทดลอง เมื่อแรงดันเกตเป็นศูนย์	C
$Q_i(0)$	ประจุในชั้นอินเวอร์ชันที่ปลายด้านซอร์สของสารกึ่งตัวนำ	C
$Q_i(L)$	ประจุในชั้นอินเวอร์ชันที่ปลายด้านเดรนของสารกึ่งตัวนำ	C
Q_m	ประจุไฟฟ้าสะสมในชั้นโลหะ	C
Q_s	ประจุสะสมทั้งหมดในสารกึ่งตัวนำ หรือผลรวมของประจุ - ในชั้นอินเวอร์ชันและประจุในชั้นดีพลีชัน	C
$R_i(n, p, T)$	อัตราการรวมตัวของอิเล็กตรอน-โฮลของสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ ที่มีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ T เคลวิน	pairs.cm ⁻³ .s ⁻¹
S	ส่วนซอร์สของทรานซิสเตอร์แบบ MOS หรือ MOIS	-
S_n	Capture crosssection of electrons	cm ² .s ⁻¹
S_p	Capture crosssection of holes	cm ² .s ⁻¹
S_i	ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	V.decade ⁻¹
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
t_{ox}	ความหนาของชั้นออกไซด์ที่ช่องทางเดินกระแส	m
V_{ox}	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชั้นออกไซด์	V
V_B	แรงดันไฟฟ้าไบแอสให้กับฐานรอง	V
V_D	แรงดันไฟฟ้าไบแอสให้กับเดรน	V
V_{DB}	แรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรน-ฐานรอง	V
V_{DS}	แรงดันไฟฟ้าระหว่างเดรน-ซอร์ส	V
V_{FB}	ค่าแรงดันแถบพลังงานแบนราบ	V
V_G	แรงดันไฟฟ้าไบแอสให้กับเกต	V
V_{GB}	แรงดันไฟฟ้าระหว่างเกต-ฐานรอง	V
V_{GS}	แรงดันไฟฟ้าระหว่างเกต-ซอร์ส	V
$V_P, V_{GS(off)}$	ค่าแรงดัน Pinch-off	V
V_S	แรงดันไฟฟ้าไบแอสให้กับซอร์ส	V
V_{SB}	แรงดันไฟฟ้าระหว่างซอร์ส-ฐานรอง	V
V_{ST}	แรงดันเกตไบแอสเข้าสู่ย่านสตรองอินเวอร์ชัน	V

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
V_{th}	ค่าแรงดันขีดเริ่ม	V
$V_{moderate}$	แรงดันเกตไบแอสที่ทำให้ MOSFET เริ่มเข้าสู่- สภาวะโมเดอเรตอินเวอร์ชัน	V
V_{weak}	แรงดันเกตไบแอสที่ทำให้ MOSFET เริ่มเข้าสู่- สภาวะการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	V
$V_{weak\ high}$	แรงดันเกตไบแอสสูงสุดที่ทำให้ MOSFET ยังอยู่ใน- สภาวะการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	V
$V_{weak\ low}$	แรงดันเกตไบแอสที่ทำให้ MOSFET เริ่มเข้าสู่- สภาวะการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	V
v	ความเร็วครีพท์	$m.s^{-1}$
x	ระยะในแนวดิ่ง (ในทิศ x)	m
x_{dep}	ความกว้างของชั้นดีพลีชัน(ชั้นปลอดประจุพาหะ)	m
$x_{dep(max)}$	ความกว้างสูงสุดของชั้นดีพลีชัน(ชั้นปลอดประจุพาหะ)	m
y	ระยะในแนวระนาบ (ในทิศ y)	m
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	m
Φ_M	ฟังก์ชันงานของโลหะ	V
Φ_S	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ	V
χ	ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี	V
ϵ_0	ค่าเพอร์มิตติวิตีในสุญญากาศ(Permittivity in vacuum) 8.854×10^{-14}	$F.cm^{-1}$
ϕ	ศักย์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งใด ๆ	V
ϕ_f	ค่าศักย์เฟอร์มิ หรือ ความต่างศักย์ระหว่างระดับเฟอร์มิของ- สารกึ่งตัวนำ และระดับอินทรินสิก	V
ϕ_s	ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ	V
ϕ_{ms}	ผลต่างของฟังก์ชันงานระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ	V
$\phi(x)$	ศักย์ไฟฟ้าใด ๆ ที่ตำแหน่งในแนวดิ่ง x	V
ϕ_{SL}	ศักย์ไฟฟ้าที่ปลายช่องทางเดินกระแสด้านแคโรน	V
ϕ_{So}	ศักย์ไฟฟ้าที่ปลายช่องทางเดินกระแสด้านฮอรัส	V

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ϕ_{sw}	ศักย์ไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแสในสภาวะทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม	V
ϕ_T	thermal voltage, kT/q	V
ϕ_{ST}	ศักย์ไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแส เมื่อเข้าสู่ย่านสตรองอินเวอร์ชัน	V
γ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแผ่นฐานรองสารกึ่งตัวนำ	$V^{1/2}$
μ	ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
μ_1, μ_2, \dots	ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยที่ 1, 2, ...	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
μ_n	ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	$cm^2.V^{-1}.s^{-1}$
ρ	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	$\Omega.cm$
τ_n	ค่าช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน	s
τ_p	ค่าช่วงชีวิตของโฮล	s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS (Metal-Oxide-Intrinsic Semiconductor Transistor) เป็นทรานซิสเตอร์ที่ได้มีการสร้าง และวิจัยภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง เริ่มตั้งแต่การศึกษา และพัฒนากระบวนการสร้าง [1] ในปี พ.ศ. 2532 และพัฒนาเป็นวงจรรวมขนาดเล็กแบบ CMOIS [2],[3] ในปี พ.ศ. 2535 และ พ.ศ. 2542 ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานในงานตรวจวัดความดัน ได้แก่ MOISFET pressure transducer และ Pressure controlled oscillator circuit based on MOIS Transistor [4] ในงานวิจัยที่ผ่านมาจะเน้นการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในส่วนของการทำงานช่วงเหนือแรงดันขีดเริ่ม (Above threshold regime) แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะให้ความสนใจคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ในการทำงานช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม (Subthreshold regime) โดยเป็นการทำงานของทรานซิสเตอร์ในช่วงแรงดันเกต-ซอร์ส มีค่าต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์เล็กน้อย การทำงานของทรานซิสเตอร์ในช่วงนี้จะมีค่ากระแสเดรนต่ำกว่าการทำงานในช่วงเหนือแรงดันขีดเริ่มเป็นอย่างมาก คือมีค่ากระแสเดรนอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-9} A ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการที่จะนำทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ไปประยุกต์ใช้ในสถานะที่มีการจำกัดการใช้พลังงาน เช่น อุปกรณ์ที่ใช้แบตเตอรี่เป็นส่วนจ่ายกำลัง นอกจากนี้ความเข้าใจในการทำงานของทรานซิสเตอร์ในช่วงการทำงานแรงดันต่ำยังเป็นประโยชน์ต่อการนำทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ไปประยุกต์ในงานเชิงอุปมา (Analog applications) ได้ในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

แนวทางการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS โดยใช้กระบวนการที่ได้มีการศึกษาและพัฒนามาแล้วในเอกสารอ้างอิง [1] และ [2] เพื่อนำทรานซิสเตอร์ที่ได้มาวัดคุณสมบัติและวิเคราะห์การทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม โดยทำการพิจารณาเทียบกับทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS (Metal-Oxide-Semiconductor Transistor)

เนื้อหาของงานวิจัยเรื่องนี้จะศึกษาการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS เปรียบเทียบกับการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม โดยศึกษาในประเด็น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน, การกำหนดขอบเขตของย่านปฏิบัติการ, ความชันในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม, และ ผลการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของ MOIS ในย่านการทำงานนี้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

พิจารณาตามกระบวนการสร้าง และโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS แล้วพบว่า มีโครงสร้างของอุปกรณ์เช่นเดียวกันกับทรานซิสเตอร์แบบ MOS จึงทำให้สามารถใช้วิธีการศึกษา และวิจัยทรานซิสเตอร์แบบ MOS เพื่อใช้เป็นต้นแบบเทียบเคียงได้ แต่ด้วยความแตกต่างของฐานรองที่เปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก (Extrinsic Semiconductor) ให้เข้าใกล้สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก (Intrinsic Semiconductor) ด้วยการเติมอะตอมของกำ เป็นผลทำให้สมการต่างๆที่ใช้อธิบายการทำงานของอุปกรณ์แตกต่างไปบ้าง โดยเฉพาะความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของประจุกระแสผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากการที่มีอะตอมของกำอยู่ภายในสารกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่เป็น Deep Impurity ในฐานรองที่เป็นซิลิคอนอะตอมของกำจะมีระดับพลังงานที่ใช้ในการจับประจุพาหะ 2 ระดับ (lifetime killer) ได้แก่

1. ระดับพลังงานผู้รับ โดยมีค่าต่ำกว่าระดับพลังงานนำไฟฟ้าของซิลิคอน 0.54 eV
2. ระดับพลังงานผู้ให้ โดยมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานวาเลนซ์ของซิลิคอน 0.36 eV

การที่มีระดับพลังงานทั้งสองเพิ่มขึ้นในฐานรองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS นอกจากที่จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิกเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้กับกึ่งกลางช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap) ซึ่งเป็นผลทำให้ชนิดของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แล้ว การมีอนุภาคเจือปนมากขึ้นยังเป็นผลทำให้ช่วงอายุของประจุพาหะลดลงเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้าง จึงเป็นผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลได้มีค่าลดลงเนื่องจากความคล่องตัวของประจุพาหะลดลง (ตามความสัมพันธ์ของอินส์ไตน์) ดังนั้นการที่จะนำสมการที่ใช้สำหรับอธิบายทรานซิสเตอร์แบบ MOS มาอธิบายทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ได้นั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลกระทบของอะตอมของกำตามทฤษฎีที่นำเสนอผ่านมาด้วย

ในส่วนของการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่ม เป็นย่านการทำงานที่สามารถใช้ลดกำลังงานของวงจรถานซิสเตอร์ที่มีโครงสร้างแบบ MOS ได้ โดยมีการประยุกต์ใช้ในการทำงานของวงจรรักษาความถี่ก่อน การใช้งานทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่ม มีชื่อเรียกช่วงการทำงานนี้ว่า สับเทรชโฮล (Subthreshold) หรือ วิกอินเวอร์ชัน (Weak inversion) โดยการทำงานในช่วงนี้มีลักษณะการทำงานที่แตกต่างไปจากการใช้งานทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ตามปกติในช่วงเหนือแรงดันขั้วเริ่ม (Above threshold หรือ Strong inversion) เพราะผลของช่องทางเดินกระแสที่มีความหนาแน่นของประจุเหนี่ยวนำไม่มากพอ จึงทำให้สนามไฟฟ้าจากขั้วเดรน (Drain) และ ซอร์ส (Source) ไม่สามารถเร่งประจุให้ข้ามช่องทางเดินกระแสได้ด้วยแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเรียกว่า การครีฟท์ (drift) ได้ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในการทำงานย่านนี้มีค่าน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสที่นอกเหนือไปจากกระแสรั่ว (leakage current) ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของประจุพาหะในแต่ละบริเวณของช่องทางเดินกระแสไม่เท่ากันเรียกว่า การดิฟฟิวชัน (diffusion)

ด้วยการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มจะเป็นผลทำให้สามารถลดระดับแรงดันในจุดทำงานได้ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ซึ่งในการทำงานปกติแล้วแรงดันไฟฟ้าค่านี้ถือว่าเป็นค่าแรงดันต่ำสุดที่ ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS จะสามารถนำกระแสได้ และกระแสตรงของการทำงานในย่านนี้จะมีค่าน้อยลงมากโดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-9} A ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานคือ ผลคูณระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลงเป็นอย่างมากตามไปด้วย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยเรื่องนี้จะมุ่งศึกษาการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS เปรียบเทียบกับทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม โดยศึกษาในประเด็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน, การกำหนดขอบเขตของการปฏิบัติการ, ความชันในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม¹, และผลการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS



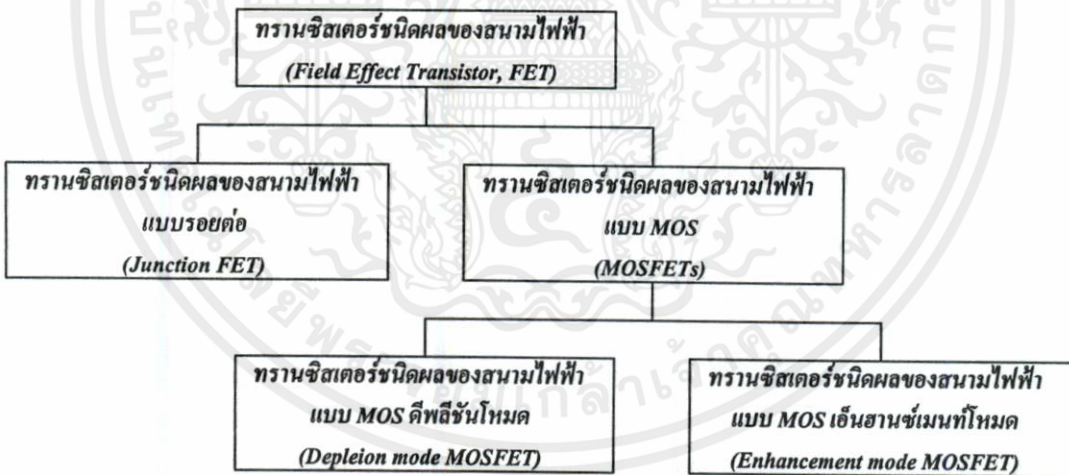
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ ค่าความชันในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม คือ ค่าที่บอกถึงแรงดันเกณฑ์เปลี่ยนแปลงที่ทำให้กระแสไฟฟ้า
ตรงเปลี่ยนแปลงไป 10 เท่า

บทที่ 2

ทรานซิสเตอร์แบบ MOS และทฤษฎีการนำไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์เป็นชื่อเรียกอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ในช่วงศตวรรษที่ 20 ได้มีการศึกษาและพัฒนาทรานซิสเตอร์หลากหลายรูปแบบเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Junction Transistor, BJT) และ ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistor, FET)¹ โดยมีความแตกต่างกันในส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ของประจุ ทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์มีหลักการการทำงานที่ใช้ปริมาณกระแสอินพุตควบคุมการไหลของประจุไฟฟ้า ส่วนทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าจะใช้ความเข้มของสนามไฟฟ้าควบคุมการไหลของประจุไฟฟ้า โครงสร้างที่ใช้สนามไฟฟ้าควบคุมการเคลื่อนที่ของประจุไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้กระแสอินพุตในการทำงาน ดังนั้น ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จึงมีความต้านทานไฟฟ้าอินพุตสูงกว่าทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์เป็นอย่างมาก

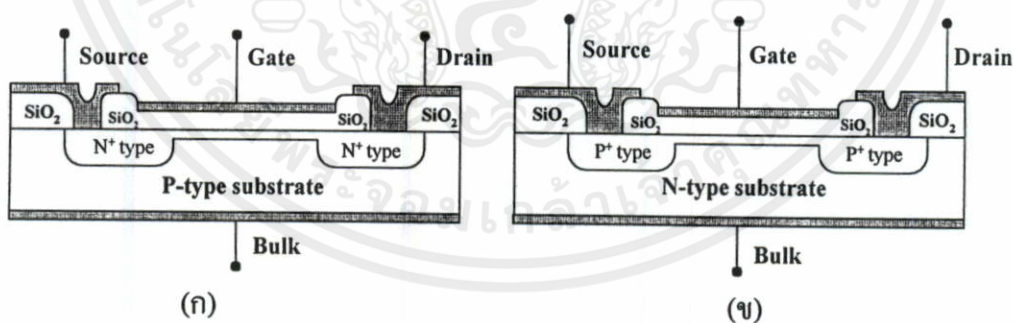


รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงการแบ่งกลุ่มทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าเป็นทรานซิสเตอร์กลุ่มใหญ่ที่สามารถแบ่งแยกย่อยตามโครงสร้างที่แตกต่างกันได้อีก 2 ชนิด คือ ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบรอยต่อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ บางครั้งอาจเรียกว่า ยูนิโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Unipolar Transistor) เนื่องจากทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะใช้ประจุไฟฟ้าข้างมากในการนำกระแสเพียงชนิดเดียว ซึ่งอาจจะเป็นอิเล็กตรอน (electron) หรือ โฮล (hole) ก็ได้

(Junction Field-Effect Transistor, JFET) และทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)¹ ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบรอยต่อจะใช้สนามไฟฟ้าควบคุมการหดและขยายตัวของชั้นดีพลีชัน (Depletion Layer) จากรอยต่อ P-N ที่บริเวณช่องทางเดินกระแสเพื่อทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าภายในช่องทางเดินกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเดินกระแสจะเปลี่ยนแปลงแบบแปรผกผันกับการหดและการขยายตัวของชั้นดีพลีชัน สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ได้จากการไบแอสแรงดันย้อนกลับ (Reverse Bias) รอยต่อ P-N ระหว่างช่องทางเดินกระแสและขาคควบคุม ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าไบแอสก็จะทำให้สนามไฟฟ้าที่ช่องทางเดินกระแสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS นั้นมีโครงสร้างของส่วนควบคุมการไหลของประจุเป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างโลหะ-ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยผลของสนามไฟฟ้าในการดูดหรือผลักประจุพาหะภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นประจุพาหะอิสระในช่องทางเดินกระแสจึงทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ยังมีโครงสร้างที่แตกต่างกันได้อีก 2 รูปแบบ คือ ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสในโครงสร้าง เรียกว่า MOSFET ดีพลีชันโหมด (Depletion-mode MOSFET) และทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ที่เหนี่ยวนำช่องทางเดินกระแสภายหลัง เรียกว่า MOSFET เ็นฮานซ์เมนต์โหมด (Enhancement-mode MOSFET)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ดีพลีชัน โหมด

(ก) ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ดีพลีชัน โหมด N-channel

(ข) ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS ดีพลีชัน โหมด P-channel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มีอีกชื่อหนึ่งที่นิยมเรียกน้อยกว่าว่า ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบชั้นฉนวน (Insulated Gate field-effect transistor, IGFET) ซึ่งเป็นชื่อที่มาจากกรณีฉนวนกันระหว่างอิเล็กโทรดที่เกต และช่องทางเดินกระแส ซึ่งมักสร้างฉนวนขึ้นจากชั้นออกไซด์

การทำงานของ MOSFET คีพลีชัน โหมด นั้นสามารถทำงานได้ด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอสเพื่อเสริมและเพื่อหักล้างช่องทางเดินกระแส โดยการไบแอสแบบเสริมช่องทางเดินกระแสจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ถูกควบคุมไหลได้มากขึ้นเป็นการทำงานในลักษณะแบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ส่วนการไบแอสแบบหักล้างช่องทางเดินกระแสจะทำให้กระแสไฟฟ้าเป็นการทำงานในลักษณะคีพลีชัน ดังกราฟคุณสมบัติที่แสดงในรูป 2.3 การใช้งานทรานซิสเตอร์แบบ MOS คีพลีชัน โหมด เป็นสวิทช์ไฟฟ้านั้น โดยปกติแล้วจะเป็นสวิทช์แบบ normally on คือเมื่อไม่ป้อนแรงดันไบแอสจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ถูกควบคุมไหล แต่เมื่อป้อนแรงดันไบแอสจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลน้อยลงจนหยุดปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไบแอส การใช้งานในลักษณะนี้เป็นการใช้งานทรานซิสเตอร์ในโหมดคีพลีชันเพียงอย่างเดียว

TYPE	ELECTRICAL SYMBOL	OUTPUT CHARACTERISTIC	TRANSFER CHARACTERISTIC
N-CHANNEL ENHANCEMENT (NORMALLY OFF)			
N-CHANNEL DEPLETION (NORMALLY ON)			
P-CHANNEL ENHANCEMENT (NORMALLY OFF)			
P-CHANNEL DEPLETION (NORMALLY ON)			

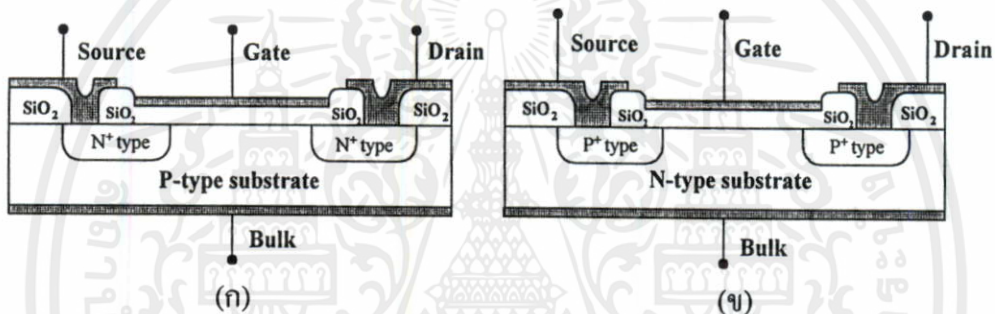
รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า, กราฟคุณสมบัติการส่งผ่าน, และ กราฟคุณสมบัติทางด้านเอ๊าท์พุทของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ทั้ง 4 โครงสร้าง[5]

ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์ โหมด นั้นสามารถทำงานในลักษณะเอ็นฮานซ์เมนต์ หรือการไบแอสแบบเสริมสร้างช่องทางเดินกระแสได้เท่านั้น การเพิ่มแรงดันไบแอสจะทำให้ประจุพาหะเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ลักษณะการนำทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ไปประยุกต์เป็นสวิทช์ไฟฟ้านั้นจะใช้เป็นสวิทช์แบบ normally off กล่าวคือเมื่อไม่ป้อนแรงดันไบแอสจะทำให้กระแสที่ถูกควบคุมไม่ไหล แต่เมื่อป้อนแรงดันไบแอสมากขึ้นจะทำให้กระแสไหลได้มากขึ้นตามขนาดของแรงดันไบแอสที่ป้อนให้ ซึ่งการทำงานโดยละเอียดจะแสดงในหัวข้อถัดไป

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาเฉพาะทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์ ดังนั้นรายละเอียดและนิยามภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นรายละเอียดและนิยามของ MOSFET แบบเอ็นฮานซ์เมนต์ ยกเว้นระบุไว้เป็นอย่างอื่นเฉพาะภายในตอนนั้นๆ และเพื่อ

ความสะดวกในการอธิบายต่อไปหลังจากนี้จะใช้ชื่อ ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในความหมายของ ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

เนื้อหาภายในบทนี้จะแสดงถึงโครงสร้างส่วนประกอบของทรานซิสเตอร์แบบ MOS และ ทฤษฎีการทำงานในรูปทั่วไปของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ซึ่งประกอบไปด้วย การไบแอสและ ลักษณะการสะสมประจุเมื่อเทียบกับขนาดศักย์ไฟฟ้าในผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ, การขยายตัวของชั้น ปลอดประจุพาหะภายใต้ช่องทางเดินกระแส, กลไกการนำไฟฟ้าและสมการกระแสในการทำงาน ช่วงแรงดันต่างๆ, และกราฟคุณสมบัติต่างๆของทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการวัดคุณสมบัติระหว่าง กระแส-แรงดัน (I-V characteristic) และคุณสมบัติระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V characteristic)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด

(ก) ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด N- channel

(ข) ทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้าแบบ MOS เอ็นฮานซ์เมนต์โหมด P- channel

2.1 โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มีโครงสร้างแบบ Planar กล่าวคือ เป็นโครงสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีการไหลของกระแสอยู่บนระนาบใดระนาบหนึ่งของแผ่นผลึก ซิลิคอน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แผ่นซิลิคอนระนาบ <100> ในกระบวนการสร้าง เนื่องจากเป็น ระนาบที่สามารถสร้างให้มีประจุไม่เคลื่อนที่ (fixed charge) บริเวณผิวรอยต่อระหว่างซิลิคอนและ ซิลิคอนไดออกไซด์น้อยกว่าระนาบอื่น[6] โดยโครงสร้างรูปแบบนี้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ งานกับสัญญาณขนาดเล็ก (small signal) การนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบ MOS จะเหมือนกัน กับทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้ารูปแบบอื่นคือ ใช้ประจุไฟฟ้าในการนำกระแสเพียงชนิด เดียว โดยระบุโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ตามชนิดของประจุพาหะที่ใช้ในการนำกระแส โครง สร้างที่ใช้โฮล (holes) เป็นพาหะในการนำกระแสเรียกว่า ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดิน กระแสพี (P-channel MOSFET) และโครงสร้างที่ใช้อิเล็กตรอน (electrons) ในการนำกระแสเรียก

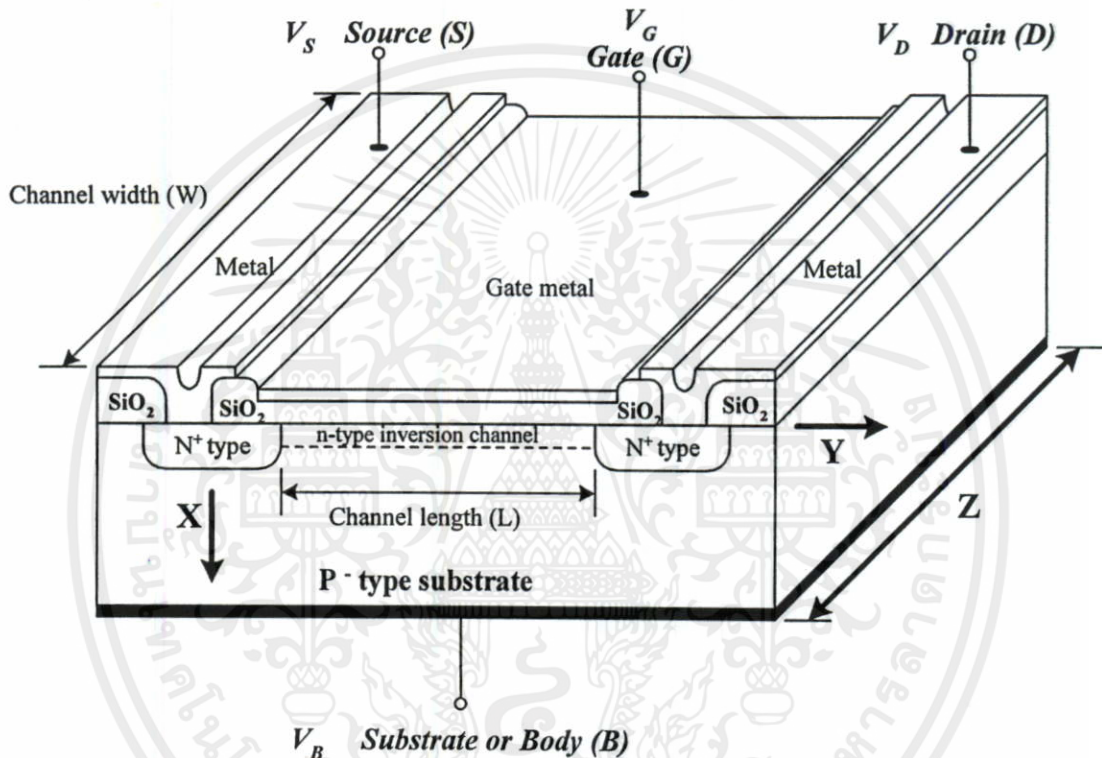
ว่าทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแสเอ็น (N-channel MOSFET) ส่วนประกอบโดยทั่วไปของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS จะประกอบไปด้วยส่วนการทำงานที่เชื่อมต่อกับภายนอก 4 ส่วนดังรูปที่ 2.5 ได้แก่

ฐานรอง (Substrate หรือ Bulk, B) เป็นแผ่นสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก (extrinsic semiconductors) มีหน้าที่รองรับส่วนต่างๆทั้งหมดของทรานซิสเตอร์ สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ MOS จะใช้ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่เป็นฐานรองตรงข้ามกับชนิดของช่องทางเดินกระแส เช่น ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสเอ็น จะใช้ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสพี จะใช้ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สัญลักษณ์ที่ใช้แทนแรงดันไฟฟ้าไบแอสให้กับฐานรองคือ V_B

เดรน และ ซอร์ส (Drain, D และ Source, S) เป็นส่วนของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดเป็นรอยต่อ P-N กับฐานรอง ดังนั้นชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่ในส่วนนี้จะเป็นชนิดตรงข้ามกับฐานรอง โครงสร้างทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปแล้วจะเติมอะตอมสารเจือปนในบริเวณนี้ให้มีความหนาแน่นสูงกว่าปกติ โดยมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือปนในช่วง 10^{18} cm^{-3} ถึง 10^{20} cm^{-3} ทำให้เกิดเป็นรอยต่อ N⁺-P สำหรับทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสเอ็น และเป็นรอยต่อ P⁺-N สำหรับทรานซิสเตอร์ที่มีช่องทางเดินกระแสพี เมื่อไบแอสแรงดันอย่างเหมาะสม รอยต่อทางด้านซอร์สจะทำหน้าที่จ่ายประจุเข้าสู่ช่องทางเดินกระแส (Forward bias) ส่วนรอยต่อทางด้านเดรนจะทำหน้าที่ในการรวบรวมประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านทางช่องทางเดินกระแสออกสู่ภายนอก (Reverse bias) จากที่ได้อธิบายผ่านมาจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของซอร์สและเดรนจะเหมือนกัน ทำให้ทรานซิสเตอร์สมมาตรแบบครึ่งซีก โดยสามารถใช้ซอร์สและเดรนทำงานแทนกันได้ ในการใช้งานจริงบ่อยครั้งมีการเชื่อมต่อระหว่างซอร์สและฐานรองเข้าด้วยกันจึงทำให้ไม่สามารถใช้ปลายด้านซอร์สและเดรนสลับกันได้ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ จะสามารถพิจารณาการทำงานของทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ 3 ปลายแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับปลายด้านซอร์สจะใช้สัญลักษณ์ V_S ส่วนแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับปลายด้านเดรนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย V_D

เกต (Gate, G) เป็นส่วนบนสุดของโครงสร้างอาจจะทำมาจากโลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่ผ่านการเติมอะตอมสารเจือปนความหนาแน่นสูงมาก มีลักษณะเป็นแผ่นวางอยู่บนช่องทางเดินกระแสโดยมีชั้นออกไซด์บางกั้นระหว่างกลาง เกตมีหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในช่องทางเดินกระแส การทำงานของเกตจะเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน คือ เมื่อไบแอสแรงดันระหว่างเกตกับฐานรองจะทำให้มีประจุพาหะจำนวนหนึ่งเคลื่อนที่เข้าไปสะสมอยู่ในเกตเพราะว่าประจุเหล่านี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นออกไซด์ไปได้ ประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่นั้นจะทำหน้าที่ดึงประจุชนิดตรงข้าม และผลักประจุชนิดเดียวกันในสารกึ่งตัวนำด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า จึงทำให้เกิดชั้นประจุสะสมเป็นช่องทางเดินกระแสที่มีจำนวนประจุเท่ากับจำนวนที่สะสมอยู่บนเกต เพียงแต่เป็นประจุชนิดตรงข้าม ดังนั้นถ้าทำการไบแอสแรงดันด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม จะทำให้

บริเวณช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์มีความต้านทานระหว่างแคโรน-ซอร์สต่ำมาก เช่น ในกรณีทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแสเอ็น มีขั้วแคโรนและซอร์สเป็น N^+ การไบแอสที่ทำให้ประจุสะสมบริเวณช่องทางเดินกระแสเป็นอิเล็กตรอนจะให้ความต้านทานระหว่างแคโรน-ซอร์สมีค่าลดลงเนื่องจากที่ช่องทางเดินกระแสกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การที่ความต้านทานจะลดลงมากเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่บริเวณช่องทางเดินกระแสที่เป็นผลมาจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนระหว่างเกตและฐานรอนนั่นเอง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนแรงดันที่ป้อนให้กับเกตคือ V_G



รูปที่ 2.5 ภาพ 3 มิติของทรานซิสเตอร์แบบ MOS เอ็นฐานซึ้เมนต์ที่โหมค ช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็น

จากหลักการทํางานเบื้องต้นของทรานซิสเตอร์แบบ MOS พอที่จะแยกพิจารณาการทํางานออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ผลการทํางานเนื่องจากสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Field, สนามไฟฟ้าในแนวแกน-X) และผลการทํางานเนื่องจากสนามไฟฟ้าตามยาว (Longitudinal Field, สนามไฟฟ้าในแนวแกน-Y) ผลของสนามไฟฟ้าตามขวางจะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงภายในช่องทางเดินกระแส โดยการดึงดูดและผลักประจุพาหะที่บริเวณผิวสารกึ่งตัวนำทำให้สถานะทางไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำมีความเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะเป็นผลส่งต่อไปยังการนำกระแสของทรานซิสเตอร์อีกทอดหนึ่ง ส่วนผลของสนามไฟฟ้าตามยาวจะทำให้เกิดการไบแอสรอยต่อ P-N ในโครงสร้างของทรานซิสเตอร์เป็นผลให้ MOSFET มีช่วงการทํางานที่แตกต่างไปตามค่าแรงดันที่ไบแอส รายละเอียดของปรากฏการณ์เนื่องจากสนามไฟฟ้าตามขวางจะแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 2.2 และรายละเอียดของปรากฏการณ์เนื่องจากสนามไฟฟ้าตามยาวจะแสดงในหัวข้อที่ 2.3 อย่างไรก็ตามวิธี

การใช้พิจารณาผลการทำงานของสนามไฟฟ้าทั้งสองส่วนแยกออกจากกันได้อย่างเด็ดขาดนั้นสามารถใช้อธิบายได้เฉพาะกับทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดช่องทางเดินกระแสยาวเท่านั้น(long channel MOSFET) โดยรายละเอียดของทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดช่องทางเดินกระแสยาวจะแสดงไว้ในหัวข้อ 2.3.1

ตารางที่ 2.1 แรงดันไฟฟ้าไบแอส และทิศทางของกระแสสำหรับทรานซิสเตอร์ผลของสนามไฟฟ้า

	N-channel	P-channel
JFETs (JEDEC : type A FETs)		
Drain-source voltage, V_{DS}	+	-
Drain current, I_D	+	-
Gate-source voltage, V_{GS} (For normal depletion-mode operation)	-	+
Pinch-off voltage, V_P or $V_{GS(off)}$	- ¹	+ ¹
Depletion-type MOSFETs (JEDEC : type B FETs)		
Drain-source voltage, V_{DS}	+	-
Drain current, I_D	+	-
Gate-source voltage, V_{GS}	- ² or + ³	+ ² or - ³
Pinch-off voltage, V_P or $V_{GS(off)}$	- ¹	+ ¹
Enhancement-type MOSFETs (JEDEC : type C FETs)		
Drain-source voltage, V_{DS}	+	-
Drain current, I_D	+	-
Gate-source voltage, V_{GS}	+ ⁴	- ⁴
Pinch-off voltage, V_{th}	+ ⁵	- ⁵

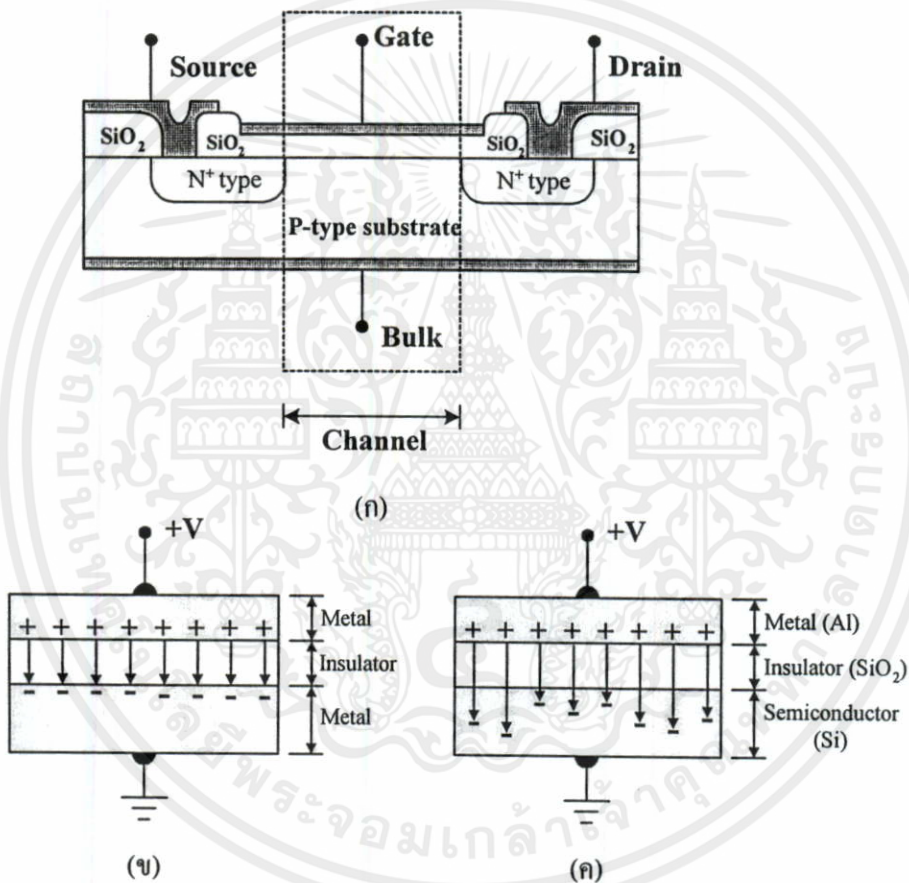
1. Gate-source cut-off voltage
2. Depletion-mode operation
3. Enhancement-mode operation
4. Enhancement-mode only
5. V_{GS} to establish channel (turn MOST on)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
JEDEC : Joint Electron Device Engineering Council

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปรากฏการณ์ในช่องทางเดินกระแส

สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ MOS แล้วช่องทางเดินกระแส(channel) ถือเป็นส่วนที่มีบทบาทสำคัญที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถขยายสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า โครงสร้างของช่องทางเดินกระแส นั้นสร้างขึ้นจากการเชื่อมต่อกันของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกัน 3 ชนิดได้แก่ โลหะ, ฉนวน, และ สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก)



รูปที่ 2.6 ช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

(ก) ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสภายในทรานซิสเตอร์แบบ MOS

(ข) ตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะคู่ขนาน (Parallel plate capacitor)

(ค) ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS¹ (MOS Capacitor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS มีอีกชื่อหนึ่งว่า ไดโอด โครงสร้าง MOS (MOS diode) แต่เนื่องจากไม่สามารถทำหน้าที่เรียงสัญญาณ (rectified) ได้เช่นเดียวกับไดโอดปกติ การเรียกเป็นตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS จึงสื่อถึงการทำงานของตัวอุปกรณ์ได้ดีกว่า

เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนช่องทางเดินกระแสโดยไม่มีผลของการไบแอสของสนามไฟฟ้า (ซอร์ส-เดรน) ในแนวแกน y มาเกี่ยวข้อง สามารถเทียบเคียงการทำงานของโครงสร้างนี้ได้กับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน โดยมีความแตกต่างตรงที่ตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะคู่ขนานจะมีความหนาของบริเวณสะสมประจุเพียง 2-3 ชั้นของการเรียงตัวของอะตอม ซึ่งต่างไปจากตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีความหนาของบริเวณสะสมประจุในเนื้อสารกึ่งตัวนำมากกว่า โดยเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าบางส่วนสามารถทะลุเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำได้ลึกกว่าในโลหะ ด้วยโครงสร้างที่มีฉนวนกั้นกลางของประจุโครงสร้าง MOS จึงทำให้ไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถไหลผ่านชั้นฉนวนเข้าไปมาระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำได้¹ ชั้นประจุสะสมในสารกึ่งตัวนำจึงอยู่ในสภาวะสมดุลอุณหภูมิตั้งแต่ (thermal equilibrium) : $n \cdot p = n_i^2$ และระดับเฟอร์มี (Fermi level) มีค่าคงที่ตลอดความยาวของชั้นประจุสะสม²[7] การอธิบายในส่วนนี้จะใช้แผนภาพแถบพลังงานประกอบการอธิบายโดยเงื่อนไขที่ทำการพิจารณาจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าไบแอส, ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง, และการตอบสนองของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS กับสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

2.2.1 ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าไบแอส

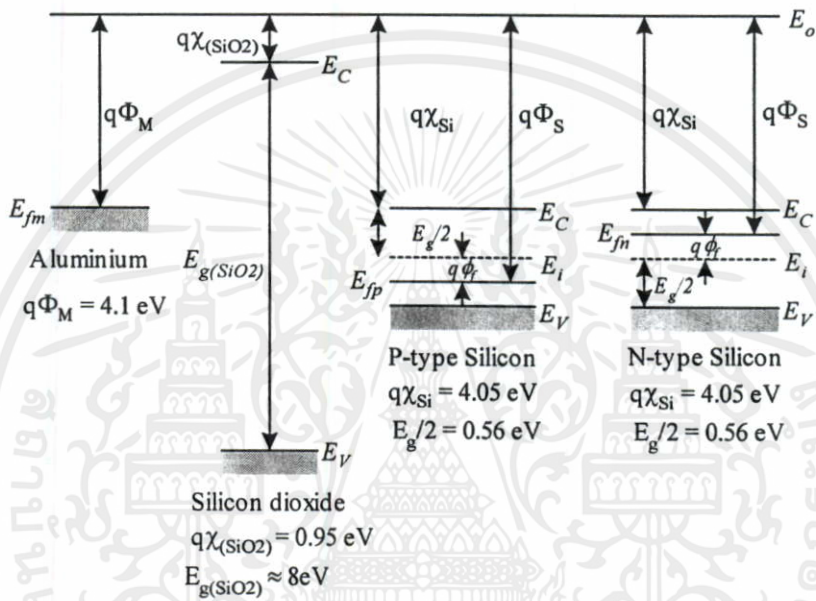
วัสดุที่นำมาสร้างเป็นตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้อะลูมิเนียม (Aluminum, Al) เป็นส่วนโลหะ, ฉนวนสร้างขึ้นจากซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO₂) และสารกึ่งตัวนำสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิคอน (Silicon, Si) สภาวะแถบพลังงานของวัสดุทั้งหมดเมื่อยังไม่เชื่อมต่อกันนั้นจะมีระดับพลังงานต่างๆเป็นอิสระตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆ ดังแสดงในรูป 2.7

อะลูมิเนียมเป็นธาตุหมู่ III ในตารางธาตุมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นโลหะ การจัดเรียงตัวของอะตอมโลหะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้โดยตลอดในเนื้อวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ของตัวนำจะเหลื่อมซ้อนกัน จากรูปที่ 2.7 (ก) จะเห็นได้ว่าพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนในอะลูมิเนียมหลุดเป็นอิสระได้นั้นเท่ากับ 4.1 eV ซึ่งเท่ากับค่าฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียมนั่นเอง

¹ ในหัวข้อ 2.3 จะพิจารณาตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในชั้นสะสมประจุ โดยเป็นผลเนื่องมาจากการไบแอสสนามไฟฟ้าในแนว y ผ่านทางช่องทางเดินกระแสให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ ซึ่งในสภาวะนี้ ชั้นประจุสะสมในสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในสภาวะไม่สมดุล (non-equilibrium case)

² โครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor structure) อาจไม่อยู่ในสภาวะสมดุลอุณหภูมิตั้งแต่ โดยอาจมีสาเหตุมาจากสัญญาณไบแอสที่ป้อนให้กับโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด หรือความไม่สมบูรณ์ของชั้นฉนวนทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งทั้งสองสาเหตุนี้อาจพบได้ในสภาวะการทำงานจริง แต่จะไม่พิจารณาผลกระทบในวิทยานิพนธ์นี้

ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน การจัดเรียงตัวไม่เป็นโครงผลึก คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดออกไซด์เป็นฉนวน ถึงแม้ว่าชั้นคอนดักชันของซิลิคอนไดออกไซด์จะอยู่ใกล้กับระดับพลังงานอิสระก็ตาม (ประมาณ 0.95 eV) แต่การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้ไปครอบครองสถานะพลังงานยังแถบคอนดักชันทำได้ลำบากเนื่องจากมีแถบหวงห้ามขนาดกว้างกั้นอยู่ (ประมาณ 8 eV) โดยที่พลังงานเนื่องจากอุณหภูมิมีค่าเพียง 0.026 eV ที่ 300 K



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของวัสดุชนิดต่างๆที่นำมาสร้างเป็นตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ในสถานะที่เป็นอิสระต่อกัน

ซิลิคอนเป็นธาตุในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอนที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์เป็นซิลิคอนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีความบริสุทธิ์สูง แถบหวงห้าม (Forbidden band) ของซิลิคอนมีค่าประมาณ 1.12 eV ซิลิคอนที่นำมาประกบเข้ากับชั้นออกไซด์ในโครงสร้างของ MOS นั้นเป็นสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก ซึ่งอาจจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็ได้ ซิลิคอนที่เติมอะตอมสารเจือด้วยธาตุหมู่ III จะทำให้กลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยมีประจุพาหะข้างมาก (majority carriers) เป็นโฮล และมีประจุพาหะข้างน้อย (minority carriers) เป็นอิเล็กตรอน ประจุพาหะข้างมากมีความหนาแน่นเท่ากับความหนาแน่นอะตอมสารเจือโดยประมาณ ซึ่งพิจารณาโดยใช้เงื่อนไขที่ว่าอุณหภูมิทำงานปกติสามารถไอออนไนซ์อะตอมสารเจือได้ทั้งหมด พลังงานที่ใช้สำหรับไอออนไนซ์อะตอมสารเจือให้เกิดเป็นประจุพาหะข้างมากนั้นมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่เป็นสารเจือ อย่างไรก็ตามระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุอะตอมสารเจือเป็นหลัก แต่ขึ้นอยู่กับ

กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ การเติมอะตอมธาตุหมู่ III ในปริมาณมากขึ้นก็จะทำให้ประจุพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องไปยังระดับเฟอร์มิทำให้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (E_{Fp}) เคลื่อนที่เข้าใกล้กับขอบของแถบวาเลนซ์มากขึ้น ในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะใช้ธาตุหมู่ที่ V เป็นอะตอมสารเจือ เมื่อเกิดการไอออนไนซ์แล้วจะทำให้มีประจุพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนและมีประจุพาหะข้างน้อยเป็นโฮล การเพิ่มความหนาแน่นของอะตอมสารเจือหมู่ V ให้สูงขึ้นจะมีผลต่อระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (E_{Fn}) ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเข้าใกล้ขอบของแถบคอนดักชันมากขึ้น

เมื่อทำการสร้างวัสดุทั้งสามเชื่อมต่อกันวัสดุแต่ละชนิดจะพยายามปรับตัวเข้าสู่จุดสมดุลด้วยการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากวัสดุที่ให้อิเล็กตรอนได้ง่าย (มีฟังก์ชันงานต่ำ) ไปยังวัสดุที่ให้อิเล็กตรอนได้ยากกว่า (มีฟังก์ชันงานสูง) กระแสศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการถ่ายเทของประจุที่มีค่าเท่ากับผลต่างของฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_{MS}) จึงจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง

$$\phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_S \quad (2.1)$$

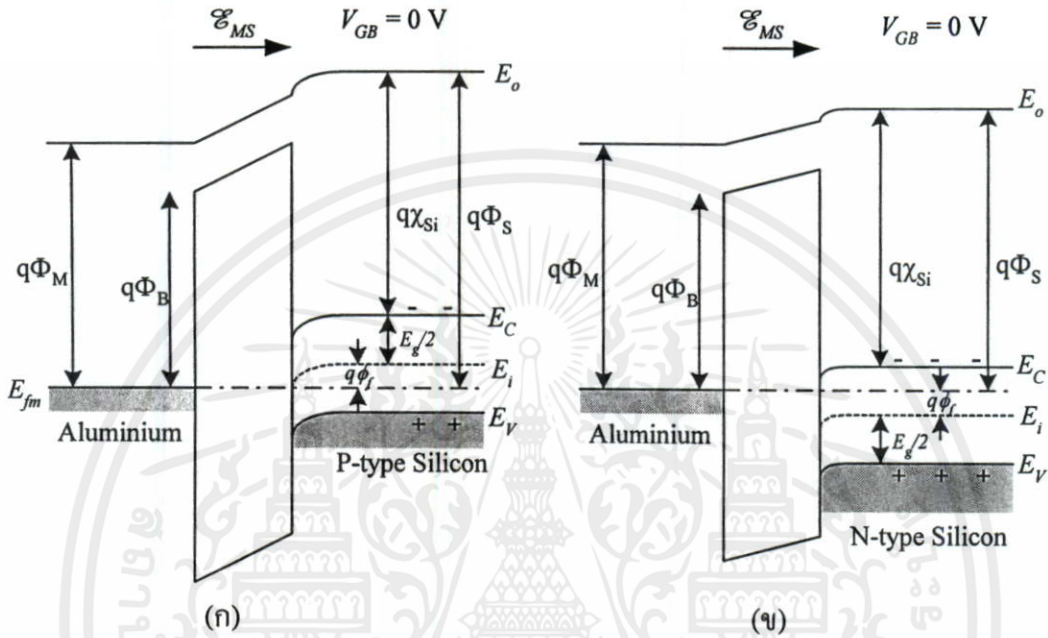
$$\phi_{MS} = \Phi_M - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - |\phi_f| \right) \quad (\text{N-type semiconductor})$$

$$\phi_{MS} = \Phi_M - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + |\phi_f| \right) \quad (\text{P-type semiconductor})$$

ระบบที่สมดุลสามารถสังเกตได้จากระดับเฟอร์มิของระบบเท่ากันโดยตลอดทั้งระบบ หมายความว่า การถ่ายเทประจุสุทธิของระบบเป็นศูนย์ จากรูปที่ 2.7 จะพบว่าระดับพลังงานในวัสดุทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกันไป อะลูมิเนียมมีฟังก์ชันงาน (work function¹) น้อยกว่าซิลิคอน เมื่อวัสดุทั้งสอง

¹ ฟังก์ชันงาน (work function) ของวัสดุที่เป็นโครงสร้างผลึก หมายถึงปริมาณพลังงานที่ใช้เคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนออกจากวัสดุจนเป็นอิสระ ในกรณีของโลหะอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนย้ายได้คืออิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงสุด จึงอาจกล่าวได้อีกรูปแบบหนึ่งว่าฟังก์ชันงานคือพลังงานที่ใช้สำหรับย้ายอิเล็กตรอนจากระดับเฟอร์มิไปเป็นอิสระ (ในหนังสือบางเล่มอาจใช้คำว่าระยะอนันต์ หรือระดับว่างเปล่าแทนคำว่าอิสระ) แต่ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแล้วที่ระดับเฟอร์มิไม่มีสถานะพลังงานที่อิเล็กตรอนจะอยู่ได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่อะตอมในโครงสร้างผลึกอยู่ใกล้กันจนทำให้เกิดเป็นแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์สามารถกระตุ้นให้ไปครอบครองระดับพลังงานที่สูงกว่าได้ด้วยพลังงานจากภายนอก เช่น อุณหภูมิ ดังนั้นตำแหน่งที่มีความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนเป็น $1/2$ (ระดับเฟอร์มิ) จึงอยู่ระหว่างขอบของแถบพลังงานทั้งสองซึ่งเป็นบริเวณแถบหวงห้ามพอดี

เชื่อมต่อกันจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากอะลูมิเนียมไปยังซิลิคอน อิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายเทไปจะสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอนเนื่องจากถูกดึงดูดด้วยศักย์ไฟฟ้าในโครงสร้างนั่นเอง การสะสมของอิเล็กตรอนในบริเวณผิวหน้าของซิลิคอนจะทำให้แถบพลังงานในบริเวณนั้นเกิดการโค้งงอแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพแถบพลังงานของการเชื่อมต่อกันระหว่างอะลูมิเนียม-ซิลิคอนไดออกไซด์-ซิลิคอน เมื่อไม่มีการไบแอสแรงดันไฟฟ้า

- (ก) ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- (ข) ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เป็นที่น่าสังเกตว่าในสภาวะสมดุลอุณหภูมิโครงสร้างที่ใช้ซิลิคอนชนิดพี จะมีแถบพลังงานที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำโค้งลงเสมอ แต่โครงสร้างที่ใช้ซิลิคอนชนิดเอ็น นั้นอาจจะมีแถบพลังงานโค้งขึ้นหรือโค้งลงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับเฟอร์มิซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นอะตอมสารเจือ จากการคำนวณพบว่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ที่ทำให้ฟังก์ชันงานของซิลิคอนชนิดเอ็นเท่ากับฟังก์ชันงานของอะลูมิเนียม มีค่าเท่ากับ 5.509×10^{18} อะตอม/cm³ (เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 300 K และอะตอมสารเจือไอออนไนซ์ทั้งหมด) อยู่ในช่วงสารกึ่งตัวนำที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า นอกจากนี้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำยังเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ดังนั้นในกรณีไม่ว่ากรณีใดทั้งนี้ขอสงวนสิทธิ์ในความคิดเห็นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ทรงสิทธิ์ในการนำไปใช้ของของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจึงนิยมใช้ค่าอิเล็กตรอนอффินิตี (electron affinity) เป็นค่าที่วัดจากระดับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากขอบล่างของแถบนำไฟฟ้าไปจนถึงระดับอิสระ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนในเนื้อวัสดุแทน (ในกรณีของโลหะจะมีค่าอิเล็กตรอนอффินิตีเท่ากับฟังก์ชันงาน)

หนาแน่นอะตอมสารเจือสูง (10^{18} cm^{-3} ถึง 10^{20} cm^{-3}) การที่ผิวหน้าของซิลิคอนจะโค้งขึ้นจะต้องแพร่อะตอมสารเจือให้มีความหนาแน่นสูงกว่าค่านี้ หรือเปลี่ยนชนิดของโลหะให้มีฟังก์ชันงานมากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีความหนาแน่นการโคปอะตอมสารเจือในระดับปกติเป็นฐานรอง (10^{16} cm^{-3} ถึง 10^{18} cm^{-3}) จึงทำให้สถานะที่ไม่ไบแอสแรงดันแถบพลังงานที่ผิวหน้าของซิลิคอนจะเกิดการโค้งลง

กระบวนการถ่ายเทประจุภายในโครงสร้าง MOS ที่มีฟังก์ชันงานของโลหะต่ำกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดการสะสมของประจุบวกเป็นแผ่นบางๆที่ชั้นโลหะ และการสะสมประจุลบเนื่องจากการไอออนไนซ์ของอะตอมสารเจือในบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแยกพิจารณาพลังงานเนื่องจากผลของแรงดันโครงสร้าง (Build-in voltage) ได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกตกคร่อมชั้นออกไซด์ และอีกส่วนหนึ่งตกคร่อมชั้น Space-charge region ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ การพิจารณาว่าประจุจากโลหะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นออกไซด์ไปสะสมยังสารกึ่งตัวนำอาจจะไม่สมเหตุผลเนื่องจากชั้นออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวน แม้ว่าฉนวนในความเป็นจริงสามารถนำกระแสได้บ้างแต่การที่ระบบจะเข้าสู่สมดุลอุณหภูมิด้วยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านชั้นออกไซด์จะต้องใช้เวลานานมาก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการนำอุปกรณ์ไปใช้งานนั้นจะต้องต่อวงจรให้ครบรูป (Loop) จึงเป็นผลทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากโลหะไปยังซิลิคอนโดยใช้เส้นทางอื่นได้ เช่น การเคลื่อนที่อ้อมผ่านทางด้านหลังของแผ่นซิลิคอน หรือในกรณีโครงสร้าง MOSFET บริเวณเกรน-ซอร์ส ก็สามารถทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนเข้าสู่ช่องทางเดินกระแสได้เช่นเดียวกัน

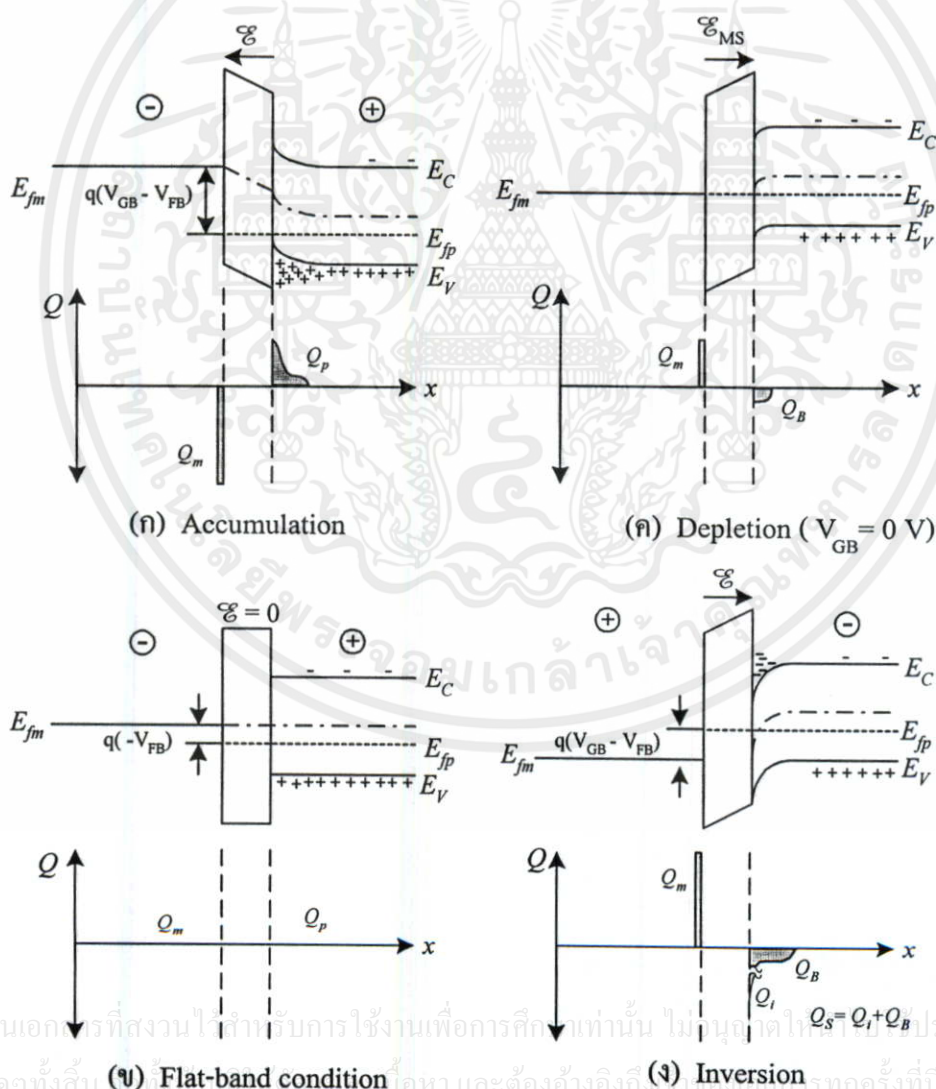
ตารางที่ 2.2 ย่านการทำงานของศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในตัวเก็บประจุ MOS

ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว (surface potential, ϕ_s)	ย่านการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS
$\phi_s < 0$	ย่านแอคคิวมูเลชัน (accumulation of holes)
$\phi_s = 0$	สถานะแถบพลังงานแบนราบ (flat-band condition)
$\phi_f > \phi_s > 0$	ย่านดีพลีชัน (depletion of holes)
$2\phi_f > \phi_s > \phi_f$	ย่านวีกอินเวอร์ชัน (weak inversion)
$\phi_s > 2\phi_f$	ย่านสตรองอินเวอร์ชัน (strong inversion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ภายใต้สภาวะไบแอสแรงดัน

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไบแอสให้กับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ไม่ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้เกาจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ตามระดับเฟอร์มิของระบบก็จะคงที่โดยตลอดสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้[7] ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากวัสดุที่เชื่อมต่อกันจะปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะสมดุลเสมอ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวหน้า (surface potential) ของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยสามารถแบ่งช่วงการทำงานของไดโอดโครงสร้าง MOS ที่มีช่วงการทำงานขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำได้ 5 ย่านการทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และเพื่อให้สะดวกแก่การอธิบายจะใช้ไดโอดโครงสร้าง MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นตัวอย่างประกอบการอธิบาย และเริ่มอธิบายจากย่านการทำงานที่มีแรงดันเกตต่ำที่สุดแล้วจึงค่อยๆเพิ่มแรงดัน ไบแอสที่เกตให้สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักหอสมุดกลางพระจอมเกล้าลาดกระบัง

รูปที่ 2.9 แผนภาพแถบพลังงานและการสะสมประจุของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพี

ย่านแอกคิวเมชัน (Accumulation)

เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วเกตมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าฐานรองจะทำให้เกิดเป็นความต่างศักย์คร่อมชั้นฉนวน ผลต่างของศักย์ไฟฟ้านี้จะดึงดูดประจุให้มาสะสมอยู่ที่สองด้านของชั้นฉนวน ในส่วนที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะสะสมโฮล และในส่วนของโลหะจะสะสมอิเล็กตรอน ซึ่งมีการกระจายตัวของประจุดังแสดงในรูปที่ 2.9(ก) ประจุที่สะสมในโลหะจะอยู่เฉพาะที่ผิวหน้าเท่านั้น เพราะว่าภายในเนื้อของตัวนำสมบรูณ์จะไม่มีสนามไฟฟ้า แต่ในสารกึ่งตัวนำประจุจะกระจายตัวจากผิวหน้าลงไปใต้ลึกในระดับหนึ่ง จากสมการ Poisson กล่าวไว้ว่า การกระจายตัวของประจุสุทธิจะขึ้นอยู่กับขนาดของศักย์ไฟฟ้า (ϕ) ในแต่ละส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปในผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ที่บริเวณชั้นสะสมประจุความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะข้างมากจะมีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นของโฮลในฐานรองภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมิต่ำ (มากกว่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ, N_A) จึงทำให้ $E_F - E_V$ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ระดับเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าคงที่ตลอดดังได้แสดงในรูป แต่แถบพลังงานในบริเวณชั้นสะสมประจุจะโค้งงอขึ้น ทำให้กล่าวได้ว่าผิวหน้าสารกึ่งตัวนำในบริเวณสะสมประจุจะประพฤติตัวเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่เติมอะตอมสารเจือผู้รับในปริมาณมาก

สภาวะแถบพลังงานแบนราบ (Flat-band condition)

เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสให้สูงขึ้นต่อจากจากการทำงานในย่านแอกคิวเมชัน จะทำให้ความต่างศักย์คร่อมชั้นฉนวนมีค่าน้อยลงจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสให้มีความเท่ากับแรงดันแถบพลังงานแบนราบ (V_{FB}) พอดี

$$V_{FB} = (\Phi_M - \Phi_S) \quad (2.2)$$

ในสภาวะนี้จะไม่มีการสะสมอยู่ที่เกต และที่สารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานของระบบเป็นเส้นตรงโดยตลอดดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข) ซึ่งหมายความว่าทุกๆส่วนภายในเนื้อของสารกึ่งตัวนำจะมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอเป็นผลทำให้มีความเป็นกลางทางไฟฟ้าตลอดทั่วทั้งเนื้อสารกึ่งตัวนำ

ย่านดีพลีชัน (Depletion)

ทำการเพิ่มแรงดันไบแอสขั้วเกตให้มากขึ้นไปอีก จนเป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าภายในโครงสร้าง (ϕ_{MS}) เริ่มมีอิทธิพลมากกว่าแรงดันไฟฟ้าภายนอกที่ไบแอสให้จึงทำให้เกิดการสะสมของประจุเป็นโฮลที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่โฮลที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำไม่อาจไปตาม ϕ_{MS} ซึ่งเป็นสถานะเดียวกันกับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ไม่ได้ป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอส เนื่องจากโลหะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจึงทำการผลักโฮลที่เป็นประจุบวกให้ออกห่างจากบริเวณผิว

หน้าของสารกึ่งตัวนำเหลือทิ้งไว้เพียงอะตอมสารเจือผู้ให้ไอออนไนซ์ซึ่งเป็นประจุลบไม่เคลื่อนที่กระจายอยู่ทั่วเนื้อสารกึ่งตัวนำ บริเวณที่เป็นชั้นดีพลีชันจึงเป็นบริเวณที่ปราศจากโฮล (ประจุพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพี) ซึ่งเป็นที่มาของชื่อการทำงานในย่านนี้ เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสขั้วเกตจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่เกตมีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าในฐานรองก็จะทำให้ความกว้างของชั้นดีพลีชันขยายกว้างขึ้นดังแสดงในรูป 2.9(ค) ความกว้างของชั้นดีพลีชันที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการกระจายตัวของอะตอมผู้ให้ไอออนไนซ์ในสารกึ่งตัวนำ และแรงดันไฟฟ้าไบแอส ซึ่งความกว้างของชั้นดีพลีชันสามารถประมาณได้โดยพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์เป็น one-sided step junction โดยมีสมการเป็น

$$x_{dep} = \sqrt{\frac{2K_{Si} \epsilon_0 \phi_s}{qN_A}} \quad (2.3)$$

และสามารถใช้สมการ 2.3 หาความหนาแน่นประจุสะสมที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ (Q_s) ได้เป็น

$$Q_s = -qN_A x_{dep} = Q_B \quad (2.4)$$

เมื่อ Q_B หมายถึง ประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ในชั้นดีพลีชันซึ่งเป็นประจุที่ติดอยู่กับโครงผลึก (ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้) การลดลงของประจุพาหะในบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำทำให้ $E_i - E_f$ มีค่าลดลง จึงเป็นผลให้แถบพลังงาน โค้งลงดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค)

ย่านอินเวอร์ชัน (Inversion)

เมื่อเพิ่มแรงดันไบแอสขึ้นศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าก็จะสูงขึ้น ทำให้แถบพลังงานบริเวณผิวโค้งลงมากขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวมากพอที่จะทำให้ระดับเฟอร์มิอินทรีนิก (E_f) โค้งลงต่ำกว่าระดับเฟอร์มิของฐานรอง (E_i) ดังแสดงในรูป 2.9 (ง) ผิวหน้าที่บริเวณใกล้กับออกไซด์มาก ๆ มีค่า $E_i - E_f < 0$ จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากกว่าความหนาแน่นของโฮล เป็นผลให้สารกึ่งตัวนำชนิดพี กลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เรียกบริเวณที่มีสภาวะการทำงานนี้ว่าชั้นอินเวอร์ชัน (Inversion layer) การกลับชนิดของสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดตรงข้ามจึงสามารถ

พิจารณาโดยอาศัยเงื่อนไข $\phi_s > \phi_f$ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็แล้วแต่การเกิดชั้นอินเวอร์ชันสามารถพิจารณาโดยอาศัยหลักการที่ว่า ภายในเนื้อของสารกึ่ง

ตัวนำมีการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล อยู่ตลอดเวลาด้วยพลังงานจากอุณหภูมิ ภายใต้สภาวะสมดุล อุณหภูมิหนึ่ง ๆ คู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งเป็นประจุพาหะก็จะเคลื่อนที่อย่างไร้ระเบียบ และเมื่อการ

เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกับโฮลมาพบกันก็จะทำให้เกิดการรวมตัวของประจุหายไปทั้งคู่ ถ้าการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล อยู่ในชั้นดีพลีชัน ผลของสนามไฟฟ้าภายในจะดึงคู่ประจุทั้งสองให้แยกออกจากกันไปในทิศตรงข้าม เมื่อสนามมีค่าสูงพอที่จะดึงอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่มาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าติดกับออกไซด์ได้โดยไม่เกิดการรวมตัวกับโฮลที่ถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้เคลื่อนที่ไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำในทิศตรงข้ามกัน การสะสมของชั้นอิเล็กตรอนใกล้ๆกับออกไซด์นี้ทำให้เกิดเป็นประจุอินเวอร์ชัน (Q_i) ต่อพื้นที่ผิวรอยต่อ

การกระจายตัวของประจุในย่านอินเวอร์ชันที่แสดงอยู่ในรูป 2.9(ง) ประกอบไปด้วยประจุ 2 ชนิด ประจุส่วนใหญ่คือประจุในชั้นดีพลีชัน ($-qN_A x_{dep}$) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือไอออนไนซ์และเป็นประจุไม่เคลื่อนที่ ประจุอีกส่วนหนึ่งสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าติดกับออกไซด์ในชั้นสะสมประจุ อิเล็กตรอนที่สะสมจะทำให้ประจุบริเวณแคบ ๆ นั้นมีส่วนที่เพิ่มขึ้นมากกว่าค่าความหนาแน่นประจุดีพลีชัน ประจุในชั้นอินเวอร์ชันนี้สามารถเคลื่อนที่ได้เนื่องจากเป็นอิเล็กตรอนอิสระไม่ได้ติดอยู่กับโครงผลึก เพื่อให้เข้าใจการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ได้ดี พี่ระลึกไว้ว่าประจุในชั้นอินเวอร์ชันสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในชั้นอินเวอร์ชัน ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาชั้นอินเวอร์ชันเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้ามกับเนื้อภายในได้

ในขณะที่ $\phi_s - \phi_f$ มีค่าต่ำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชันจะมีค่าน้อยและค่าความนำไฟฟ้าก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสภาวะนี้จะมีนัยสำคัญน้อยกว่าความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อฐานรอง เรียกสภาวะการทำงานนี้ว่า วิคอินเวอร์ชัน (Weak Inversion) ถ้าทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าในแนว y ให้กับวัสดุ ประจุในชั้นอินเวอร์ชันจะเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการแพร่ประจุ(diffusion) มากกว่าการเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการเร่งเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากภายนอก(drift) ชั้นอินเวอร์ชันในสภาวะนี้สามารถพิจารณาได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีอะตอมสารเจือปริมาณน้อย

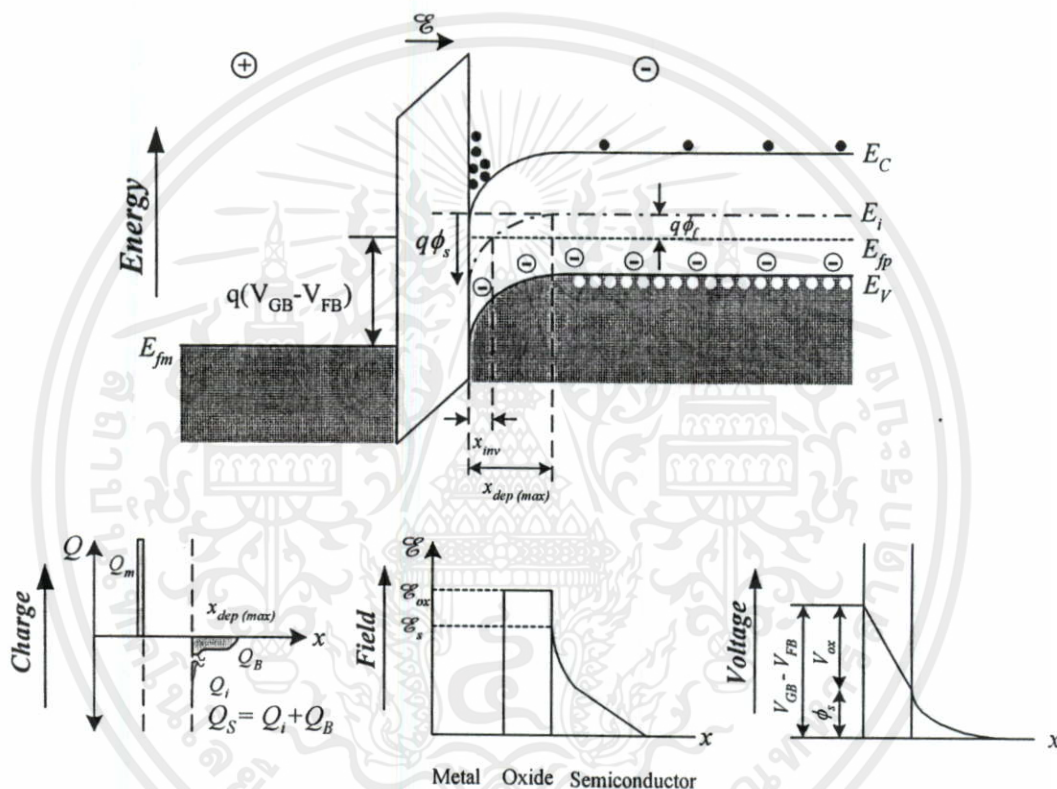
เมื่อเพิ่ม ϕ_s ให้สูงขึ้นจนกระทั่ง $\phi_s - \phi_f$ มีค่าประมาณ ϕ_f จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนพาหะที่ชั้นอินเวอร์ชันมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นโฮลในฐานรอง ค่าความนำไฟฟ้าของชั้นอินเวอร์ชันมีนัยสำคัญเทียบเคียงได้กับความนำไฟฟ้าในเนื้อสารกึ่งตัวนำ เรียกสภาวะผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่ทำงานในสภาวะนี้ว่า สตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion)

การไบแอสแรงดันเกตให้มีค่าสูงพอจะทำให้เกิดชั้นอินเวอร์ชันได้ออกไซด์ ชั้นอินเวอร์ชันนั้นจะทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแส โดยมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เชื่อมต่อจากแคโรนไปซอร์ส ทำให้ไม่มีโครงสร้างที่เป็นรอยต่อ P-N ต่อกลับหน้า-หลัง (back to back PN junction) ในบริเวณนี้ การป้อนสนามไฟฟ้าในแนว y จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลด้วยกระบวนการนำกระแสแบบเร่งด้วยสนาม(drift) มากกว่ากระบวนการนำกระแสแบบแพร่(diffusion) เงื่อนไขที่ใช้ในการกำหนดกลไกการนำไฟฟ้าแบบเร่งด้วยสนามคือ

$$\phi_s \geq 2\phi_f \quad (2.5)$$

หรืออาจจะเทียบด้วยค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสะสมในชั้นอินเวอร์ชัน และความหนาแน่นของโฮลในเนื้อสารซึ่งประมาณเท่ากับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ

$$n_p = n_i e^{q(\phi_s - \phi_f)/kT} \geq p_{p, bulk} = n_i e^{q\phi_f/kT} \approx N_A \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.10 พลังงาน, ประจุ, สนามไฟฟ้า, และแรงเคลื่อนไฟฟ้าในสภาวะอินเวอร์ชัน

การไบแอสแรงดันให้มีค่าสูงมากกว่าย่านสตรองอินเวอร์ชันจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 อย่าง คือ ความกว้างของชั้นดีพลีชันที่สะสมประจุเนื่องจากอะตอมสารเจือไอออนไนซ์จะเพิ่มขึ้นเป็นความสัมพันธ์กับ $\sqrt{\phi_s}$ และประจุสะสมจากอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชันจะเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลกับ ϕ_s ดังสมการ (2.6) การสะสมประจุในปริมาณที่มากขึ้นตามแรงดันไบแอสนั้นพอที่จะสรุปได้ดังนี้

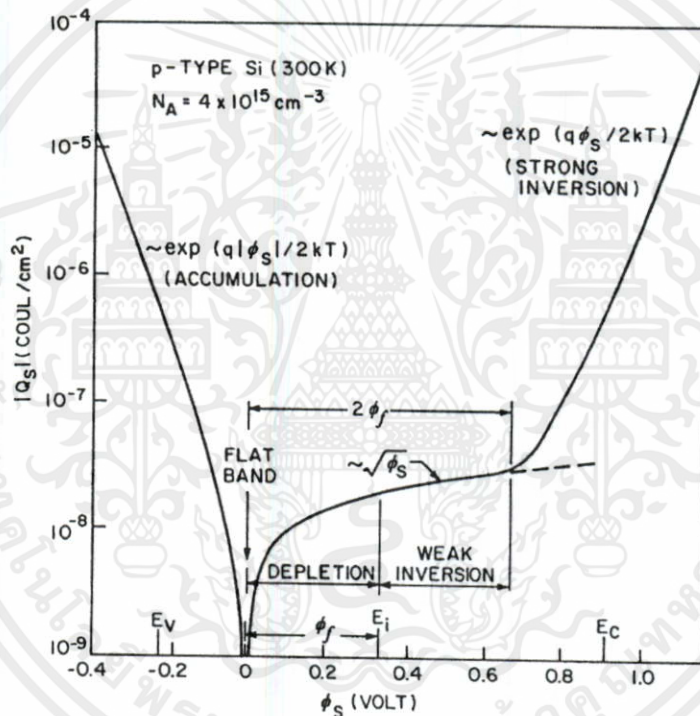
1. การเพิ่มขึ้นของประจุอินเวอร์ชัน (Q_i) ในปริมาณมากนั้นจะเป็นผลมากจากการเพิ่มขึ้นของ ϕ_s เพียงเล็กน้อย ซึ่งเกือบจะทำให้ ϕ_s ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการทำงานช่วงเหนี่ยวนำสตรองอินเวอร์ชัน จึงประมาณว่า $\phi_s \approx 2\phi_f$ ซึ่งเป็นผลต่อไปยัง

2. การประมาณ ϕ_s ให้คงที่จึงทำให้ความกว้างของชั้นดีพลีชันคงที่ไปด้วย

$$x_{dep(max)} = \sqrt{\frac{2K_{Si} \epsilon_o (2\phi_f)}{qN_A}} \tag{2.7}$$

3. ประจุไอออน โนซ์ในชั้นดีพลีชันมีค่าคงที่เนื่องจากชั้นดีพลีชันไม่ได้ขยายกว้างขึ้น

$$Q_B = -qN_A x_{dep(max)} = -\sqrt{2K_{Si} \epsilon_o qN_A (2\phi_f)} \tag{2.8}$$



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของประจุในสารกึ่งตัวนำที่เป็นฟังก์ชันกับศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าสำหรับฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เงื่อนไขของสถานะเข้าสู่การทำงานย่านสตรองอินเวอร์ชันในรูปของศักย์ไฟฟ้าบริเวณผิวหน้าที่แสดงในสมการ (2.5) อาจจะทำให้ลำบากในการวัด ดังนั้นจึงทำการจัดรูปความสัมพันธ์ของจุดกำหนดการทำงานที่ใช้กำหนดย่านสตรองอินเวอร์ชันใหม่ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage, V_{th}) โดยอาศัยเงื่อนไขจากสมการ (2.5) ได้เป็น

$$V_{GB} = V_{OX} + \phi_s + V_{FB} \tag{2.9}$$

เมื่อ V_{ox} เป็นแรงดันไฟฟ้าคร่อมออกไซด์ มีความสัมพันธ์กับประจุสะสมต่อหน่วยพื้นที่ผิว $Q_s = Q_B + Q_i$ เป็น

$$V_{ox} = -\frac{Q_s}{C_{ox}} = -\frac{Q_B + Q_i}{C_{ox}} \quad (2.10)$$

เมื่อ C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของผิวออกไซด์ เครื่องหมายลบในสมการแสดงถึงขั้วของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ (ในกรณีของแผ่นโลหะจะเป็นบวก) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้กับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS เพื่อทำให้เกิดการสะสมประจุจนเป็นชั้นอินเวอร์ชันจะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ไม่น้อยกว่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}) ตามสมการ

$$V_{GB} = V_{th} = -\frac{Q_B}{C_{ox}} + 2\phi_f + V_{FB} \quad (2.11)$$

ซึ่งความหนาแน่นประจุในชั้นดีพลีชัน (Q_B) สามารถหาได้จากสมการ (2.8)

2.2.3 คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS

จากหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงการสะสมประจุที่พ้องกับแรงดันไฟฟ้าไบแอส การกระจายตัวของประจุที่ไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณของโครงสร้าง ทำให้สามารถพิจารณาคุณสมบัติความจุไฟฟ้าที่สมนัยกับแรงดันไฟฟ้าไบแอส ภายใต้ย่านการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ในแต่ละช่วงได้ ซึ่งเป็นวิธีการที่จะศึกษาการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ได้อีกทางหนึ่ง

รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในกระบวนการวัด C-V นั้นเป็นการผสมสัญญาณระหว่างแรงดันไบแอสและสัญญาณไฟสลับ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าสะสมในโลหะและผิวหน้าของซิลิคอน แต่เนื่องจากการวัดจะต้องเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไบแอสให้กับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ด้วย ดังนั้นการผสมสัญญาณจึงไม่ได้กระทำกับสัญญาณไฟกระแสตรงแต่เป็นการผสมกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ แทน

ย่านสะสมประจุ (Accumulation) และสถานะแถบพลังงานแบนราบ (Flat-band condition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
การสะสมประจุพาหะข้างมาก (ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือโฮล) จะต้องไบแอสแรงดันทำให้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเน็ต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้
เกท(โลหะ)มีศักย์ต่ำกว่าฐานรอง ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมประจุระหว่างผิวของโลหะ(อิเล็กตรอน)
และผิวของสารกึ่งตัวนำ(โฮล) ความจุไฟฟ้าที่วัดได้ในย่านการทำงานนี้จะมีค่าความจุไฟฟ้าเข้าใกล้

ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ เพราะว่าการขยายตัวของบริเวณสะสมประจุในเนื้อซิลิคอนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของชั้นออกไซด์ และการที่ประจุไฟฟ้าสะสมที่บริเวณผิวมากขึ้น จะทำให้ความกว้างของชั้นสะสมประจุลดลง ซึ่งเป็นผลมาจาก Debye length (L_D) มีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นประจุพาหะเพิ่มมากขึ้น

$$C_{(accumulation)} = C_{OX} = \frac{K_{SiO_2} \mathcal{E}_o}{t_{OX}} \quad (2.12)$$

เมื่อลดความต่างศักย์ระหว่างเกตและฐานรองลงจนกระทั่งแถบพลังงานอยู่ในสถานะแถบพลังงานแบนราบ ในสภาวะนั้นจะไม่มีประจุสะสมที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอน ความจุไฟฟ้าในสภาวะนี้สามารถหาได้จากทฤษฎีการแก๊สการ Poisson จากทฤษฎีของ Kingston-Neustandter ที่ได้แก๊สการหาความจุไฟฟ้าในเงื่อนไขนี้ [8] พบว่าความจุไฟฟ้า $V_{GB} = V_{FB}$ จะเป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned} C_{FB} &= \frac{1}{\frac{t_{OX}}{K_{SiO_2} \mathcal{E}_o} + \sqrt{\frac{kT}{q^2 K_{Si} \mathcal{E}_o N_A}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{C_{OX}} + \frac{L_D}{K_{Si} \mathcal{E}_o}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ย่านดีพลีชัน (Depletion)

การสะสมประจุในย่านดีพลีชันจะเป็นผลของประจุเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ไอออนไนซ์ การขยายตัวของชั้นดีพลีชันจะทำให้ความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นดีพลีชันมีค่าเปลี่ยนไป มีค่าเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$C_S = \frac{K_{Si} \mathcal{E}_o}{x_{dep}} \quad (2.14)$$

ผลของความจุไฟฟ้าในการทำงานช่วงนี้จะเป็นการอนุกรมกันระหว่างความจุไฟฟ้าในชั้นออกไซด์และความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นดีพลีชัน ซึ่งสามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของแรงดันเกตจากสมการ (2.9)

$$V_{GB} = V_{OX} + \phi_s + V_{FB}$$

$$V_{GB} - V_{FB} = V_{OX} + \phi_s \quad (2.15)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชั้นออกไซด์ (V_{OX}) เท่ากับ $-Q_s/C_{OX}$ แต่เนื่องจากประจุสะสมที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำมีเพียงประจุเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้อิออนไนซ์ ดังนั้น $Q_s = Q_B = -qN_A x_{dep}$ และ $\phi_s = qN_A x_{dep}^2 / (2K_{Si} \epsilon_o)$ แทนค่าแรงดันต่าง ๆ ลงในสมการ (2.15) จะได้

$$V_{GB} - V_{FB} = \frac{qN_A x_{dep}^2}{2(K_{Si} \epsilon_o)} + \frac{qN_A x_{dep}}{C_{OX}}$$

ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นสมการในรูปกำลังสองจึงสามารถหาผลเฉลยของสมการโดยใช้รูปทั่วไปได้เป็น

$$x_{dep} = \frac{K_{Si} \epsilon_o}{C_{OX}} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2C_{OX}^2}{qN_A K_{Si} \epsilon_o} (V_{GB} - V_{FB})} \right) \quad (2.16)$$

ซึ่งจะได้ค่าความกว้างของชั้นดีพลีชันในรูปความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับแรงดันเกต ความจุไฟฟ้ารวมในย่านดีพลีชันอันเกิดจากการอนุกรมกันระหว่างความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นออกไซด์ และความจุไฟฟ้าเนื่องจากชั้นดีพลีชันในสารกึ่งตัวนำ (สมการ 2.14) แทนค่า x_{dep} ลงในสมการรวมเพื่อหาความจุไฟฟ้าสุทธิได้

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_s}$$

$$C = \frac{C_{OX}}{1 + \frac{C_{OX}}{C_s}} = \frac{C_{OX}}{1 + \frac{x_{dep} C_{OX}}{K_{Si} \epsilon_o}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อ C_s งานเพื่อ $K_{Si} \epsilon_o$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_{depletion} = \frac{C_{OX}}{\sqrt{1 + \frac{2C_{OX}^2}{qN_A K_{SI} \epsilon_o} (V_{GB} - V_{FB})}} \quad (2.17)$$

สมการที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไบแอสในกรณีที่ตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ไบแอสอยู่ในย่านดีพลีชัน

ย่านอินเวอร์ชัน (Inversion)

การสะสมของประจุในการทำงานย่านนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ไบแอสทำการผลักโฮลออกไปมากจนเกิดความไม่สมดุลตามกฎของ Mass action ($p.n < n_i^2$) โดยอาศัยกระบวนการสร้างอิเล็กตรอน-โฮล ในชั้นดีพลีชัน และผลของสนามไฟฟ้าในการเร่ง ทำให้ระบบเกิดสมดุลได้ด้วยการดึงดูประจุพาหะ (อิเล็กตรอน หรือโฮล) ให้เคลื่อนที่มาสะสมที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตามทิศของสนามไฟฟ้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุภายในชั้นดีพลีชันจะมีผลกับการวัดเนื่องจากการวัด C-V ใช้สัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์(pluse) ผลที่ได้ในการวัดความจุไฟฟ้าย่านอินเวอร์ชันจึงมี 2 รูปแบบ

1. การวัดด้วยสัญญาณความถี่ต่ำ (Low frequency) ประจุจะมีเวลาพอสำหรับการเคลื่อนที่ผ่านชั้นดีพลีชัน และวางตัวสะสมอยู่ใกล้ๆกับผิวรอยต่อ ซิลิคอน-ซิลิคอนไดออกไซด์ ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากโครงสร้างนี้จึงมีค่าเท่ากับ C_{OX} (C_S มีค่ามากกว่า C_{OX} มากเนื่องจากความหนาของชั้นดีพลีชันมีค่าน้อยกว่าความหนาของชั้นออกไซด์มาก)

2. การวัดโดยใช้สัญญาณความถี่สูง (High frequency) ใน 1 คาบของสัญญาณที่ใช้วัดจะมีเวลาให้ประจุเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าไม่เพียงพอ ทำให้ประจุที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปถึงเพียงขอบของชั้นดีพลีชันเท่านั้นเอง เป็นผลให้ความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่ของการวัดเป็นความจุไฟฟ้าเนื่องจากออกไซด์ และความจุไฟฟ้าเนื่องจากดีพลีชันต่ออนุกรมกัน จากหัวข้อที่แล้วพบว่าความกว้างของชั้นดีพลีชันในย่านตรงอินเวอร์ชันมีค่าคงที่เท่ากับ $x_{dep(max)}$ ดังสมการ (2.7) ทำให้สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้ารวมได้จาก

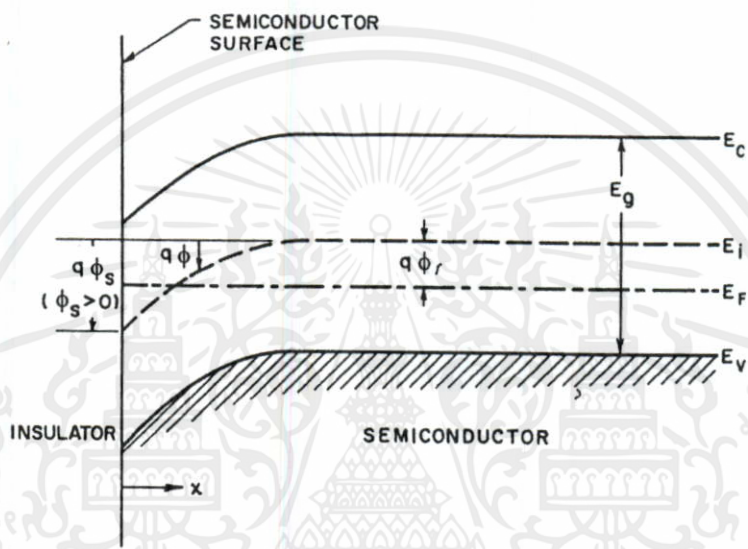
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_{S(min)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

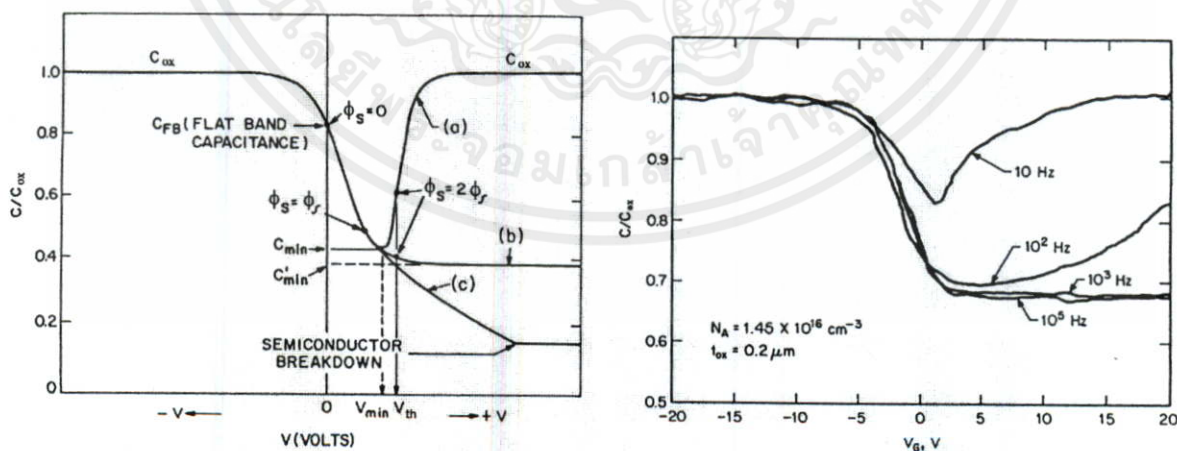
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก 1 ข้อความที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาข้างต้นของเอกสารทุกครั้ง (2.18) นำไปใช้

$$C_{inversion} = \frac{C_{OX}}{1 + C_{OX} \sqrt{\left(\frac{2}{qN_A K_{SI} \epsilon_o}\right) (2\phi_f)}} \quad (2.18)$$

จะสังเกตเห็นได้ว่าสภาวะการทำงานย่านอินเวอร์ชันความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากขั้วเกตจะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันเกต (V_{GB}) ที่ไบแอส แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการวัด เมื่อสภาวะผิวหน้าอยู่ในช่วงวิกอินเวอร์ชัน ประจุสะสมในชั้นอินเวอร์ชันที่บริเวณผิวรอยต่อซิลิคอนกับซิลิคอนไดออกไซด์ จะมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบแอส ในขณะที่ความจุไฟฟ้าระหว่างเกตกับฐานรองเป็นความจุไฟฟ้าอนุกรมระหว่าง C_{ox} และ C_s ดังนั้นความจุไฟฟ้าในช่วงวิกอินเวอร์ชัน จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับความจุไฟฟ้าในสภาวะดีพลีชัน



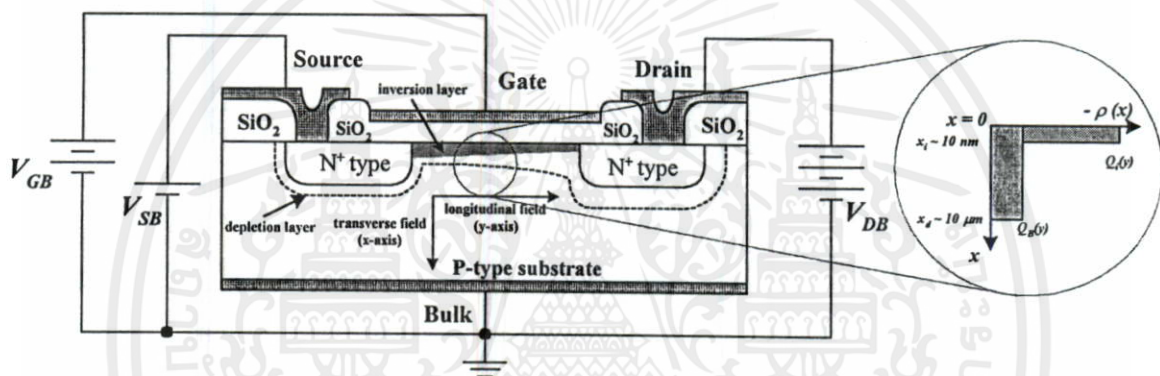
รูปที่ 2.12 แผนภาพการโค้งงอของแถบพลังงานที่ผิวหน้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ในสภาวะอินเวอร์ชันที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ C-V ของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ (a) เป็นผลการวัดด้วยสัญญาณความถี่ต่ำ (b) เป็นผลการวัดด้วยสัญญาณความถี่สูง และ (c) คือ Deep depletion

2.3 กระบวนการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

ทรานซิสเตอร์แบบ MOS มีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าไดโอดโครงสร้าง MOS เพราะเป็นอุปกรณ์ 4 ปลาย การทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะอาศัยแรงดันไบแอสเกต-ซอร์ส ควบคุมการไหลของกระแสเดรน-ซอร์ส ขั้วไฟฟ้าของแรงดันที่ไบแอสให้กับปลายต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ จะแตกต่างกันไปตามชนิดของช่องทางเดินกระแส ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.1 รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นการสะสมประจุภายในทรานซิสเตอร์แบบ MOS โดยมีผลจากสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง สนามไฟฟ้าในแนว y (transverse direction) จะทำให้เกิดการเบนของแถบพลังงานทำให้ประจุเกิดการสะสมในบริเวณช่องทางเดินกระแส ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.2 ส่วนสนามไฟฟ้าในแนว x (longitudinal direction) จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุผ่านช่องทางเดินกระแส



รูปที่ 2.14 ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแสเอ็น ภายใต้สภาวะไบแอส และการสะสมประจุในบริเวณช่องทางเดินกระแส

ในสภาวะการทำงานจริงสนามไฟฟ้าทั้งสองจะส่งผลกระทบซึ่งกันและกัน แต่จะมีอิทธิพลต่อกันเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้แสดงแบบจำลองและ อธิบายกระบวนการไหลของกระแสเดรน (กระแสเอทพุท) เมื่อไบแอสแรงดันที่ปลายต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ให้มีสภาวะการทำงานแตกต่างกัน

2.3.1 ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสยาว

สมการคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบ MOS นั้นจะเริ่มต้นจากการพิจารณาให้ทรานซิสเตอร์มีช่องทางเดินกระแสยาว ซึ่งจะสามารถใช้การประมาณเพื่อลดรูปสมการเพื่อให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ [9] ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสยาวนั้นจะต้องมีขนาดความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเพียงพอที่จะไม่ต้องพิจารณาผลกระทบเนื่องจากขอบทั้งสองด้านของช่องทางเดินกระแส โดยมีเงื่อนไขที่ใช้พิจารณา คือ

- ในส่วนความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) จะต้องมีความยาวมากกว่า ผลรวมของช่วงปลอดประจุพาหะ ที่รอยต่อเดรน และ ซอร์ส (d_{drain}, d_{source})

$$L \gg (d_{drain}, d_{source}) \quad (2.19 \text{ ก})$$

- ในส่วนความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) จะต้องมีค่ามากกว่าความลึกของชั้นปลอดประจุพาหะภายใต้ชั้นอินเวอร์ชัน (x_{dep})

$$Z \gg x_{dep} \quad (2.19 \text{ ข})$$

ด้วยโครงสร้างที่อาศัยสนามไฟฟ้า 2 ทิศทางในการทำงานนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในรูป 2 มิติ เป็นอย่างน้อยเพื่ออธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์ แต่สำหรับ MOSFET ที่มีช่องทางเดินกระแสยาวนั้นสามารถใช้การประมาณ เพื่อลดรูปสมการให้เป็นสมการ 1 มิติ 2 สมการได้

สมการคุณสมบัติของ MOSFET ที่ใช้อธิบายการทำงานเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) และแรงดันไบแอสที่ปลายต่าง ๆ ในกรณีที่ทำกรไบแอสเฉพาะแรงดันเกต-ฐานรอง (V_{GB}) แรงดันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับผิวหน้าของตัวอุปกรณ์เมื่อความยาวของช่องทางเดินกระแสยาว ผลกระทบจากชั้นดีพลีชันของรอยต่อด้านเดรนและซอร์สจะมีน้อยมาก เนื่องจากรอยต่อเป็นเพียงส่วนเล็ก ๆ ส่วนหนึ่งภายในช่องทางเดินกระแสเท่านั้น จึงทำให้สามารถพิจารณาการทำงานของ MOSFET ในสภาวะนี้ได้เหมือนกับเป็นตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2

เมื่อทำการไบแอสแรงดันเดรน-ซอร์ส (V_{DS}) ให้กับ MOSFET ที่มีช่องทางเดินกระแสยาว จะสามารถใช้การประมาณช่องทางเดินกระแสด้วย Graduate Channel Approximation¹ [6][18] ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ด้วยการพิจารณาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าทั้งสองแยกออกจากกัน โดยพิจารณาว่าการไหลของกระแสผ่านช่องทางเดินกระแสเกิดขึ้นจากผลของสนามในแนว y เท่านั้น ส่วนสนามในแนว x จะทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส

¹ Graduate Channel Approximation เป็นหลักที่ใช้สำหรับประมาณกระบวนการเคลื่อนที่และสะสมประจุ ภายในช่องทางเดินกระแสของ MOSFET ที่มีช่องทางเดินกระแสยาว โดยพิจารณาว่า ภายในช่องทางเดิน กระแสพิจารณาเป็นเหมือนตัวต้านทานคงที่ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านช่องทางเดินกระแสจะทำให้เกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม ซึ่งจะมีค่ามากจากปลายด้านเดรนแล้วค่อย ๆ ลดลงจนถึงปลายด้านซอร์ส และนอกจากนี้ยังสมมุติให้ศักย์ไฟฟ้าจากเกตมีค่าเท่ากัน โดยตลอดไม่ขึ้นกับตำแหน่งในช่องทางเดินกระแส (แกน y)

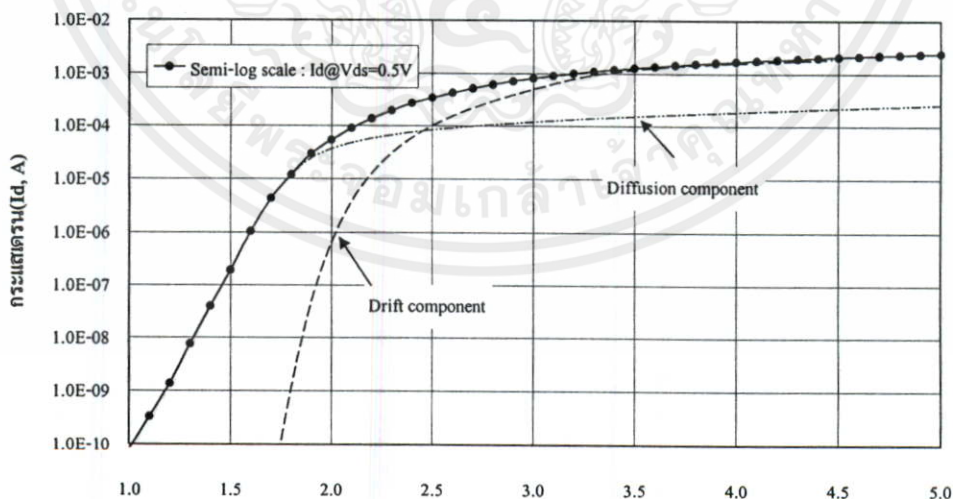
เปลี่ยนแปลง โดยไม่ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสเอาท์พุทโดยตรง ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติของ MOSFET จึงสามารถใช้สมการ Poisson 1 มิติ 2 สมการ พิจารณาการทำงานในช่องทางเดินกระแสแยกจากกัน ผลจากสนามในแนว x จะเหมือนกับการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทำการวิเคราะห์สมการต่อเพื่อหาผลจากสนามในแนว y ก็จะได้เป็นสมการคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

2.3.2 แบบจำลองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

แบบจำลองการทำงานของ MOSFET อย่างง่ายที่นิยมใช้งานโดยทั่วไปนั้นมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ bulk-charge model และ square-law model โดยทั้งคู่ใช้เงื่อนไขของการประมาณอย่างเดียวกัน คือ

1. กำหนดให้แรงดันขั้วเริ่ม เป็นจุดแบ่งระหว่างการไหล ($I_D > 0$ A) และหยุด ($I_D = 0$ A) ของกระแสเดรน
2. กลไกการนำไฟฟ้าภายในช่องทางเดินกระแส เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงประจุเพียงอย่างเดียว (drift current)

การวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองเหล่านี้ไม่ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและการกระจายตัวของประจุอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังไม่ได้พิจารณากระบวนการนำไฟฟ้าภายใต้สภาวะการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่ม ซึ่งมีกลไกการนำไฟฟ้าจากการแพร่ของประจุ (diffusion current) เป็นสำคัญ ดังกราฟการไหลของกระแสในรูปที่ 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่แรงดันเกต-ซอร์ส (V_{gs} , V) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.15 กราฟการไหลของกระแสเดรนใน MOSFET (เส้นทึบ) โดยมีองค์ประกอบเนื่องจากการแพร่ของประจุและการเร่งเนื่องจากสนามไฟฟ้า

ถึงแม้ว่าแบบจำลองอย่างง่ายเหล่านี้ สามารถใช้อธิบายและวิเคราะห์การทำงานของวงจรถิศจิตอลได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสมการในกระบวนการวิเคราะห์เป็นสมการกำลัง 1 (1st order equation) แต่แบบจำลองเหล่านี้ไม่อาจนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานที่ผสมผสานระหว่างจิตติอล และ อนาลอกได้ ยิ่งไปกว่านั้น ยังไม่สามารถอธิบายกระบวนการทำงานในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มได้อีกด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงไม่ใช่แบบจำลองอย่างง่ายทั้งสองในการอธิบายการทำงานของ MOSFET

แบบจำลองที่ถือเป็นมาตรฐานสำหรับใช้อธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ได้ตลอดทุกย่านการทำงานและมีความถูกต้องสูง คือ แบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Double Integral ที่พัฒนาโดย H.C. Pao, และ C.T. Sah ในปี ค.ศ. 1966 [10] แบบจำลองนี้พัฒนาด้วยหลักการพื้นฐานจากฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน โดยไม่สื่อให้เห็นคุณสมบัติการทำงานทางกายภาพของตัวอุปกรณ์ ถึงแม้ว่าแบบจำลองนี้จะให้ความถูกต้องสูง และใช้เป็นแบบจำลองสำหรับทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองอื่น แต่สมการของแบบจำลองนี้ ไม่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ด้วยมือ แต่เหมาะสำหรับการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดในเรื่องความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้แบบจำลอง Charge-sheet model ในการศึกษา ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถจัดกลุ่มตัวแปรในสมการเพื่อให้เห็นคุณสมบัติทางกายภาพของการทำงานในทรานซิสเตอร์ได้ แม้ว่าผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ จะได้สมการที่ซับซ้อนพอสมควร แต่สามารถใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ลดรูปสมการได้โดยแยกย่านการทำงานของ MOSFET ออกเป็นย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มและการทำงานเหนือแรงดันขีดเริ่มให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ และถึงแม้ว่า Charge-sheet model จะไม่สามารถใช้พิจารณาการทำงานของ MOSFET ได้ตลอดทุกย่านการทำงาน¹ แต่ในย่านอินเวอร์ชันแล้วผลที่ได้จาก Charge-sheet model จะใกล้เคียงกับ Pao-Sah model เป็นอย่างมาก

2.3.3 Charge-sheet model

แบบจำลองการทำงานของ MOSFET ด้วยวิธี Charge-sheet model นั้นได้รับการพัฒนาอย่างเป็นอิสระต่อกันจาก G. Baccarani [11] และ J.R. Brews [12] ในปี ค.ศ. 1978 เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับอธิบายการทำงานของ MOSFET ที่มีช่องทางเดินกระแสยาว โดยใช้ข้อกำหนดพื้นฐานในการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1. ใช้การประมาณช่องทางเดินกระแสแบบ Graduate Channel Approximation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ Charge-sheet model มีข้อด้อยเมื่อเทียบกับ Pao-Sah model เนื่องจากไม่สามารถอธิบายการทำงานของ MOSFET เมื่อไบแอสให้อยู่ในย่านแอกคิวเลชันและย่านดิฟฟิชั่นได้

2. พิจารณาการไหลของกระแสตรงด้วยการรวมกันระหว่างกระบวนการแพร่ประจุ (diffusion) และกระบวนการเร่งด้วยสนามไฟฟ้า (drift)
3. ถือว่าความคล่องตัวของประจุพาหะ (mobility, μ) ในช่องทางเดินกระแสจะแปรผันตามสนามไฟฟ้าและมีค่าคงที่ตลอดทุกตำแหน่งในช่องทางเดินกระแส

จากข้อกำหนดพื้นฐานทำให้สามารถพิจารณาประจุอินเวอร์ชัน (Q_s) ภายใต้รอยต่อซิลิคอน-ซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นแผ่นประจุ 2 มิติ เนื่องจากมีขนาดบางมาก การหาสมการคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบ MOS นั้นเริ่มต้นด้วยสมการ Poisson เพื่อทำการหาประจุในชั้นอินเวอร์ชัน

$$\frac{d^2 \phi_{(x)}}{dx^2} = \frac{q}{K_{si} \mathcal{E}_o} (N_A - N_D + n - p) \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$n = n_i e^{(\phi_{(x)} - \phi_f) / \phi_T} \quad (2.21)$$

$$p = n_i e^{(\phi_f - \phi_{(x)}) / \phi_T} \quad (2.22)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลลบของอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของศักย์ไฟฟ้า หาได้ด้วยการอินทิเกรตสมการ (2.20) สนามไฟฟ้านี้ทำให้เกิดประจุสะสมภายใต้ผิวรอยต่อ ซิลิคอน - ซิลิคอนไดออกไซด์ เท่ากับ Q_s ทำการหาประจุสะสมได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างประจุและสนามเป็นไปตามกฎของเกาส์ (Gauss' Law) เมื่อสนามไฟฟ้าที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับ \mathcal{E}_s จะมีประจุสะสมเท่ากับ

$$Q_s = -K_{si} \mathcal{E}_o \mathcal{E}_s \quad (2.23)$$

การทราบประจุสะสมทั้งหมดที่บริเวณใต้ชั้นออกไซด์ทำให้สามารถหาประจุอินเวอร์ชันได้ด้วยการลบประจุในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (Q_B) ออกไป ด้วยวิธีการนี้ทำให้ไม่ต้องคำนวณหาการกระจายตัวของประจุและศักย์ไฟฟ้าภายในโครงสร้าง ความหนาของชั้นอินเวอร์ชันที่ได้จากการอินทิเกรตด้วยวิธีเชิงเลข (Numerical integration) จะมีค่าอยู่ในช่วง 3-30 nm ขึ้นอยู่กับแรงดันเกตไบแอส [13] จึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้ประจุอินเวอร์ชันที่ได้จากวิธีการนี้สำหรับงานต่าง ๆ โดยที่ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแผ่นประจุคงที่ได้กำหนดไว้แต่แรก

ไม่ว่ากรณีใดๆ วิเคราะห์หาประจุอินเวอร์ชันของ MOSFET ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีความหนาแน่นอะตอมผู้ให้ (N_D) เป็นศูนย์ และเพื่อให้ง่ายจะพิจารณาว่า ภายในชั้นอินเวอร์ชันไม่มีโฮลในการวิเคราะห์ยึดศักย์ไฟฟ้าในฐานรองบริเวณที่เป็นกลางไฟฟ้าเป็นศักย์อ้างอิง (ศักย์ในเนื้อสาร

กึ่งตัวนำถัดจากชั้นดีพลีชันเข้าไปภายใน) $\phi_{(x)} = 0$ แทนการประมาณลงในสมการ (2.22) และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$n_i = N_A e^{-\phi_f / \phi_T} \quad (2.24)$$

สมการ (2.24) ที่ได้แสดงให้เห็นว่าระดับเฟอร์มิโนสารกึ่งตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาแน่นอะตอมสารเจือ แทนค่าตัวแปรทั้งหมดที่ได้ลงในสมการ (2.20)

$$\frac{d^2 \phi_{(x)}}{dx^2} = \frac{qN_A}{K_{SI} \epsilon_o} (1 + e^{(\phi_{(x)} - 2\phi_f) / \phi_T}) \quad (2.25)$$

ทำการคูณ $\frac{d\phi_{(x)}}{dx}$ เข้าทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{d\phi_{(x)}}{dx} \right)^2 = \frac{d\phi_{(x)}}{dx} \frac{d^2 \phi_{(x)}}{dx^2} \quad (2.26)$$

จะได้

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{d\phi_{(x)}}{dx} \right)^2 = \phi_T \frac{qN_A}{K_{SI} \epsilon_o \phi_T} (1 + e^{(\phi_{(x)} - 2\phi_f) / \phi_T}) \frac{d\phi_{(x)}}{dx}$$

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{d\phi_{(x)}}{dx} \right)^2 = \frac{\phi_T}{L_D^2} \frac{d}{dx} (\phi_{(x)} + \phi_T e^{(\phi_{(x)} - 2\phi_f) / \phi_T}) \quad (2.27)$$

เมื่อ L_D คือ ความยาว Debye ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก (Extrinsic Debye Length) มีค่าเท่ากับ

$$L_D = \sqrt{\frac{K_{SI} \epsilon_o \phi_T}{qN_A}} \quad (2.28)$$

ค่าความยาว Debye ของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก บ่งบอกถึงสถานะการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณขอบของดีพลีชัน โดยค่าความยาว Debye, L_D จะเป็นระยะที่วัดจากบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงสุดไปจนถึงจุดที่มีสนามไฟฟ้าลดลงด้วยอัตราส่วน $1/e = 0.37$ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความหนา

แน่นอะตอมผู้รับ 10^{16} cm^{-3} จะมีค่า L_D ประมาณ $3 \times 10^{-6} \text{ cm}$ ในทางกายภาพแล้ว ค่าความยาว Debye หมายถึง ความกว้างของชั้น space-charge ในสภาวะแถบพลังงานแบนราบ จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการ (2.27) ตลอดช่วงความกว้างคิฟลิชั้นจะได้

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d\phi(x)}{dx} \right)^2 \Big|_0^{x_{dep}} = \frac{\phi_T}{L_D^2} (\phi(x) + \phi_T e^{(\phi(x) - 2\phi_f)/\phi_T}) \Big|_0^{x_{dep}} \quad (2.29)$$

เงื่อนไขขอบเขตที่แสดงในรูป (2.14) เป็น

$$\phi(x) = \begin{cases} 0 \text{ และ } \frac{d\phi(x)}{dx} = 0 & \text{ที่ } x = x_{dep} \\ \phi_s & \text{ที่ } x = 0 \end{cases} \quad (2.30 \text{ ก})$$

$$(2.30 \text{ ข})$$

เมื่อ ϕ_s คือ ศักย์บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ แทนค่าเงื่อนไขขอบเขตลงในสมการ (2.29) จะได้สมการเป็น

$$-\frac{d\phi(x)}{dx} \Big|_0 = \mathcal{E}_s = \frac{\sqrt{2\phi_T}}{L_D} [\phi_s + \phi_T (e^{\phi_s/\phi_T} - 1) e^{-2\phi_f/\phi_T}]^{1/2} \quad (2.31)$$

แทนค่าสนามไฟฟ้าลงในกฎของเกาส์ เพื่อหาประจุสะสมได้ชั้นออกไซด์

$$Q_s = -K_{si} \epsilon_o \mathcal{E}_s = -(2\phi_T)^{1/2} C_{FB} [\phi_s + \phi_T (e^{\phi_s/\phi_T} - 1) e^{-2\phi_f/\phi_T}]^{1/2} \quad (2.32)$$

C_{FB} คือ ความจุไฟฟ้าในสภาวะแถบพลังงานแบนราบ โดยความกว้างของ space-charge-layer มีค่าเท่ากับ L_D มีค่าเท่ากับ

$$C_{FB} = \frac{K_{si} \epsilon_o}{L_D} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเห็นได้จากรูปที่ 2.13 ว่า ในสถานะไม่ไบแอสแรงดันให้กับเกตความจุไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่า C_{ox}

ประจุสะสมได้ชั้นของออกไซด์ (Q_s) คือผลรวมของประจุในชั้นอินเวอร์ชัน (Q_i) และประจุในชั้นดีพลีชัน (Q_B) ทำให้สามารถหาประจุในชั้นอินเวอร์ชันได้จากสมการที่ (2.32) และสมการ (2.8)

$$Q_i = Q_s - Q_B = -(2\phi_T)^{1/2} C_{FB} \left[(\phi_s + \phi_T e^{(\phi_s - 2\phi_T)/\phi_T})^{1/2} - (\phi_s)^{1/2} \right] \quad (2.34)$$

ประจุในชั้นดีพลีชัน ที่ได้จากการประมาณรอยต่อแบบ One-side step junction มีรูปทั่วไปเป็น

$$Q_B = -(2qK_{Si} \epsilon_o N_A)^{1/2} (\phi_s)^{1/2} = -C_{ox} \gamma (\phi_s)^{1/2} \quad (2.35)$$

เมื่อ γ = สัมประสิทธิ์ของแผ่นฐานรอง (Body effect coefficient)

$$\gamma = \frac{(2qK_{Si} \epsilon_o N_A)^{1/2}}{C_{ox}} \quad (2.36)$$

สมการ (2.34) เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างประจุในชั้นอินเวอร์ชันและศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติกระแสแรงดันของ MOSFET ต่อไป

2.3.3.1 แรงดันเกตไบแอส และประจุอินเวอร์ชัน

เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าเกต-ฐานรอง (V_{GB}) ให้กับ MOSFET จะทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าตกคร่อมชั้นออกไซด์มีค่าเท่ากับ

$$\mathcal{E}_{ox} = -\frac{V_{GB} - \phi_s - V_{FB}}{t_{ox}} \quad (2.37)$$

แทนค่าสนามไฟฟ้าลงในกฎของเกาส์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

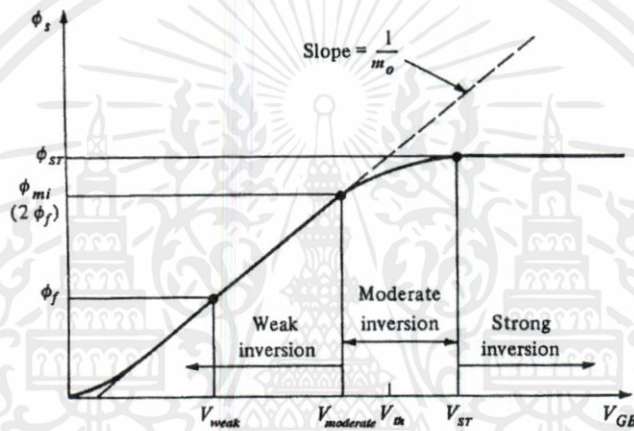
$$-Q_s = -(Q_i + Q_B) = K_{SiO_2} \epsilon_o \mathcal{E}_{ox} = C_{ox} (V_{GB} - \phi_s - V_{FB}) \quad (2.38)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม กรุณาแจ้งให้ทราบก่อนนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้ และขออนุญาตทุกครั้งที่จะนำออกไปใช้

แทนค่าประจุสะสมได้ขึ้นออกไซด์จากสมการ (2.32) และจัดรูปสมการใหม่จะได้

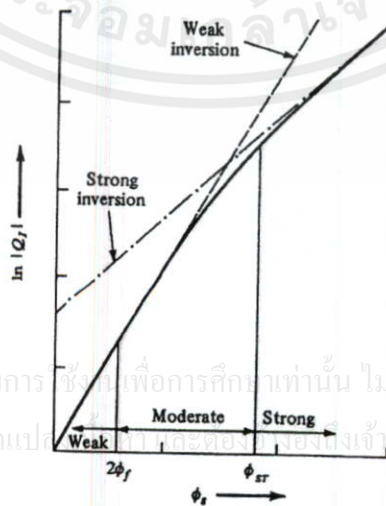
$$V_{GB} = V_{FB} + \phi_s + \gamma \left(\phi_s + \phi_T e^{(\phi_s - 2\phi_f)/\phi_T} \right)^{1/2} \quad (2.39)$$

สมการ (2.39) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบแอสที่เทกกับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ จากสมการจะเห็นว่า การแก้สมการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าทำได้ลำบาก ดังนั้นวิธีการที่ง่ายกว่า คือ การกำหนดศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวให้เป็นตัวแปรอิสระ แล้วหาค่าแรงดันเทก-ฐานรอง (V_{GB}) ที่สมนัยกับศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว (ϕ_s) ค่านี้ จากกราฟในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสารกึ่งตัวนำกับแรงดันเทก-ฐานรอง

นำข้อมูลที่ได้จากกราฟในรูป 2.16 แทนค่าลงในสมการที่ (2.34) เพื่อหาค่าประจุนิวเวอร์ชัน จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุนิวเวอร์ชันกับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดังแสดงในรูป 2.17



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุนิวเวอร์ชันกับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

จากข้อมูลในรูปทั้งสองสามารถแบ่งแยกคุณสมบัติการทำงานออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ วิกฤตอินเวอร์ชัน (weak inversion), โมเดอเรตอินเวอร์ชัน (moderate inversion), และ สตรองอินเวอร์ชัน (strong inversion) วิธีการใช้สำหรับกำหนดขอบเขตย่านการทำงานนั้น ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Y.P. Tsividis ซึ่งมีรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [14] [15] [16]

ย่านวิกฤตอินเวอร์ชัน (weak inversion)

การทำงานในย่านวิกฤตอินเวอร์ชัน เป็นย่านการทำงานที่แถบพลังงานบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำเบนอยู่ในช่วง ϕ_f ไปจนถึง $2\phi_f$ ถ้าพิจารณาในแง่ของประจุ การทำงานย่านนี้จะมีประจุอินเวอร์ชัน น้อยกว่าประจุในชั้นดีพลีชันเป็นอย่างมาก

$$|Q_i| \ll |Q_B|$$

ดังนั้น สมการของประจุภายใต้ชั้นออกไซด์ (2.38) ในการทำงานย่านนี้ จึงมีสมการเป็น

$$V_{GB} = V_{FB} + \phi_s - \frac{Q_B}{C_{OX}} \quad (2.40)$$

แทนค่าประจุในชั้นดีพลีชันด้วยสมการ (2.32) จะได้สมการความสัมพันธ์เป็น

$$V_{GB} = V_{FB} + \phi_s + \gamma(\phi_s)^{1/2} \quad (2.41)$$

สมการ (2.41)¹ นี้สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวจากแรงดันไบแอสเกต-ฐานรองได้โดยการหาผลเฉลยของสมการได้เป็น

$$\phi_s = \left[-\frac{\gamma}{2} + \left(\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB} \right)^{1/2} \right]^2 \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ สมการ V_{GB} เต็มรูปแบบเป็นดังสมการ (2.39) เมื่อพิจารณาว่า $\phi_s < 2\phi_f$ จึงสามารถลดรูปสมการได้เป็นสมการที่ (2.41) โดยเทอมสุดท้ายมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มาก

สภาวะของแรงดันเกต-ฐานรองที่ทำให้เริ่มเข้าสู่ย่าน วิกอินเวอร์ชัน แรงดันในสภาวะนั้นจำเป็นต้องให้แถบพลังงานที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำเบนไปเท่ากับ ϕ_f แรงดันเกต-ฐานรองที่ทำให้ MOSFET เริ่มเข้าสู่ย่านการทำงาน วิกอินเวอร์ชัน มีค่าเท่ากับ V_{weak} โดย

$$V_{weak} = V_{FB} + \phi_f + \gamma(\phi_f)^{1/2} \quad (2.43)$$

ตำแหน่งของ V_{weak} แสดงในรูป 2.16 เนื่องจากการทำงานในย่านนี้ ϕ_s มีค่าน้อยมาก จึงทำให้เทอมที่เป็นเอ็กโพเนนเชียลในสมการความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชัน(2.34) มีค่าน้อยไปด้วย ดังนั้น จึงสามารถลดรูปสมการ (2.34) โดยใช้การกระจาย binomial เมื่อ y มีค่าน้อย ๆ ได้เป็น

$$(1+y)^{1/2} = 1 + \frac{y}{2} + \dots$$

ซึ่งจะได้ความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชันในการทำงานย่านนี้เท่ากับ

$$Q_i = -qN_A L_D \left(\frac{\phi_T}{2\phi_s} \right)^{1/2} e^{(\phi_s - 2\phi_f)/\phi_T} \quad (2.44)$$

จากสมการประจุในย่านการทำงานวิกอินเวอร์ชันพบว่า ประจุอินเวอร์ชันจะเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลกับศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนด้วยกราฟเส้นประ ในรูปที่ 2.17 ถ้าต้องการความสัมพันธ์ระหว่างประจุอินเวอร์ชันกับแรงดันเกตไบแอสสามารถกระทำได้ด้วยการแทนสมการ (2.42) ลงในสมการ (2.44) จากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวจะแปรผันกับแรงดันเกต-ฐานรอง อย่างเป็นเชิงเส้น โดยมีความชันของกราฟเท่ากับ $1/m_o$ ค่า m_o ของความชันกราฟเส้นตรงสามารถหาได้จากการอนุพันธ์ของสมการ (2.41) แล้วกำหนดค่าที่ $\phi_s = 1.5\phi_f$ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของช่วงการทำงานวิกอินเวอร์ชัน ซึ่งจะได้ m_o เท่ากับ

$$m_o = \left. \frac{dV_{GB}}{d\phi_s} \right|_{\phi_s = 1.5\phi_f} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{1.5\phi_f}} \quad (2.45)$$

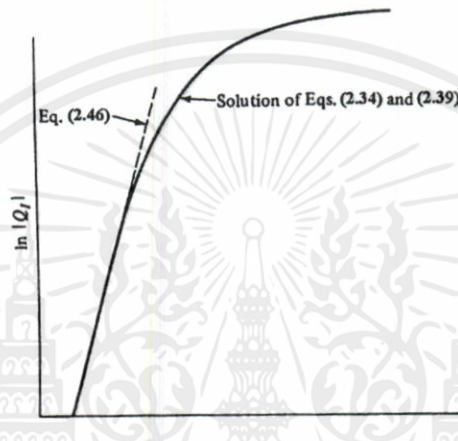
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สมการที่ (2.45) เป็นความชันของกราฟ Semi-log ระหว่าง $\ln Q_i$ และ V_{GB} สามารถเขียนสมการประจุอินเวอร์ชันในย่านการทำงานวิกอินเวอร์ชันในรูปข้อมูลจากการทดลองได้เป็น

$$Q_i = Q_{io} e^{V_{GB}/m_o\phi_T} \quad (2.46)$$

การพล็อตสมการความสัมพันธ์ประจุอินเวอร์ชัน ด้วยสมการเส้นตรงแสดงในรูป 2.18 เมื่อ Q_{io} กำหนดได้ด้วยการทดลองซึ่งในหัวข้อถัดไปจะแสดงให้เห็นว่า กระแสสลับเทอร์สโธลด์ (subthreshold current) จะแปรผันกับประจุอินเวอร์ชัน โดยมีความสัมพันธ์เดียวกับแรงดันเกต-ฐานรอง



รูป 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประจุอินเวอร์ชันกับแรงดันเกต-ฐานรอง เปรียบเทียบระหว่างสมการประมาณในช่วงวิคอินเวอร์ชัน (2.46) และสมการในรูปทั่วไป (2.34) และ (2.39)

ย่านโมเดอเรตอินเวอร์ชัน (Moderate inversion)

ย่านโมเดอเรตอินเวอร์ชัน เป็นย่านการทำงานที่อยู่ถัดจากวิคอินเวอร์ชัน โดยการทำงานในย่านนี้ศักย์ที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำจะเบนอยู่ในช่วง $2\phi_f + 6\phi_T$ ซึ่งจะทำให้ประจุสะสมในชั้นอินเวอร์ชันมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับประจุในชั้นดีพลีชัน ทำให้ไม่สามารถใช้การประมาณประจุให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ดังในกรณีของวิคอินเวอร์ชัน ค่าแรงดันไฟฟ้าในสถานะที่เริ่มเข้าสู่การทำงานย่านโมเดอเรตอินเวอร์ชัน เท่ากับ $V_{moderate}$ โดยคิดมาจากศักย์ไฟฟ้าที่แรงดันค่านี้นี้เท่ากับ $2\phi_f$ ดังเช่นเดียวกับที่มาของสมการ (2.43)

$$V_{moderate} = V_{FB} + 2\phi_f + \gamma(2\phi_f)^{1/2} \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า แรงดันไฟฟ้านี้ มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยกำหนดให้เป็นค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) แต่สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานบางประเภทจะทำการนิยามแรงดันขีดเริ่มแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น ๆ

ย่านสตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion)

ช่วงการทำงานสตรองอินเวอร์ชัน มีนิยามโดยประจวบว่า $|Q_i| \gg |Q_B|$ ซึ่งต้องใช้แรงดันเกต-ฐานรองที่มีขนาดสูงพอที่จะเหนี่ยวนำให้แถบพลังงานเบนเพื่อทำให้เกิดเป็นประจุสะสมมีค่าอยู่ในย่านนี้ เทอมฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลในสมการประจวบอินเวอร์ชันทั่วไป (2.34) จะมีความสำคัญมากกว่าเทอมอื่น ดังนั้นจึงประมาณการทำงานในช่วงนี้ได้เป็น

$$Q_i = -\sqrt{2qL_D n_i} e^{\phi_s/2\phi_T} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ได้จะพบว่าประจวบอินเวอร์ชันจะมีความสัมพันธ์เป็นเอ็กโพเนนเชียลกับศักย์ไฟฟ้าที่ผิว โดยมีความชันเท่ากับ $1/(2\phi_T)$ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อยก็ จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุสะสมในชั้นอินเวอร์ชันเป็นปริมาณมาก ในทางกลับกันอาจกล่าวได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวมีค่าเกือบคงที่ เมื่อประจวบอินเวอร์ชัน (Q_i) หรือแรงดัน V_{GB} มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติจริงแล้ว ศักย์ไฟฟ้าที่เริ่มเข้าสู่ช่วงสตรองอินเวอร์ชันมีนิยามว่า

$$\phi_{ST} = 2\phi_f + m\phi_T \quad (2.49)$$

เมื่อ m คือ พารามิเตอร์ที่เลือกตามความเหมาะสมจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สำหรับ $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $t_{OX} = 50 \text{ nm}$ ค่า m จะประมาณ 6 และศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวมีค่าประมาณ 150 meV จึงจะทำให้แถบพลังงานเบนเกินกว่า $2\phi_f$ การไบแอสแรงดันสูงมากขึ้นในการทำงานช่วงนี้จะทำให้ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสูงเป็นขดแหลม และความกว้างของชั้นดีพลีชันขยายตัวกว้างที่สุด ($x_{dep(max)}$) มีค่าตามสมการ

$$x_{dep(max)} = \left(\frac{2K_{Si} \epsilon_{OX} \phi_{ST}}{qN_A} \right)^{1/2} \quad (2.50)$$

แรงดันไฟฟ้าที่สอดคล้องกับเงื่อนไขนี้มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตของเจ้าของลิขสิทธิ์นำออกไปใช้

$$V_{th} = V_{FB} + \phi_{ST} - \frac{Q_{BM}}{C_{OX}} \quad (2.51)$$

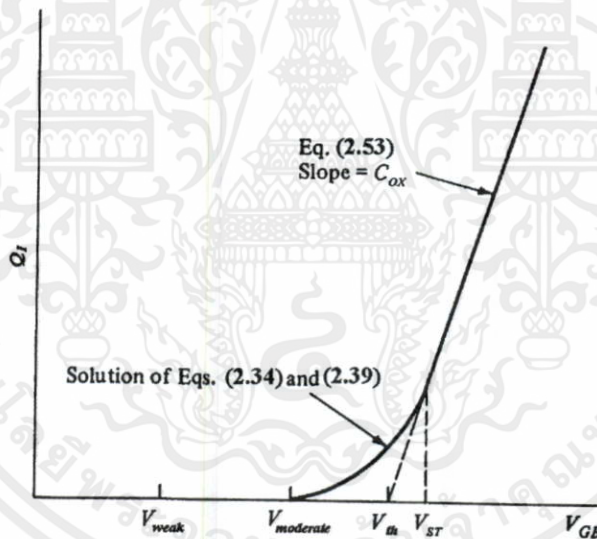
เมื่อประจุสูงสุดในเนื้อวัสดุ มีค่าเท่ากับ

$$Q_{BM} = -qN_A x_{dep(max)} = -\gamma C_{OX} \sqrt{\phi_{ST}} \tag{2.52}$$

ทำการประมาณ ความสัมพันธ์ระหว่างประจุอินเวอร์ชันกับ V_{th} ด้วย

$$Q_i = -C_{OX} (V_{GB} - V_{th}) \tag{2.53}$$

ความสัมพันธ์ในรูปสมการเส้นตรงนี้พล็อตแสดงในรูปที่ 2.19 เป็นผลลัพธ์จากสมการ(2.53) ซึ่งการประมาณจะถูกต้องมากยิ่งขึ้น ถ้า $V_{GB} > V_{ST}$ เมื่อ V_{ST} เป็นค่าที่แสดงอยู่ในรูป 2.19 ช่วงการทำงานที่ V_{GB} มีค่าระหว่าง $V_{moderate}$ และ V_{ST} ไม่มีแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้อธิบายการทำงานในช่วงนี้ ดังนั้น วิธีการที่จะทำนายการทำงานในช่วงนี้ได้จะต้องใช้แบบจำลองเชิงเลขเท่านั้น



รูปที่ 2.19 ประจุในชั้นอินเวอร์ชัน ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันเกต-ฐานรอง ในรูปเชิงเส้น

2.3.4 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์แบบ MOS

จากรูป 2.20 แสดงการไบแอสแรงดันให้กับทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแส เอ็น อย่างถูกต้องจากสมการ (2.35) และ (2.38) ในหัวข้อ 2.3.3 สามารถเขียนสมการประจุในชั้นอินเวอร์ชันได้เป็น

$$Q_i = -C_{OX} (V_{GB} - V_{FB} - \phi_s - \gamma \sqrt{\phi_s}) \tag{2.54}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางทฤษฎีแล้วสามารถจัด Q_i ได้ด้วยการเท่ากันของสมการ (2.34) และ (2.54) ซึ่งการรวมกันของสมการจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวและแรงดันไบแอส ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปแทนลงในสมการส่งผ่านของกระแส (current-transport equation) เพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันต่อไป วิธีดังกล่าวนี้เป็นการหาความสัมพันธ์แบบตรง ที่ผลเฉลยของสมการไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยมือได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเลข เนื่องจากไม่ทำให้เข้าใจกระบวนการทำงานของตัวอุปกรณ์ จึงทำการวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ด้วย ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดรูปสมการกระแสของทรานซิสเตอร์ ให้ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวกับแรงดันไฟฟ้าไบแอสที่เกตและซอร์ส
3. ใช้ความสัมพันธ์ในข้อ 2 เพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับสมการกระแสในข้อ 1
4. แยกช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์ เป็นย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม และเหนือแรงดันขีดเริ่ม โดยใช้การประมาณเพื่อลดรูปสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

ในขั้นต้นจะต้องทำการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในรูปทั่วไป แล้วจึงค่อยประมาณให้อยู่ในรูปอย่างง่าย

การไหลของกระแสในสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ การไหลของกระแสเนื่องจากอิทธิพลการเร่งของสนามไฟฟ้า¹ (drift current)

$$I_{D(\text{drift})} = \mu_n W Q_i \mathcal{E}_y = \mu_n W (-Q_i) \frac{d\phi_s}{dy} \quad (2.55)$$

และการไหลของกระแสมีสาเหตุมาจากการแพร่ของประจุที่มีความหนาแน่นในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน (diffusion current) สามารถพิจารณาหาความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดัน โดยใช้กฎข้อที่ 1 ของ Fick (Fick's First Law, FFL)

$$\mathcal{J}_\alpha = -D_\alpha [T, N_\alpha(y)] \frac{\partial N_\alpha(y)}{\partial y}$$

เมื่อ \mathcal{J}_α คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density) ของอนุภาค α , $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

N_α คือ ความหนาแน่นของอนุภาค α , cm^{-3}

D_α คือ ค่าคงที่การแพร่ของอนุภาค α , $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

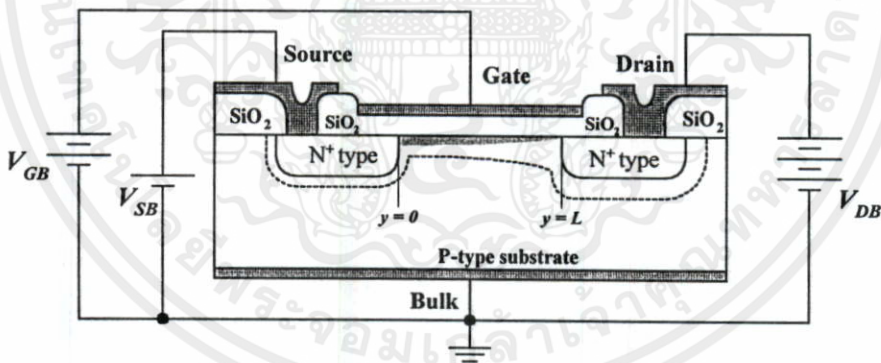
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับผลลบของความชันของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวในแต่ละตำแหน่ง

$\frac{\partial N_\alpha(y)}{\partial y}$ คือ ความลาดของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอนุภาค α
 (Particle profile gradient), cm^{-4}

กระแสเนื่องจากการแพร่ในทรานซิสเตอร์แบบ MOS เป็นผลมาจาก อัตราการเปลี่ยนแปลงของแผ่นประจุจากการแพร่ภายในบริเวณช่องทางเดินกระแส ดังนั้นกระแส ณ ตำแหน่ง y ใด ๆ จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned}
 I_{D(\text{diffusion})} &= \int_0^w (-q \cdot \mathcal{J}_n) dz \\
 &= \int_0^w q D_n \frac{dn_n(y)}{dy} dz \\
 I_{D(\text{diffusion})} &= W D_n \frac{dQ_i(y)}{dy} = \mu_n W \phi_T \frac{dQ_i(y)}{dy} \quad (2.56)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.20 ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่องทางเดินกระแสเอ็นทีไบแอสแรงดันภายนอกอย่างเหมาะสม

สมการรวมของกระแสในสารกึ่งตัวนำสามารถเขียนได้อยู่ในรูปความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $I_D = I_{D(\text{drift})} + I_{D(\text{diffusion})}$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ (2.57) ขนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการอินทิเกรตสมการ (2.57) เพื่อหากระแสครนตลอดความยาวช่องทางเดินกระแสจะได้

$$\int_0^L I_D dy = \int_0^L I_{D(\text{drift})} dy + \int_0^L I_{D(\text{diffusion})} dy \quad (2.58)$$

แทนค่าสมการ (2.55) และ (2.56) ลงในสมการ (2.58)

$$I_D L = \mu_n W \int_{\phi_{S0}}^{\phi_{SL}} (-Q_i) d\phi_s + \mu_n W \phi_T \int_{Q_i(0)}^{Q_i(L)} dQ_i \quad (2.59)$$

ใช้สมการ (2.54) ช่วยการอินทิเกรตเทอมทางด้านขวามือทั้งสองจะได้ ผลของกระแสเดรนเนื่องจากกระบวนการครีฟท์ในตลอดความยาวช่องทางเดินกระแส L ดังสมการ (2.60) และผลของกระแสเดรนเนื่องจากกระบวนการครีฟท์พีวชันตลอดความยาวช่องทางเดินกระแส L เป็นดังสมการ (2.61)

$$\int_0^L I_{D(\text{drift})} dy = W \mu_n C_{OX} \left[(V_{GB} - V_{FB})(\phi_{SL} - \phi_{S0}) - \frac{1}{2}(\phi_{SL}^2 - \phi_{S0}^2) - \frac{2}{3}\gamma(\phi_{SL}^{3/2} - \phi_{S0}^{3/2}) \right] \quad (2.60)$$

$$\text{และ} \quad \int_0^L I_{D(\text{diffusion})} dy = \mu_n W \phi_T [Q_{i(L)} - Q_{i(0)}] \quad (2.61ก)$$

$$= W \mu_n C_{OX} \phi_T [(\phi_{SL} - \phi_{S0}) + \gamma(\phi_{SL}^{1/2} - \phi_{S0}^{1/2})] \quad (2.61 ข)$$

สมการ (2.60) และ (2.61) เป็นสมการกระแสองค์ประกอบจากกระบวนการครีฟท์ และกระบวนการครีฟท์พีวชัน ทำการหาเงื่อนไขขอบเขตให้กับสมการทั้งสอง ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบแอสภายนอกและศักย์ไฟฟ้า (2.39) โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าในบริเวณที่ลึกเข้าไปในฐานรองเป็นศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง ถ้าไบแอสแรงดันระหว่างซอร์สและฐานรอง V_{SB} แรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเลื่อนของ quasi-Fermi level ที่บริเวณซอร์ส ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่ซอร์ส (ที่ตำแหน่ง $y = 0$) จึงมีความสัมพันธ์เปลี่ยนไปเป็น

$$\phi_{S0} = V_{GB} - V_{FB} - \gamma \left[\phi_{S0} + \phi_T \exp\left(\frac{\phi_{S0} - 2\phi_f - V_{SB}}{\phi_T}\right) \right]^{1/2} \quad (2.62)$$

ที่ปลายด้านเดรนก็เช่นเดียวกัน การไบแอสแรงดันให้กับเดรนและฐานรอง, V_{DB} , จะทำให้เกิดการเลื่อนขึ้นของ quasi - Fermi level ที่ปลายด้านเดรน

$$\phi_{SL} = V_{GB} - V_{FB} - \gamma \left[\phi_{SL} + \phi_T \exp \left(\frac{\phi_{SL} - 2\phi_f - V_{DB}}{\phi_T} \right) \right]^{1/2} \quad (2.63)$$

สมการที่ได้ทั้งสองไม่สามารถจัดรูป ϕ_s ให้ขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสจากภายนอกได้ จึงเป็นการยากกว่าที่จะคำนวณหาแรงดันไบแอสสำหรับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวใด ๆ เพื่อใช้คำนวณหาสมการกระแสรวม ได้มีการทดลองก่อนหน้านี้พบว่าสมการผลลัพธ์เหล่านี้สามารถใช้คำนวณกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ได้อย่างถูกต้อง [11][13] การคำนวณโดยส่วนใหญ่ของสมการเหล่านี้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการประมวลผลได้ แต่อย่างไรก็ตาม สามารถทำการลดรูปสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ แต่จะต้องแยกพิจารณาการทำงานออกเป็นช่วง ๆ การประมาณในลักษณะนี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้สมการในการอธิบายช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์แตกต่างกัน แต่มีข้อดี คือ สมการในรูปอย่างง่ายสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยมือได้

2.4 การทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำสมการพื้นฐานทางไฟฟ้าที่พิจารณาได้จากหัวข้อ 2.2 และ 2.3 มาใช้พิจารณาปรากฏการณ์นำไฟฟ้าและการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในสภาวะการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ก่อนที่จะอธิบายรายละเอียด ขอทำความเข้าใจกับย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ก่อน

ในระยะแรกที่เริ่มใช้งานทรานซิสเตอร์แบบ MOS ได้นำไปประยุกต์สำหรับงานด้านดิจิทัล โดยกำหนดระดับแรงดันที่ทรานซิสเตอร์จะนำไฟฟ้าได้ด้วยค่าแรงดันขีดเริ่ม การไบแอสแรงดัน V_{GB} ให้มากกว่าแรงดันขีดเริ่มจะทำให้มีกระแสเดรน (I_D) ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์ แต่ถ้าแรงดันไบแอส V_{GB} มีค่าต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม กระแสเดรนจะไม่ไหล ($I_D = 0$) แบบจำลองที่ยึดวิธีพิจารณาการทำงานแบบนี้ คือ bulk-charge model และ square-law model ซึ่งนิยามของแรงดันขีดเริ่ม อาจจะมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำลักษณะใดที่สนใจ ตัวอย่างเช่น

- สภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็น 2 เท่าของศักย์เฟอร์มี (ϕ_f)
- สภาวะที่ความหนาแน่นประจุพาหะอินเวอร์ชันในช่องทางเดินกระแสมีค่าเท่ากับความหนาแน่นประจุพาหะของอะตอมสารเจือในฐานรอง
- เป็นสภาวะที่การไหลของประจุไฟฟ้าผ่านช่องทางเดินกระแสมีกลไกหลักมาจากกระบวนการเร่งด้วยสนามไฟฟ้า (drift current)

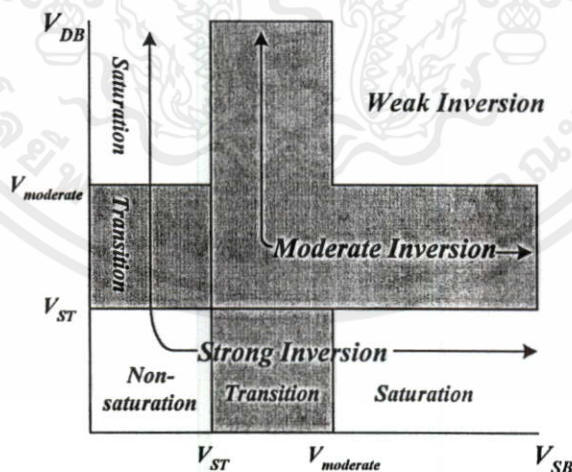
- เป็นสถานะที่มีค่าความจุไฟฟ้าระหว่าง เกท และฐานรองต่ำที่สุด เนื่องจากชั้นดีพลีชันขยายตัวกว้างที่สุด

แต่ในความเป็นจริงแล้ว การที่ไบแอสแรงดัน V_{GB} ด้วยแรงดันต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มก็ทำให้กระแสเดรน สามารถไหลได้เพียงแต่มีกลไกการทำงานที่แตกต่างไปจากช่วงการทำงานเหนือแรงดันขีดเริ่ม การที่จะนำทรานซิสเตอร์แบบ MOS ไปประยุกต์ใช้งานที่มีการผสมผสานระหว่างดิจิตอล และอนาล็อกอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาผลการทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่มรวมเข้าไปด้วย

2.4.1 ขอบเขตของช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

ช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม อาจเรียกว่า ช่วงสับเทรตโฮล (subthreshold regime) หรือ ช่วงวีกอินเวอร์ชัน (Weak inversion regime) เป็นช่วงที่สถานะภายในช่องทางเดินกระแสอยู่ในสถานะวีกอินเวอร์ชันกล่าวคือ เป็นสถานะที่ทำให้กระแสเดรน (I_D) ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสด้วยกระบวนการแพร่ของประจุ เงื่อนไขของการไบแอสแรงดันจากภายนอกให้กับ MOSFET เพื่อให้มีสถานะการทำงานในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่ม สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย

- คอปลายด้านซอร์สกับระดับแรงดันอ้างอิง
- ไบแอสแรงดัน V_{GB} เข้าใกล้แรงดันขีดเริ่ม (แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่า)
- ไบแอสแรงดัน V_{DS} ให้มากกว่า $3\phi_T$

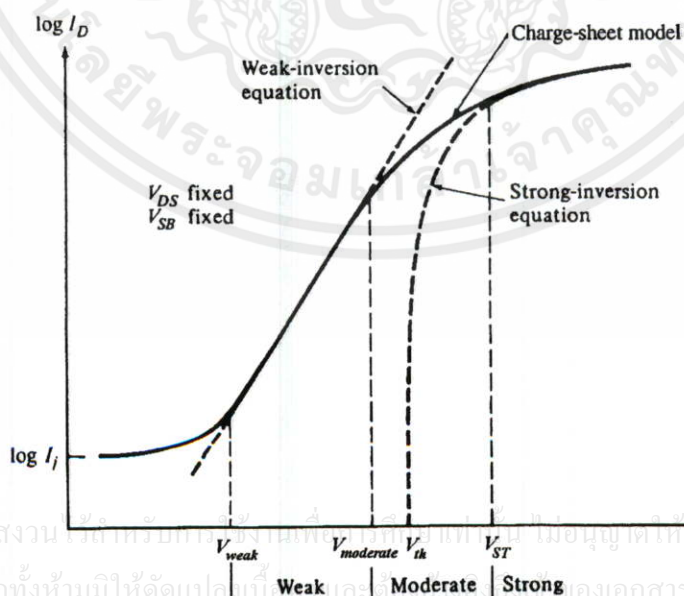


รูปที่ 2.21 นิยามแรงดันย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ช่วงต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เนื่องจากการทำงานของ MOSFET จะต้องมีแรงดันไบแอสจากภายนอก 2 ค่า ดังนั้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้อ่านห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การไบแอสแรงดัน V_{DS} จะส่งผลกระทบต่อสถานะผิวหน้าสารกึ่งตัวนำในปลายช่องทางเดินกระแสซอร์สและเดรน การที่จะระบุสถานะของทรานซิสเตอร์ว่าอยู่ในย่านการทำงานใดจะต้องพิจารณา

จากระดับการอินเวอร์ชันของผิวหน้าสารกึ่งตัวนำตลอดช่องทางเดินกระแส [16] ดังรายละเอียดที่แสดงอยู่ในรูป 2.21 จากรูป $V_{moderate}$ เป็นค่าแรงดัน V_{SB} (หรือ V_{DB}) ที่ทำให้ซอร์ส (หรือเดรน) เข้าสู่สถานะโมเดอเรตเลทอินเวอร์ชัน ส่วน V_{ST} เป็นค่าแรงดัน V_{SB} (หรือ V_{DB}) ที่ทำให้ซอร์ส (หรือเดรน) อยู่ในค่าแรงดันสูงสุดของสถานะโมเดอเรตเลทอินเวอร์ชัน ค่า $V_{moderate}$ และ V_{ST} จะขึ้นอยู่กับ V_{GB} เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ต่อฐานรองเข้ากับซอร์ส ทำให้ไม่มีผลจากการไบแอสฐานรองมาเกี่ยวข้อง $V_{moderate}$ จึงเท่ากับสมการ (2.47) และ V_{ST} เป็นไปตามสมการ (2.51) เป็นที่น่าสังเกตว่าในบริเวณที่แรงจางจะต้องมีปลายด้านใดด้านหนึ่งเป็นอย่างน้อยอยู่ในสถานะโมเดอเรตเลท และการทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่มจะต้องมีแรงดันตลอดความยาวช่องทางเดินกระแสต่ำกว่า $V_{moderate}$

เมื่ออธิบายมาถึงจุดนี้ทำการพิจารณาแรงดันขีดเริ่มตามนิยามทั้งหลายที่กล่าวไว้ข้างต้น จะพบว่าแรงดันขีดเริ่มที่นิยามว่าคือแรงดันที่ทำให้ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ $2\phi_f$ นั้น เป็นจุดที่มีแรงดันเข้าใกล้กับแรงดันขบถ่างของการทำงานช่องโมเดอเรตเลทอินเวอร์ชัน ($V_{moderate}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 วิธีการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มจากตัวอุปกรณ์มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับนิยามของแรงดันขีดเริ่ม ดังรายละเอียดใน [16] [17] แต่วิธีการวัดที่ได้ค่าใกล้เคียงกับขบถ่างของการทำงานช่วงโมเดอเรตเลทอินเวอร์ชันมากที่สุด คือ การวัดด้วยการไบแอสให้ MOSFET ทำงานในสถานะเชิงเส้นแล้ววัดค่ากระแสและแรงดันเพื่อหาจุดตัดแกนแรงดัน ด้วยวิธีลากเส้นต่อกราฟที่เป็นฟังก์ชันเส้นตรง (linear extrapolation method) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้อาจมีความผิดพลาดเนื่องจาก ความไม่คงที่ของค่าความคล่องตัวของประจุพาหะภายในช่องทางเดินกระแสแฝงอยู่ด้วย [16] ดังนั้นจึงควรเทียบค่าที่วัดได้กับค่าแรงดันขีดเริ่มที่หาจากทางทฤษฎีตามสมการ (2.47)



รูปที่ 2.22 ย่านปฏิบัติการของทรานซิสเตอร์แบบ MOS และแรงดันขีดเริ่มที่หาด้วยวิธี linear extrapolation method

การระบอบเขตการทำงานช่วงวิคอินเวอร์ชันในทางทฤษฎีสามารถระบุได้โดยใช้นิยามช่วงการทำงานด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (ϕ_s) และสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเกต และศักย์ไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าเกต-ฐานรองที่ทำให้ MOSFET เริ่มเข้าสู่การทำงานในช่วงวิคอินเวอร์ชันมีความสัมพันธ์เป็น

$$V_{weak} = V_{GB(weak\ low)} = V_{FB} + \phi_f + \gamma(\phi_f)^{1/2} \quad (2.64)$$

ส่วนแรงดันเกต-ฐานรองสูงสุดที่ทำให้ MOSFET อยู่ในช่วงวิคอินเวอร์ชันมีความสัมพันธ์เป็น

$$V_{moderate} = V_{GB(weak\ high)} = V_{FB} + 2\phi_f + \gamma(2\phi_f)^{1/2} \quad (2.65)$$

2.4.2 สมการกระแสในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม

จากหัวข้อที่ 2.3.3 ที่ได้ทำการพิจารณา Charge-sheet model จะเห็นว่าสมการกระแสของแบบจำลองนี้มีอิทธิพลของกระแส 2 กระบวนการรวมกันอยู่ คือ กระแสเนื่องจากกระบวนการดริฟท์ และกระแสเนื่องจากกระบวนการดิฟฟิวชัน แต่จากการพิจารณาขอบเขตของช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มพบว่า การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิว (ϕ_s) ตลอดช่องทางเดินกระแสจะต้องมีค่าไม่เกินศักย์เฟอร์มิ (ϕ_f) หรือแรงดันที่ปลายด้านเดรน (V_{DB}) และปลายด้านซอร์ส (V_{SB}) เมื่อเทียบกับฐานรองจะต้องมีค่าต่ำกว่า $V_{moderate}$ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมช่องทางเดินกระแสจึงมีค่าน้อยมาก ซึ่งจะส่งผลต่อไปยังกระแสเนื่องจากการเร่งของสนามไฟฟ้า (Drift current) ให้มีค่าน้อยตามไปด้วย ดังผลที่แสดงในรูป 2.15 สมการขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณช่องทางเดินกระแสในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มมีความสัมพันธ์เป็น

$$\phi_{sw} = \left[-\frac{\gamma}{2} + \left(\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB} \right)^{1/2} \right]^2 ; \phi_f \leq \phi_{sw} \leq 2\phi_f \quad (2.66)$$

เมื่อทำการไบแอสแรงดัน V_{GS} และ V_{DS} ให้กับทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่มจะพบว่า ประจุอินเวอร์ชันภายในช่องทางเดินกระแสนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับระดับ quasi-Fermi level อีกด้วย การเลื่อนของ quasi-Fermi level เป็นผลเนื่องมาจากการไบแอสแรงดันให้กับขั้วต่าง ๆ ของ MOSFET ทำให้สามารถอธิบายการทำงานของ MOSFET ได้โดยปรับปรุงสมการความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชัน (2.44) ให้เหมาะสมกับ

การไบแอสแรงดันทำงานของ MOSFET ในย่านนี้ โดยปลายด้านซอร์สมีสมการประจุอินเวอร์ชันขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสด้านซอร์สเป็น

$$Q_{i(0)} = -qN_A L_D \left(\frac{\phi_T}{2\phi_{SW}} \right)^{1/2} e^{(\phi_{SW} - 2\phi_f - V_{SB})/\phi_T} \quad (2.67)$$

ส่วนประจุที่ปลายด้านเดรนจะมีสมการขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสด้านเดรนเป็น

$$Q_{i(L)} = -qN_A L_D \left(\frac{\phi_T}{2\phi_{SW}} \right)^{1/2} e^{(\phi_{SW} - 2\phi_f - V_{DB})/\phi_T} \quad (2.68)$$

แทนสมการ (2.67) และ (2.68) ลงในสมการกระแสดีฟฟิวชัน (2.61) จะได้

$$I_{Dsub} \approx I_{D(diffusion)} \quad (2.69 ก)$$

$$I_{Dsub} = \mu_n \frac{W}{L} \phi_T [Q_i(L) - Q_i(0)]$$

$$I_{Dsub} = I_S (e^{-V_{SB}/\phi_T} - e^{-V_{DB}/\phi_T}) \quad (2.69 ข)$$

เมื่อ

$$I_S = \frac{\mu_n W C_{OX} \gamma \phi_T^2}{2\sqrt{\phi_{SW}} L} e^{(\phi_{SW} - 2\phi_f)/\phi_T} \quad (2.70)$$

ตัวแปร I_{Dsub} หมายถึง กระแสซับเทรชโฮลด์ (Subthreshold current) สมการที่ได้มีความใกล้เคียงกับสมการกระแส BJT ในแบบจำลอง Eberts-Moll โดยพิจารณาซอร์สเทียบได้กับอิมิตเตอร์ ช่องทางเดินกระแสเทียบได้กับเบส และเดรนเทียบได้กับคอลเลกเตอร์ ของ BJT ชนิด NPN การป้อนแรงดันซอร์สด้วยการไบแอสตรง และป้อนแรงดันให้เดรนด้วยการไบแอสย้อนกลับเป็นการทำงานของ

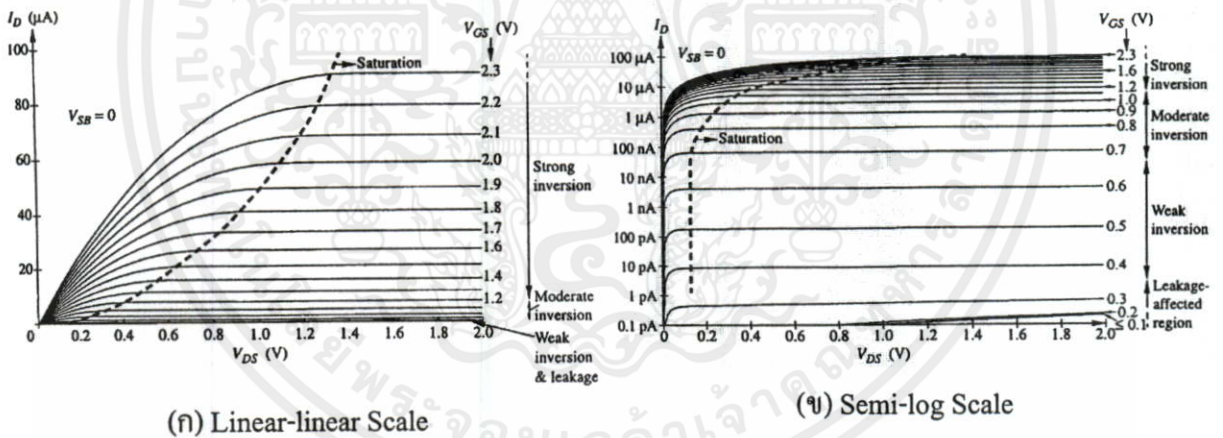
ทรานซิสเตอร์ BJT ในสถานะ active mode [9] [13] ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สมการ (2.69 ข) มีรูปความสัมพันธ์ของสมการ I_{Dsub} กับ V_{DB} และ V_{SB} ดังนั้นจึงสามารถจัดใช้รูปสมการให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสมการ I_{Dsub} กับ V_{DS} ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 I_{Dsub} &= I_S e^{-V_{SB}/\phi_T} \left(1 - \frac{e^{-V_{DB}/\phi_T}}{e^{-V_{SB}/\phi_T}} \right) \\
 &= I_S e^{-V_{SB}/\phi_T} (1 - e^{-V_{SD}/\phi_T}) \\
 &= \frac{\mu_n W C_{OX} \gamma \phi_T^2}{2\sqrt{\phi_{SW}} L} e^{-(\phi_{SW} - 2\phi_f - V_{SB})/\phi_T} (1 - e^{-V_{SD}/\phi_T}) \quad (2.71)
 \end{aligned}$$

เมื่อ
$$\phi_{SW} = \left[-\frac{\gamma}{2} + \left(\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB} \right)^{1/2} \right]^2 ; \phi_f \leq \phi_{SW} \leq 2\phi_f$$

นำสมการ (2.71) ที่ได้มาพล็อตกราฟ $I_D - V_{DS}$ จะได้กราฟคุณสมบัติกระแสแรงดันเป็นดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กราฟคุณสมบัติ $I_D - V_{DS}$ ของ MOSFET ในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่ม

จากกราฟจะเห็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ I_{Dsub} แตกต่างกัน เมื่อ V_{DS} มีค่าสูงขึ้น โดยสามารถแยกการทำงานได้เป็น 2 ช่วงได้แก่

สถานะไม่อิ่มตัว (Non-saturation region) เป็นสภาวะการทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มที่ได้รับการไบแอส V_{DS} มีค่าต่ำกว่า $3-4\phi_T$ ซึ่งสภาวะนี้การเปลี่ยนแปลง V_{DS} ในเทอม e^{-V_{DS}/ϕ_T} ที่คำนวณได้จะมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ 1

สถานะอิ่มตัว (Saturation region) เป็นสภาวะการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มที่ได้รับการไบแอส V_{DS} มีค่าสูงกว่า $3-4\phi_T$ ซึ่งสภาวะนี้ e^{-V_{DS}/ϕ_T}

จะมีค่าต่ำกว่า 1 มาก จนสามารถละทิ้งเทอมสุดท้ายของสมการได้ โดยไม่ต้องนำมาพิจารณารวมในสมการกระแส I_{Dsub} จึงทำให้สามารถลดรูปสมการกระแสได้เป็น

$$I_{Dsub(sat)} = I_S e^{-V_{SB}/\phi_T} = \frac{\mu_n W C_{OX} \gamma \phi_T^2}{2\sqrt{\phi_{SW}} L} e^{(\phi_{SW} - 2\phi_f - V_{SB})/\phi_T} \quad (2.72)$$

$$\text{เมื่อ } \phi_{SW} = \left[-\frac{\gamma}{2} + \left(\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB} \right)^{1/2} \right]^2 ; \phi_f \leq \phi_{SW} \leq 2\phi_f$$

จากสมการที่ได้พบว่ากระแสเดรนในภาวะอิ่มตัวก่อนแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันเกตที่ไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์เท่านั้น โดยไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันเดรน-ซอร์ส จึงทำให้สามารถเขียนสมการกระแสก่อนแรงดันขีดเริ่มในรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$I_{Dsub} = I_{Dsub(sat)} \left(1 - e^{-V_{SD}/\phi_T} \right) \quad (2.73)$$

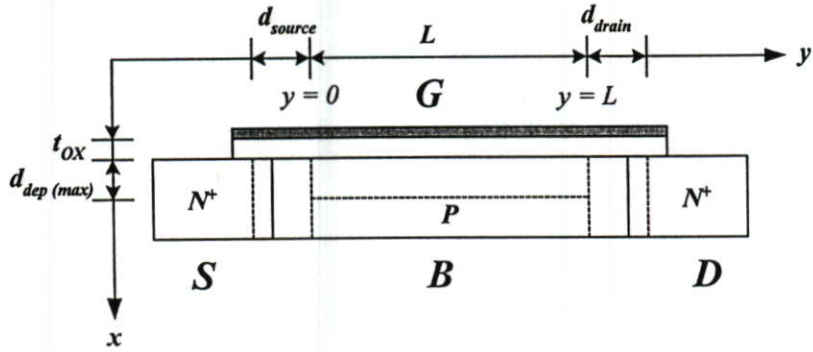
2.4.3 กลไกการไหลของกระแสในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม

เนื่องจากโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสยาว ดังนั้นจึงสามารถอธิบายกลไกการทำงานของทรานซิสเตอร์โดยใช้ปัญหา 2 มิติ คือ พิจารณาผลจากการสร้างช่องทางเดินกระแสโดยใช้สนามไฟฟ้าในแนว x คึงดูค และผลกประจุพาหะภายในช่องทางเดินกระแส และผลของสนามไฟฟ้าในแนว y ทำหน้าที่จ่ายประจุผ่านช่องทางเดินกระแสให้เกิดเป็นกระแสเดรน

เพื่อให้สะดวกแก่การอธิบายจะทำการพิจารณาการไหลของกระแสภายในทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีโครงสร้างในอุดมคติ คือ

1. รอยต่อที่ปลายด้านเดรน และซอร์ส เรียบและขนาน ซึ่งกันและกัน โดยวางตัวตั้งฉากกับผิวรอยต่อซิลิคอน-ซิลิคอนไดออกไซด์
2. เป็นโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบช่องทางเดินกระแสยาว โดยขอบเขตของชั้นดีพลีชันเมื่อขยายตัวมากที่สุด สามารถระบุได้โดยอาศัยค่าแรงดันขีดเริ่มหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ
3. แผ่นโลหะที่ทำหน้าที่เป็นเกต และชั้นออกไซด์ วางตัวคร่อมทับส่วนที่เป็นรอยต่อด้านเดรน และรอยต่อด้านซอร์ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆ



รูปที่ 2.24 โครงสร้างรอยต่อของทรานซิสเตอร์ NMOS บริเวณช่องทางเดินกระแสในอุดมคติ

เริ่มต้นจากการไบแอสแรงดัน V_{GB} ให้กับทรานซิสเตอร์แล้วทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งก็คือช่วงแรงดัน $V_{GB\ weak\ low}$ ถึง $V_{GB\ weak\ high}$ ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีค่าอยู่ในช่วง ϕ_f ถึง $2\phi_f$ จึงทำให้เกิดการสะสมประจุอินเวอร์ชัน (อิเล็กตรอน) ขึ้นในช่องทางเดินกระแส แต่จากการที่ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวมีค่าน้อย เป็นผลทำให้ความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชันในช่องทางเดินกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความหนาแน่นอะตอมสารเจือในฐานรอง (N_A) จึงทำให้สามารถพิจารณาฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่เกือบเป็นอินทรีนสิกได้ สภาวะผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำในขณะนี้ เป็นสภาวะสมดุล เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้าในแนว y ทำให้เกิดการดึงคู่อิเล็กตรอน และผลักโฮลไปพร้อม ๆ กัน จึงทำให้ผลคูณของประจุพาหะทั้งสองมีค่าเท่ากับ $pn = n_i^2$ แต่มีสภาวะไม่เป็นกลางทางประจุ กล่าวคือที่บริเวณช่องทางเดินกระแสมีความเป็นประจุลบมากขึ้น แต่บริเวณใต้ช่องทางเดินกระแส (ชั้นดีพลีชัน) มีความเป็นประจุบวกมากขึ้น ดังนั้นการนำไฟฟ้าผ่านช่องทางเดินกระแสจึงเป็นการนำไฟฟ้าโดยอาศัยประจุพาหะเพียงชนิดเดียว ซึ่งในที่นี้คืออิเล็กตรอน

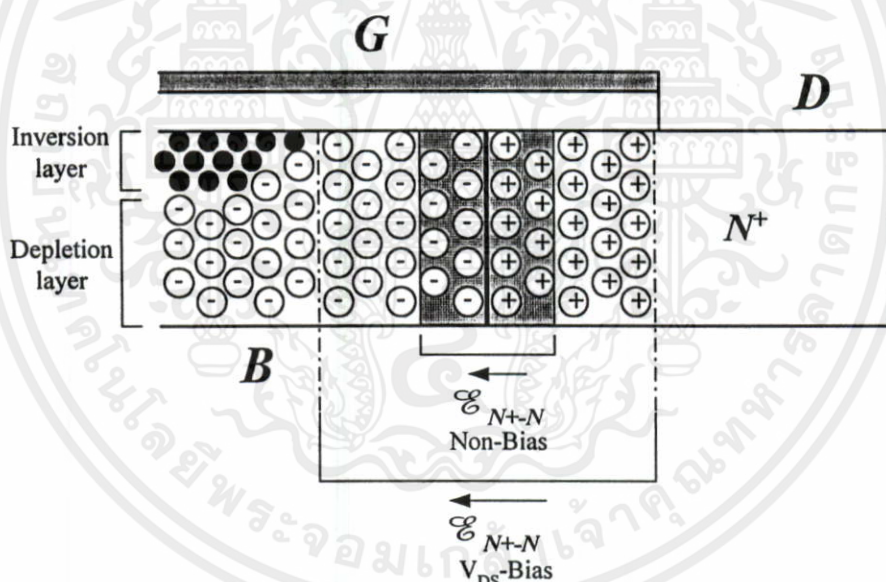
การเปลี่ยนแปลงแรงดันไบแอสให้กับเกตนอกจากจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุสะสมในบริเวณช่องทางเดินกระแสแล้ว ยังเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อซอร์ส-ฐานรอง และเดรน-ฐานรองอีกด้วย การเพิ่มแรงดันเกตให้สูงขึ้นจะทำให้กำแพงศักย์ (Potential barrier) ที่รอยต่อทั้งสองมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าจะมีการเชื่อมต่อซอร์สกับฐานรองเข้าด้วยกัน หรือไม่ก็ตาม

เมื่อไบแอสแรงดันเดรน-ซอร์ส ให้กับทรานซิสเตอร์จะสามารถพิจารณาการทำงานในแนว y ได้ โดยใช้ทฤษฎีการนำไฟฟ้าของรอยต่อ P-N ช่วยอธิบาย เพื่อความสะดวกแก่การอธิบายจะทำการพิจารณาการทำงานของ 2 รอยต่อแยกจากกัน

ในด้านซอร์สเป็นการไบแอสตรงไดโอดแบบ $N^+ - N$ (หรือไดโอดแบบ high-low) การไบแอสตรงให้กับไดโอดลักษณะนี้ก็จะให้ผลการทำงานคล้ายกันกับไดโอดแบบ P-N กล่าวคือ แรงดันไบแอสจะทำให้กำแพงศักย์ที่รอยต่อนี้ลดลง จึงทำให้ประจุพาหะ (อิเล็กตรอน) ที่มีพลังงานสูง

พอที่จะข้ามกำแพงศักย์ได้มีจำนวนมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ปลายช่องทางเดินกระแสด้านซอร์สมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสูงของกำแพงศักย์ในการทำงานช่วงก่อนแรงดันขั้วเริ่มเทียบกับความสูงของกำแพงศักย์ในช่วงการทำงานเหนือแรงดันขั้วเริ่มแล้วจะพบว่า การทำงานในช่วงก่อนแรงดันขั้วเริ่มจะยังคงมีความสูงของกำแพงศักย์มากกว่าการทำงานในช่วงเหนือแรงดันขั้วเริ่ม

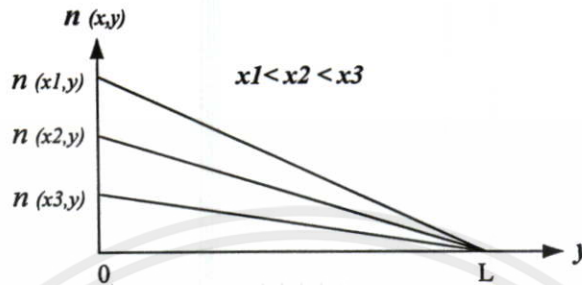
รอยต่อด้านเดรนเป็นการไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias) ให้กับไดโอดแบบ high-low ซึ่งจะทำให้กำแพงศักย์ที่รอยต่อเดรน-ฐานรองมีความสูงมากขึ้น และชั้นดีพลีชันมีการขยายตัวมากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าจากการไบแอสเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่รอยต่อนี้โดยมีทิศของสนามเสริมกับสนามไฟฟ้าของรอยต่อที่มีทิศทางของสนามจากเดรนไปยังฐานรอง เนื่องจากอิเล็กตรอนมีประจุเป็นลบจึงเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ปลายช่องทางเดินกระแสด้านเดรนจะได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่รอยต่อแรงประจุข้ามรอยต่อนี้ไปอย่างรวดเร็ว จนหมด ด้วยเหตุนี้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายช่องทางเดินกระแสด้านเดรนจึงเป็นศูนย์



รูปที่ 2.25 ภาพขยายรอยต่อไดโอดแบบ high-low ภายใต้การไบแอส V_{DS}

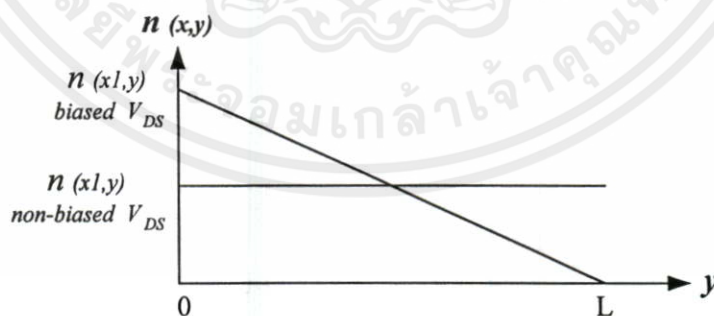
เมื่อพิจารณาผลการทำงานร่วมกันจากปลายช่องทางเดินกระแสด้านซอร์สไปจนถึงปลายช่องทางเดินกระแสด้านเดรนจะพบว่า ที่ปลายด้านซอร์สจะมีความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชันเพิ่มขึ้น และที่ปลายด้านเดรนจะมีความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชันลดลง เมื่อเทียบกับสถานะของช่องทางเดินกระแสที่ไม่ได้รับการไบแอส V_{DS} ดังแสดงในรูปที่ 2.26 และ 2.27 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆที่พิจารณาความหนาแน่นของประจุในแนวตั้ง (แกน x) แล้วจะพบว่า ความหนาแน่นของประจุจะมีค่าลดลง โดยจะแปรผันแบบเอ็กโพเนนเชียลกับศักย์ไฟฟ้าที่ระดับความลึกนั้น ๆ เมื่อพิจารณาในแนวระนาบ (แกน y) จะพบว่าความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชันสูงสุดจะอยู่ที่ปลาย

ด้านซอร์ส ส่วนความหนาแน่นประจุอินเวอร์ชันต่ำสุดจะอยู่ที่ปลายด้านเดรน ความหนาแน่นประจุจะลดลงในลักษณะเป็นเชิงเส้น (ช่องทางเดินกระแสยาว) จากปลายด้านซอร์ส มายังปลายด้านเดรน



รูปที่ 2.26 การกระจายตัวของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในตำแหน่งต่างๆ ภายในช่องทางเดินกระแสในสภาวะก่อนแรงดันขีดเริ่ม

การกระจายตัวของประจุจากปลายช่องทางเดินกระแสด้านซอร์สมายังปลายช่องทางเดินกระแสด้านเดรนนั้นเป็นไปเนื่องด้วยอิทธิพลของการแพร่ประจุ (Diffusion mechanism) จากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ โดยมีสนามไฟฟ้าไบแอสควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุ ซึ่งศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในแต่ละส่วนของช่องทางเดินกระแสจะมีค่าต่ำมาก ($I.R$) เนื่องจากกระแสมีค่าต่ำ ($10^{-6}-10^{-9}$ A) ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมในแต่ละบริเวณของช่องทางเดินกระแสจึงมีค่าต่ำไปด้วย การเคลื่อนที่ของประจุด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Drift mechanism) จึงมีน้อยมาก เมื่อช่องทางเดินกระแสอยู่ในสภาวะวิคอินเวอร์ชัน

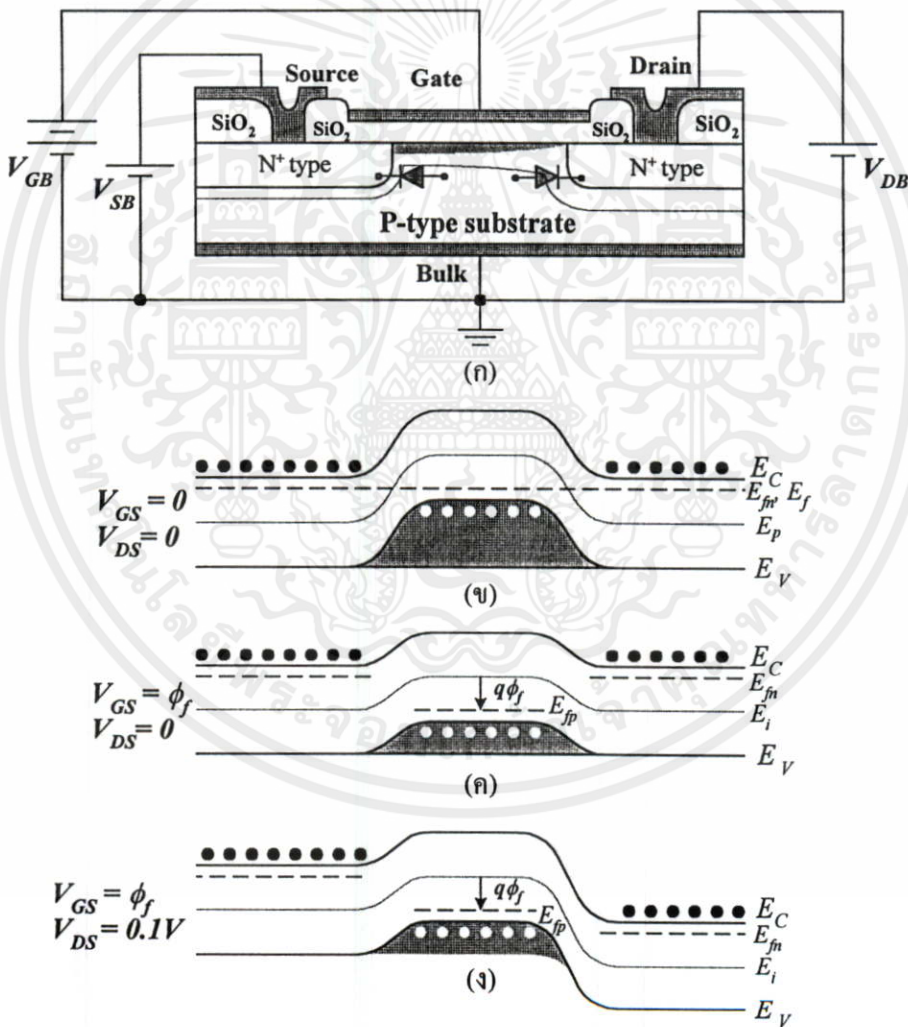


รูปที่ 2.27 การกระจายตัวของความหนาแน่นอิเล็กตรอน เมื่อได้รับการไบแอส V_{DS} เปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่ไบแอส V_{DS}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถ้าพิจารณาเฉพาะการไบแอส V_{GS} เพียงอย่างเดียวอาจทำให้รู้สึกว่าการแรงดัน V_{GS} ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประจุอินเวอร์ชันสะสมมากขึ้น ช่องทางเดินกระแสมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมากขึ้น การแพร่ด้วยกระบวนการดิฟฟิวชันน่าจะลดลงเพราะความแตกต่างของประจุที่ฉีดข้ามรอยต่อ

กับประจุในช่องทางเดินกระแสมีน้อยลง แต่ในความเป็นจริงแล้วเมื่อพิจารณาการทำงานของรอยต่อ ภายใต้สภาวะไบแอสแรงดัน V_{DS} ก็จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า แม้ V_{GS} จะมีค่าสูงขึ้นเพียงใดก็ตาม ประจุนิเวอ์รชันที่ปลายช่องทางเดินกระแสด้านเดรนก็จะต้องเป็นศูนย์เนื่องจากได้รับอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ไบแอสย้อนกลับ เช่นเดียวกับกับกรณีปลายด้านซอร์ส การไหลของกระแสข้ามรอยต่อด้านซอร์สนั้นขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงศักย์ โดยความสูงของกำแพงศักย์จะขึ้นอยู่กับ V_{GS} และ V_{DS} เมื่อแรงดันค่าใดค่าหนึ่งสูงขึ้นก็จะทำให้ประจุเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาเทียบจากปลายด้านซอร์สมายังปลายด้านเดรน จะเห็นว่า การไบแอส V_{GS} จะทำให้ความแตกต่างความหนาแน่นประจุพาหะระหว่างปลายด้านเดรน และปลายด้านซอร์สมีก่ามากขึ้น จึงเป็นผลทำให้กระแสเดรนมีค่าสูงขึ้นไปด้วย



รูปที่ 2.28 แผนภาพแถบพลังงาน MOSFET ในสภาวะการทำงานนิเวอ์รชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงานของ NMOSFET ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มที่ได้อธิบายผ่านมาจะเห็นว่า มีลักษณะการทำงานคล้ายกับทรานซิสเตอร์แบบ BJT โดยการไหลของกระแสจะเป็นการฉีดประจุข้ามรอยต่อที่ไบแอสตรง จากนั้นจึงเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการแพร่ของประจุ และรวบรวมออกสู่อรอยต่อที่ไบแอสย้อนกลับ (Inject-Diffuse-Collect) แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความแตกต่างของการทำงานระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง โดยในระหว่างการทำงานส่วนเบส (base) ในทรานซิสเตอร์แบบ BJT จะมีความหนาแน่นประจุเพิ่มขึ้นทั้งอิเล็กตรอน และโฮล เนื่องจาก quasi-Fermi level ของประจุพาหะทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ส่วนเบสมีสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า (neutrality) แต่ไม่สมดุล (non-equilibrium) เนื่องจาก $pn \neq n_i^2$ การนำไฟฟ้าใน BJT จึงมีอิทธิพลของการเคลื่อนที่เนื่องจากประจุพาหะ 2 ชนิด แต่ในการทำงานของ MOST ในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มแล้วยังคงเป็นการนำไฟฟ้าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะเพียงชนิดเดียว แม้ว่าจะเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการดิฟฟิวชันเช่นเดียวกันก็ตาม

2.4.4 ความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม (Subthreshold slope)

คุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ใช้บอกถึงประสิทธิภาพการทำงาน MOSFET ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มคือ ความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม (Subthreshold slope หรือ Subthreshold swing : S_t) โดยมีนิยามว่าเป็นค่าแรงดันที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเดรณลดลง 10 เท่า สมการความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มสำหรับทรานซิสเตอร์แบบสมมาตรเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$S_t = \ln 10 \left[\frac{d \ln I_{D,sub}}{dV_{GB}} \right]^{-1} \quad (\text{V/decade}) \quad (2.74 \text{ ก})$$

$$= 2.3 \left(\frac{kT}{q} \right) \left(1 + \frac{C_s}{C_{OX}} \right) \quad (2.74 \text{ ข})$$

$$= 2.3 \left(\frac{kT}{q} \right) \left[1 + \frac{K_{Si} x_{OX}}{K_{OX} x_{dep}} \right] \quad (2.74 \text{ ค})$$

ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มนี้ใช้บอกถึงคุณสมบัติการใช้พลังงานของ MOSFET ถ้า S_t มีค่าน้อยหมายความว่า MOSFET สามารถเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่าง on และ off ในย่านวิคอินเวอร์ชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปสร้างวงจร CMOS ที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากขณะเข้าสู่สภาวะ off นั้นจะมีกระแสน้อย ในทางกลับกัน ถ้า S_t มีค่ามาก หมายความว่า การ

เปลี่ยนสถานะของ MOSFET รั่ว ซึ่งจะทำให้วงจร CMOS ใช้พลังงานในการทำงานมากขึ้น เนื่องจากขณะเข้าสู่สถานะ off นั้นจะมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์เป็นปริมาณมาก นอกจากนี้ค่า S_1 ยังบอกถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดที่วงจรสามารถทำงานได้อีกด้วย

จากสมการ (2.74) แสดงให้เห็นว่าค่าความชันก่อนแรงดันขีดเริ่มเป็นค่าที่ขึ้นตรงกับความจุไฟฟ้าภายในโครงสร้าง (C_{ox}) และความจุไฟฟ้าแฝงในการทำงาน (C_s) ขีดจำกัดในทางทฤษฎีของกระบวนการสร้างที่พยายามทำให้ค่าความชันก่อนแรงดันขีดเริ่มมีค่าต่ำที่สุด สามารถพิจารณาโดยพยายามทำให้ C_{ox} มีค่ามากที่สุด (โดยจะต้องสร้างออกไซด์ให้มีความหนาน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์) จะเป็นผลให้ได้ค่าความชันก่อนแรงดันขีดเริ่มต่ำที่สุด ($S_{t(min)}$) มีค่าเท่ากับ

$$S_{t(min)} = 2.3 \left(\frac{kT}{q} \right) \quad (2.75)$$

เมื่ออุณหภูมิทำงานของทรานซิสเตอร์เท่ากับ 298 K ค่าความชันการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มต่ำสุดจะมีค่าเท่ากับ 0.059 V/dec.

ในทางปฏิบัติแล้ว S_1 จะต้องมีความสูงกว่า 0.059 V/dec. เนื่องจากความหนาของชั้นออกไซด์ไม่เป็นศูนย์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น S_1 ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่ออุณหภูมิทำงานเท่ากับ 300 K NMOSFET ที่สร้างด้วยเทคโนโลยี Submicron จะมีค่า S_1 โดยทั่วไปเท่ากับ 100 mV/dec. เมื่อ V_{GS} ลดลง 0.6 V จะทำให้กระแสทรานซิสเตอร์ในการทำงานจะลดลงจาก 1 μ A ถึง 1 pA [18] นักออกแบบวงจรสามารถนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบวงจร เพื่อให้กระแสรั่วไหลขณะทำงานของทรานซิสเตอร์มีค่าต่ำกว่าที่ระบุไว้ โดยอาศัยการกำหนดแรงดันทำงานให้กับวงจรอย่างเหมาะสม

2.5 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงถึงหลักการการทำงานของ MOSFET และมุ่งทำความเข้าใจการทำงานของตัวอุปกรณ์ในสภาวะการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มเป็นหลัก โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานจากการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS แล้วพัฒนาต่อเป็นโครงสร้างไดโอดควบคุมด้วยเกต ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบครึ่งซีกของทรานซิสเตอร์แบบ MOS นอกจากนี้ยังได้แสดงที่มาของสมการกระแสทรานซิสเตอร์และการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเกต-ฐานรองในการทำงานย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มไว้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสมบัติพื้นฐานที่ใช้เป็นหลักสำหรับพิจารณาการทำงานในย่านนี้ประกอบไปด้วยขั้วขั้วด้านการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใด ๆ 1. ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของทางเดินกระแส (ϕ_s) มีค่าอยู่ในช่วง ϕ_f ถึง $2\phi_f$ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระแสทรานซิสเตอร์ที่ไหลในการทำงานช่วงนี้มีค่าน้อยมากในระดับ 10^{-9} A และมีกระบวนการเคลื่อนที่ของกระแสด้วยกระบวนการแพร่ประจุ (diffusion)

3. แบบจำลองที่สามารถใช้ทำนายการทำงานของ MOSFET ในช่วงนี้คือ Charge-Sheet model และ Pao-Sah Model
4. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) และแรงดันอินพุต (V_{GS}) เป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล

สำหรับส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้งาน ช่วงสับเทรตโวลต์มีกระแสเอาต์พุตต่ำจึงไม่เหมาะที่จะใช้ขับอุปกรณ์กำลัง แต่ด้วยข้อดีที่มีกระแสรั่วไหล (Leakage current) ต่ำกว่าช่วงการทำงานเหนือแรงดันขีดเริ่มมาก การทำงานในช่วงนี้จึงมีสถานะ normally off ที่ดี เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ (Low-power applications) เช่น วงจรหน่วยความจำแบบ memory-cell capacitors เพราะจะช่วยเพิ่มเวลาในการคายประจุไฟฟ้า หรืออาจจะนำไปใช้กับระบบที่ใช้แบตเตอรี่ (Battery) เป็นส่วนจ่ายกำลัง ซึ่งจะช่วยให้ใช้งานแบตเตอรี่ได้นานขึ้น การทำงานในย่านนี้ยังมีบทบาทสำคัญกับเทคโนโลยีที่ต้องการเชื่อมระบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับระบบประสาทของสิ่งมีชีวิต เพราะว่าการทำงานของระบบประสาทเป็นการเคลื่อนที่ของสารประกอบไอออนที่มีกระแสและแรงดันต่ำมาก การตรวจจับสัญญาณรูปแบบนี้จึงเหมาะที่จะใช้ MOSFET ที่ทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่มเป็นส่วนตรวจจับสัญญาณเนื่องจาก MOSFET มีอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก (เท่ากับอิมพีแดนซ์ของออกไซด์) นอกจากนั้นการทำงานย่านนี้ยังสามารถตรวจจับสัญญาณขนาดเล็กที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มได้ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้อยู่ในขั้นตอนของการศึกษา และพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ซิลิคอน และผลของอะตอมสารเจือทองคำ

เนื้อหาภายในบทที่ 2 ได้แสดงถึงทฤษฎีการนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่ม การที่จะใช้ทฤษฎีดังกล่าวอธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำเป็นต้องเข้าใจคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาสร้างทรานซิสเตอร์เสียก่อน เนื่องจากทรานซิสเตอร์แบบ MOS และ MOIS นั้นมีความแตกต่างที่สำคัญคือ ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ได้รับการเติมอะตอมทองคำเข้าไปในฐานรองเพิ่มขึ้น และอะตอมทองคำที่เติมลงไปจะประพติดตัวเป็น deep impurity ทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS แตกต่างไปจากทรานซิสเตอร์แบบ MOS

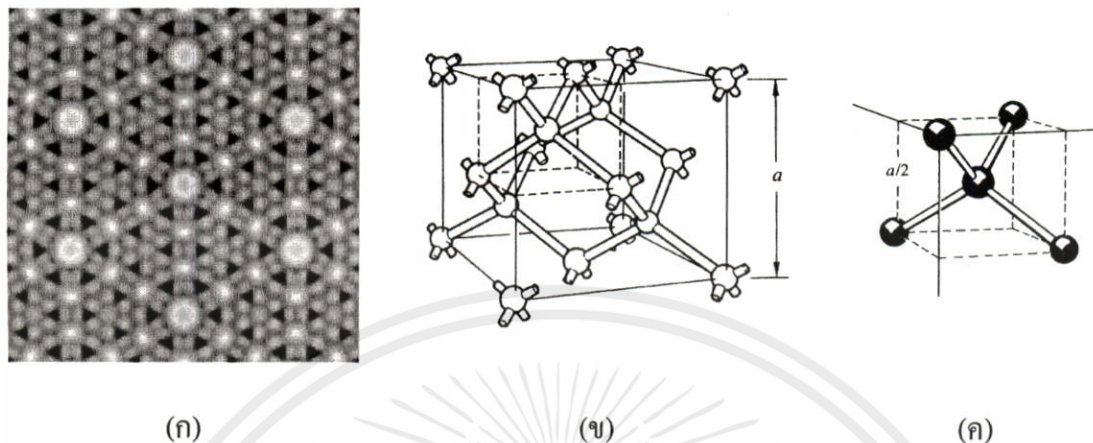
เนื่องจากทฤษฎีของซิลิคอนนั้นเป็นพื้นฐานที่มีอยู่ในหนังสือเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำทั่วไป ดังนั้นในบทนี้จะไม่แสดงถึงรายละเอียดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนทั้งหมด แต่จะยกมาเฉพาะคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของซิลิคอนที่มีผลของอะตอมทองคำมาเกี่ยวข้อง สำหรับสมการพื้นฐานที่ใช้ในบทนี้จะนำมาใช้โดยไม่พิสูจน์ รายละเอียดที่มาของสมการพื้นฐานเหล่านี้สามารถหาอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงท้ายเล่ม

เนื้อหาที่จะนำเสนอในบทนี้จะประกอบได้ด้วย 2 หัวข้อด้วยกัน คือ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนบริสุทธิ์ และคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเติมอะตอมสารเจือต่างชนิดกัน โดยจะให้ความสำคัญกับอะตอมสารเจือทองคำเป็นพิเศษ

3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน

ซิลิคอน (Silicon) เป็นธาตุลำดับที่ 14 ในตารางธาตุ มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานของอะตอมโดยที่ระดับวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนเป็นจำนวน 4 อนุภาค การทำพันธะระหว่างอะตอมซิลิคอนด้วยกันเป็นพันธะแบบโควาเลนต์ (Covalent Bond) เมื่ออิเล็กตรอนในระดับวาเลนซ์ทำพันธะกันจนครบ การจัดเรียงตัวของพันธะจะเป็นแบบ Tetrahedral ทำให้รูปร่างของโครงผลึกเป็นแบบเดียวกับเพชร (Diamond Structure) ซึ่งเป็นรูปผลึกที่มีความแข็งแรงมาก ซิลิคอนที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์อาจจะอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว (Single Crystalline), ผลึกหลายระนาบ (Polycrystalline), หรือไม่เป็นผลึก (Amorphous) แต่สำหรับงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์แล้วจะใช้ซิลิคอนในรูปผลึกเดี่ยวเป็นส่วนมาก เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นให้การทำงานผิดไปจากที่ต้องการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์ประเภท MOS ที่ต้องใช้พื้นผิวในการนำกระแสจะต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ จึงเป็นสาเหตุที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้อุปกรณ์ที่มีฐานรองสร้างขึ้นมาจากระนาบ <100> เนื่องจากมีจำนวน

พันธะว่าง (Dangling Bond) น้อยกว่าระนาบอื่น คุณสมบัติทางผลึกของซิลิคอนแสดงอยู่ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.1 ภาพการจัดเรียงตัวของอะตอมซิลิคอนในโครงผลึก

- (ก) ภาพถ่ายการเรียงตัวของผลึกซิลิคอนในระนาบ<111> ด้วยกล้อง STM ขยายกำลังสูง
- (ข) แผนภาพการจัดเรียงตัวของอะตอมซิลิคอนในโครงผลึกแบบเพชร
- (ค) การจัดเรียงตัวของพันธะแบบ Tetrahedral

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติทางไฟฟ้า ซิลิคอนมีสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ในอุณหภูมิห้องแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งเจือปนภายในวัสดุ อย่างไรก็ตามซิลิคอนบริสุทธิ์ที่สร้างขึ้นได้จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ $10^7 \Omega\text{-cm}$ [19] คุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนจัดอยู่ในประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) กล่าวคือเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวน (Insulator) แต่ด้อยกว่าตัวนำ (Conductor) คุณสมบัติประการสำคัญที่จะต้องพิจารณาเมื่อนำซิลิคอนไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ ก็คือ ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของวัสดุ

กระแสไฟฟ้ามินิยามว่าเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แน่นอนทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ปริมาณกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านวัสดุชนิดหนึ่งๆได้นั้น ถ้าพิจารณาโดยนิยามแล้วจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ส่วนด้วยกันได้แก่ จำนวนประจุอิสระเคลื่อนที่ และความเร็วของการเคลื่อนที่ของประจุ

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประจุพาหะภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมิต่ำ

ความหนาแน่นของประจุพาหะเป็นคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยของกระบวนการพลวัต (Dynamic Process) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำที่ค่าหนึ่ง เมื่อพิจารณาสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ผลึกมีความสมบูรณ์โดยตลอด จะมีการสร้างคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน และ โฮลอยู่

ตลอดเวลานั้นอยู่กับตำแหน่งของเนื้อวัสดุสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่พิจารณา และองค์ประกอบจาก อุณหภูมิแวดล้อม ผลของอุณหภูมิที่มีต่อโครงผลึกนั้นอาจทำให้โครงผลึกเกิดการสั่นตัว หรือเกิดการแผ่รังสีความร้อน เพื่อสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล พลังงานจากอุณหภูมิส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปสำหรับ ทำลายพันธะวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้เงื่อนไขแวดล้อมอื่นคงที่ โอกาสการทำลายพันธะต่อหน่วยเวลา จะเกิดขึ้นเป็นกระบวนการแบบสุ่มตามการกระตุ้นจากอุณหภูมิ กำหนดให้อัตราการทำลายพันธะ ในวัสดุอุดมคตินี้เท่ากับ G_{inh} (pairs.cm⁻³.s⁻¹) พึงสังเกตว่าในสภาวะสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกที่สมบูรณ์ $G_{inh}(T)$ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น (ภายใต้สิ่งแวดล้อมอื่นที่ไม่เปลี่ยนแปลง)

การพิจารณาค่า $G_{inh}(T)$ ของวัสดุจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ถ้าสารกึ่งตัวนำมีอะตอมสาร เจือผู้ให้ (Donor Atoms) หรืออะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor Atoms) ปะปนมา สมมุติว่าอะตอมสาร เจือผู้ให้ที่เพิ่มขึ้นมีความหนาแน่น N_D (atom.cm⁻³) และอะตอมสารเจือเหล่านี้ให้อิออนไนซ์ทั้งหมด ภายใต้อุณหภูมิที่พิจารณา ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ N_D จะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของ อะตอมซิลิคอนในผลึกปกติเป็นอย่างมาก ดังนั้นอะตอมสารเจือจึงไม่ส่งผลกระทบต่อให้ลดการแตก ตัวของพันธะเนื่องจากผลของอุณหภูมิ หรือไม่ได้ส่งผลทำให้โครงผลึกเกิดการสั่นเนื่องด้วย อุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ถ้า N_D ไม่มากจนเกินไป จะสามารถพิจารณาได้ว่าอัตราการแตกของ พันธะเนื่องจากอุณหภูมิในกรณีนี้จะเท่ากับสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกที่อุณหภูมิเดียวกัน $G_{inh}(T)$

กระบวนการย้อนกลับของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เรียกว่า กระบวนการรวมตัว (recombination) โดยทั้งกระบวนการเกิดคู่ประจุพาหะ และกระบวนการรวมตัวจะขึ้นพร้อมกัน กระบวนการรวมตัวเป็นผลจากการที่อิเล็กตรอนอิสระในแถบคอนดักชัน (Conduction electron) สูญเสียพลังงานที่ได้จากการให้อิออนไนซ์ตกกลับมาทำพันธะกับอะตอมอีกครั้ง ในวัสดุที่พิจารณา อยู่นี้ สมมติให้มีค่าการรวมตัวเท่ากับ R , มีหน่วยเป็น จำนวนครั้งต่อปริมาตรต่อเวลา R , จะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลในสภาวะสมดุลอุณหภูมิ, ชนิดของสารกึ่งตัวนำ และ อุณหภูมิทำงาน กำหนดให้ความหนาแน่นประจุพาหะในสภาวะสมดุลอุณหภูมิมีสัญลักษณ์เป็น n_0 ในกรณีของอิเล็กตรอน และ p_0 ในกรณีของโฮล การเคลื่อนที่มาพบกันของประจุพาหะทั้งคู่ทำให้เกิดการรวมตัวขึ้น อัตราการรวมตัว คือ ความถี่ที่อิเล็กตรอน และโฮลเคลื่อนที่พบกัน โดยจะขึ้นอยู่กับจำนวนประจุพาหะแต่ละชนิดที่มีอยู่นั้นเอง การรวมตัวจะทำให้สูญเสียประจุพาหะทั้งคู่ไป โดย เหลือทิ้งไว้เพียงพลังงาน และโมเมนตัม สิ่งแวดล้อมทางพลวัตของการพบกันจะเป็นตัวกำหนด ระยะเวลาที่อิเล็กตรอนแตกออกจากพันธะจนกลับเข้าทำพันธะกับอะตอมแล้วปลดปล่อยพลังงาน ออกมา ซึ่งเป็นสภาวะเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของประจุพาหะเนื่องจากผลของอุณหภูมิ

การที่มีอะตอมสารเจือที่ให้อิออนไนซ์ได้ทั้งหมด เช่น อะตอมสารเจือผู้ให้ ในปริมาณความ หนาแน่นต่ำ ในทางปฏิบัติแล้วไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อโดยตรงกับการรวมตัว เนื่องจากการเพิ่ม ความหนาแน่นของประจุพาหะชนิดใดชนิดหนึ่งจะมีผลต่อโอกาสการชนกันระหว่างประจุพาหะทั้ง สอง แต่การมีอะตอมสารเจือเล็กน้อยไม่พอที่จะทำให้หน่วยสำคัญของการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยมาก จึง

ไม่อาจสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของอัตราการรวมตัว ดังนั้นถึงแม้ว่า ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำจะมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือแต่หลายชนิดและมีความหนาแน่นแตกต่างกันหลายค่าผสมอยู่ แต่เนื่องจากเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยจึงทำให้อัตราการรวมตัวของชั้นสารกึ่งตัวนำตัวอย่างเหล่านั้นเท่ากับสารกึ่งตัวนำอินทรีนิก $R_i(n_o, p_o, T)$ ภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมิจำเลยความหนาแน่นประจุพาหะของชั้นสารกึ่งตัวนำใด ๆ จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นโดยเฉลี่ยแล้ว ในสภาวะสมดุล อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเท่ากับอัตราการรวมตัวของคูพาหะ

$$G_{ith}(T) = R_i(n_o, p_o, T) \quad (3.1 ก)$$

เมื่อกำหนดให้ n_o และ p_o ในฟังก์ชันมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยควบคุมให้ T คงที่ จะสามารถใช้ออนุกรม Taylor กระจาย R_i ในรูป 2 ตัวแปรได้เป็น

$$R_i(n_o, p_o, T) = a_i(T) + b_i(T)n_o + c_i(T)p_o + r_i(T)n_o p_o + e_i(T)n_o^2 p_o + f_i(T)n_o p_o^2 + \dots \quad (3.1 ข)$$

แต่เนื่องจากกระบวนการรวมตัวต้องอาศัยประจุพาหะเป็นคู่ การมีประจุพาหะเพียงชนิดเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการรวมตัวได้ ดังนั้น $a_i(T) = b_i(T) = c_i(T) = 0$ ซึ่งโดยปกติแล้วสารกึ่งตัวนำจะมีความหนาแน่นประจุพาหะในปริมาณเล็กน้อย เพราะฉะนั้นจึงสามารถแทนชุดตัวแปรในสมการ (3.1ข) ใน Term ที่ไม่เท่ากับศูนย์ และมีค่ามากที่สุดลงในสมการ (3.1ก) ได้เป็น

$$G_{ith}(T) = r_i(T)p_o n_o \quad (3.2 ก)$$

หรือ

$$p_o n_o = \frac{G_{ith}(T)}{r_i(T)} \quad (3.2 ข)$$

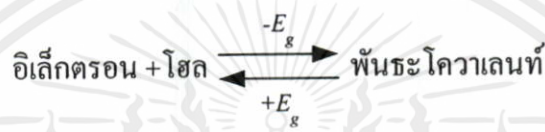
เนื่องจากสมการ (3.2ข) ใช้อธิบายได้เฉพาะคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีนิก และ $p_o = n_o$ ถ้ากำหนดให้ n_i แทนความหนาแน่นอิเล็กตรอน หรือความหนาแน่นของโฮลนำกระแส ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนิก จะสามารถเขียนสมการ(3.2ข) ใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบสงวนลิขสิทธิ์ $\frac{G_{ith}(T)}{r_i(T)} = n_i^2$ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง (3.2 ค) นำไปใช้

จากสมการจะสังเกตเห็นได้ว่าในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์แล้ว n_i เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเท่านั้น และในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก ความหนาแน่นประจุพาหะทั้งสองล้วนเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเช่นกัน $p_o = n_o = n_i(T)$ จากสมการ (3.2 ข) และ (3.2 ค) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$p_o n_o = n_i^2(T) \quad (3.3)$$

สมการที่ได้นี้ในทางเคมีเรียกว่า Mass action law โดยใช้อธิบายการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะสมดุล ซึ่งสามารถเขียนการสร้าง-ทำลาย คู่อิเล็กตรอน-โฮลในรูปของปฏิกิริยาเคมีได้เป็น



E_g คือ พลังงานที่ใช้ในการไอออนไนซ์อิเล็กตรอนไปยังแถบคอนดักชัน ซึ่งเท่ากับความกว้างของแถบหวงห้ามนั่นเอง

แม้ว่าสมการที่ (3.3) จะหาโดยอาศัยแนวความคิดจากสารกึ่งตัวนำอินทรินสิก แต่สมการที่ได้ก็เป็นจริงในกรณีสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิกด้วยเช่นกัน ถึงแม้ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก ประจุพาหะที่เกิดการไอออนไนซ์เป็นส่วนหนึ่งมาจากอะตอมสารเจือ แต่ที่มาของ Mass action law ไม่ได้มีผลกระทบจากสถานะของสารเจือไอออนไนซ์ จากสมการ (3.3) พอที่จะพิจารณาได้ว่าการเติมอะตอมสารเจือ เช่น การเพิ่มอะตอมสารเจือผู้ให้ลงไปในสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกจะทำให้ $n_o > n_i$ และเป็นผลทำให้ $p_o < n_i$ ด้วยเช่นกัน จึงเป็นการป้องกันมิให้อิเล็กตรอนนำกระแสเกิดการรวมตัวกับโฮลเร็วกว่าอัตราการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่คงที่ตามอุณหภูมิ ในกรณีของการเติมอะตอมสารเจือผู้รับลงในสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกก็สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน

ความหนาแน่นประจุในสภาวะสมดุลสามารถหาได้จากการรวมผลคูณระหว่างความน่าจะเป็นในการพบประจุพาหะชนิดนั้นกับความหนาแน่นสถานะพลังงานตลอดช่วงสถานะพลังงานที่พิจารณา สมการทั่วไปของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลสำหรับสารกึ่งตัวนำเป็นดังนี้

$$n = N_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_c) \quad (3.4 ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 2. ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p = N_v \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_v) \quad (3.4 ข)$$

โดย N_C = the effective density of conduction band states

$$= 2 \left[\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right]^{3/2}$$

N_V = the effective density of valance band states

$$= 2 \left[\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right]^{3/2}$$

$F_{1/2}(\eta_C)$ = the Fermi-Dirac integral of order $1/2$

$$= \int_0^{\infty} \frac{\eta^{1/2} d\eta}{1 + e^{\eta - \eta_C}}$$

เมื่อ $\eta = \frac{E - E_C}{kT}$, $\eta_C = \frac{E_f - E_C}{kT}$ และ $\eta_V = \frac{E_V - E_f}{kT}$

จากสมการ (3.4) ไม่สามารถทำการจัดรูปความสัมพันธ์ $F_{1/2}(\eta_{C,V})$ ให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ เพื่อความสะดวกในการคำนวณหาความหนาแน่นประจุพาหะจึงจะต้องทำการประมาณโดยอาศัยเงื่อนไข non-degenerate ที่ว่า $E_V + 3kT \leq E_f \leq E_C - 3kT$ จะถือว่าสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ มีค่าประมาณของ $F_{1/2}(\eta_{C,V})$ เป็น

$$F_{1/2}(\eta_C) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_f - E_C)/kT} \quad (3.5 ก)$$

$$F_{1/2}(\eta_V) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{(E_V - E_f)/kT} \quad (3.5 ข)$$

แทนค่าการประมาณจากสมการ (3.5 ก) และ (3.5 ข) ลงในสมการ (3.4 ก) และ (3.4 ข) จะได้สมการความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลในการนำกระแสสำหรับ non-degenerate semiconductor เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$n = N_C e^{(E_f - E_C)/kT} \quad (3.6 ก)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดสลับลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีให้นำไปใช้

$$p = N_V e^{(E_V - E_f)/kT} \quad (3.6 ข)$$

เมื่อนำสมการ (3.6 ก) และ (3.6 ข) มาคูณกันจะได้

$$pn = N_C N_V e^{(E_V - E_C)/kT}$$

$$pn = N_C N_V e^{-(E_g)/kT}$$

ซึ่งจะพบว่าผลคูณระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลจะไม่ขึ้นอยู่กับ E_f ดังนั้นการที่ไม่มี E_f ในสมการผลคูณความหนาแน่นประจุพาหะทั้งสองจึงสามารถแสดงได้ชัดเจนว่า Mass action law จะเป็นจริงโดยไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณสารคือในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเขียนสมการ (3.3) ในรูปความสัมพันธ์กับความกว้างของแถบหวงห้ามได้เป็น

$$n_i^2(T) = N_C N_V e^{-(E_g)/kT} \quad (3.7)$$

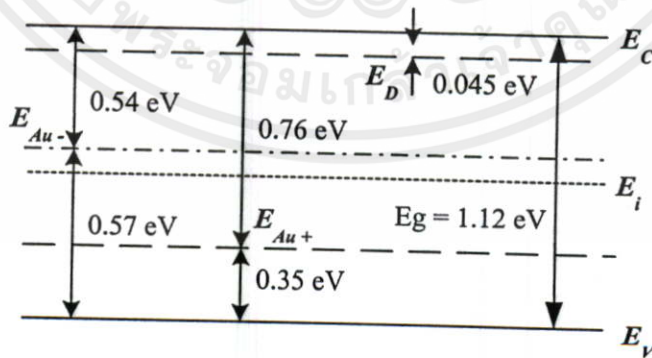
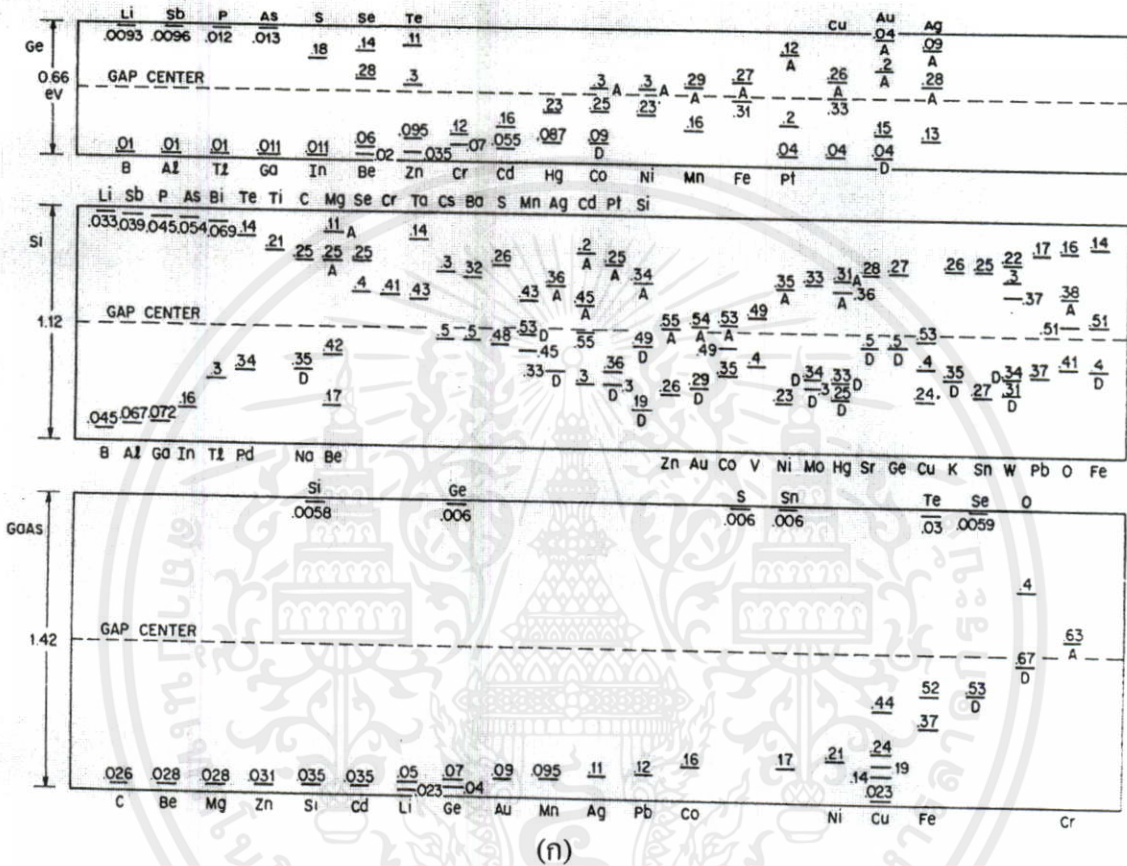
3.3 คุณสมบัติของอะตอมทองคำในซิลิกอน

สำหรับซิลิกอนการที่มีอะตอมทองคำแทรกอยู่ในโครงผลึกนั้นจะทำให้เกิดเป็น deep impurity¹ สถานะภาพของอะตอมทองคำจะทำให้เกิดสถานะภายในแถบหวงห้ามที่อยู่ห่างจากขอบของแถบพลังงานทั้งสองโดยอะตอมทองคำ 1 อะตอมสามารถแสดงสถานะเป็นอะตอมสารเจือผู้รับ โดยมีสถานะพลังงานอยู่สูงกว่าขอบของแถบวาเลนซ์ (E_v) 0.57 eV หรือแสดงสถานะเป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ โดยมีสถานะพลังงานอยู่ต่ำกว่าแถบคอนดักชัน (E_c) 0.76 eV ก็ได้ อะตอมสารเจือที่เป็นได้ทั้งอะตอมสารเจือผู้ให้และอะตอมสารเจือผู้รับมีชื่อเรียกว่า Amphoteric impurity [7] [20] [21] [22] [23] [24] ระดับสถานะของอะตอมสารเจือทองคำในแถบหวงห้ามของซิลิกอนแสดงดังรูป 3.2

อะตอมทองคำ 1 อะตอมไม่สามารถแสดงสถานะภาพเป็นอะตอมสารเจือผู้รับ และอะตอมสารเจือผู้ให้ได้พร้อมกัน ในสภาวะหนึ่งๆ อะตอมทองคำจะอยู่ในสถานะภาพอะตอมผู้ให้ หรืออะตอมผู้รับอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากสถานะผู้รับอยู่ใกล้กับแถบความนำ อะตอมทองคำในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น จะทำหน้าที่เป็นสถานะผู้รับเพื่อจับอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นประจุพาหะข้างมาก

¹ deep impurity เป็นลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกสารกึ่งตัวนำที่ทำให้เกิดสถานะพลังงานในแถบหวงห้าม โดยตำแหน่งของสถานะพลังงานอยู่ห่างจากขอบของแถบพลังงานมากกว่า $3kT$ [22] ซึ่งเป็นที่มาของชื่อสารเจือชนิดนี้ deep impurity อาจเกิดจากอะตอมสิ่งปนเปื้อน ภายในสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะธาตุที่เป็นโลหะทรานซิชัน หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วอะตอมสารเจือที่เป็น deep impurity จะมีมวลมาก และมีอะตอมขนาดใหญ่ deep impurity อาจทำหน้าที่เป็น trap center หรือ recombination center ก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ, อุณหภูมิ และ ความหนาแน่นของการโด๊ป [22]

พิจารณาเทียบเคียงจากระดับเฟอร์มิในกรณีนี้ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะอยู่เหนือระดับสถานะผู้รับของอะตอมทองคำเป็นผลทำให้ระดับสถานะผู้รับของอะตอมทองคำเกิดการไอออนไนซ์จับประจุลบซึ่งทำหน้าที่เป็นประจุพาหะข้างมากในขณะนี้ (สถานะที่อยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิจะมีโอกาสครอบครองอิเล็กตรอนสูงจึงทำให้สถานะผู้ให้ไม่เกิดการไอออนไนซ์)



รูปที่ 3.2 แผนภาพสถานะพลังงานของอะตอมสารเจือในแถบพลังงาน
 (ก) แสดงตำแหน่งสถานะพลังงานของอะตอมสารเจือชนิดต่างๆ ในแถบหวงห้าม [5]
 (ข) แสดงตำแหน่งสถานะพลังงานของซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อเติมอะตอมสารเจือทองคำ

เช่นเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี อะตอมทองคำจะทำหน้าที่เป็นอะตอมสารเจือผู้ให้ เมื่อเกิดการไอออนไนซ์จะทำให้ประจุพาหะข้างมาก ซึ่งก็คือโฮล มีจำนวนลดลง พิจารณาเทียบเคียงจากระดับเฟอร์มิ ในกรณีนี้ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะอยู่ต่ำกว่าระดับสถานะผู้ให้ของอะตอมทองคำ เป็นผลทำให้ระดับสถานะของอะตอมทองคำเกิดการไอออนไนซ์ให้ประจุลบ หรือจับโฮล ซึ่งเป็นประจุพาหะข้างมากในขณะนี้ (สถานะที่อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิจะมีโอกาสครอบครองอิเล็กตรอนได้น้อยทำให้ระดับผู้รับไม่เกิดการไอออนไนซ์) [7][24] ดังนั้นในการพิจารณาผลกระทบของอะตอมทองคำที่มีต่อสารกึ่งตัวนำเอ็กทริเนติกจะสามารถพิจารณาเป็นตัวจับประจุข้างมากโดยไม่ต้องสนใจสถานะพลังงานที่เหลือ อย่างไรก็ตามสถานะพลังงานดังกล่าวนี้ ก็ยังคงส่งผลกระทบต่อสารกึ่งตัวนำที่พิจารณาโดยมีผลกระทบมากขึ้นตามอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการพิจารณาด้วยวิธีการประมาณข้างต้น โดยไม่พิจารณาผลกระทบสถานะพลังงานของอะตอมทองคำที่อยู่ห่างระดับเฟอร์มิมาก ๆ เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของคณิตศาสตร์ ยกเว้นการคำนวณหาระดับเฟอร์มิของซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำเท่านั้นที่จะพิจารณาองค์ประกอบรวมทั้งหมด

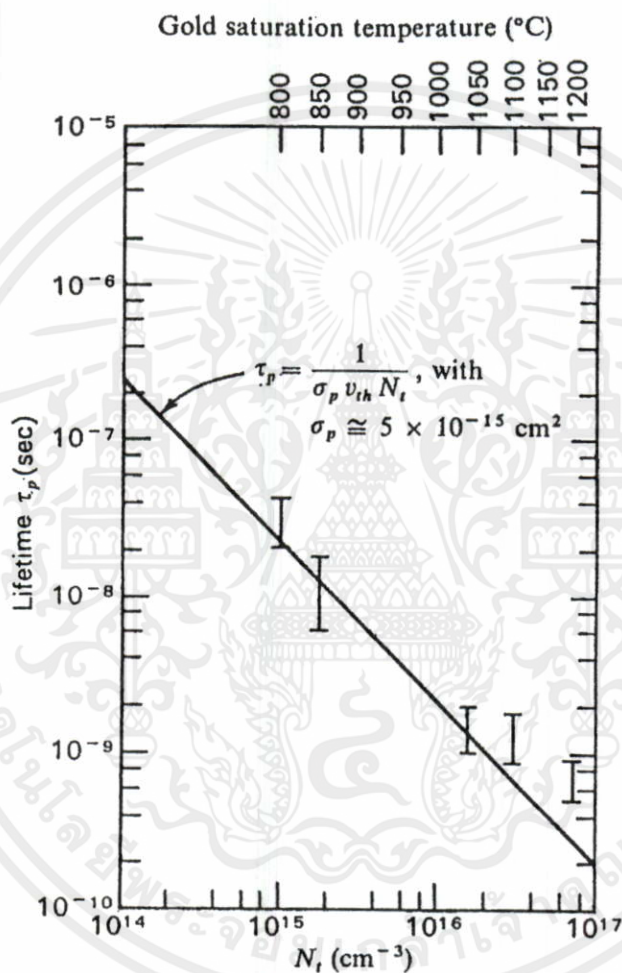
สารเจืออะตอมทองคำที่เติมลงในซิลิคอนนั้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดผลกระทบทางไฟฟ้ากับซิลิคอน 2 ประการคือ

- ทำให้ช่วงชีวิตของประจุพาหะข้างน้อย (minority carrier lifetime) ลดลง
- ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของซิลิคอนเอ็กทริเนติกมีค่าสูงขึ้น

การลดลงของค่าช่วงชีวิตประจุพาหะข้างน้อย เนื่องจากอะตอมสารเจือทองคำแสดงอยู่ในรูปที่ (3.3) การที่ช่วงชีวิตของประจุพาหะมีค่าลดลงเป็นผลเนื่องมาจาก อะตอมทองคำในซิลิคอนทำให้มีสถานะพลังงานอยู่ลึกเข้าไปในแถบหวงห้าม โดยที่สถานะพลังงานทั้งสองนี้อยู่ใกล้กับกึ่งกลางของแถบพลังงาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ Recombination center ที่ดีด้วยเหตุนี้ ซิลิคอนที่มีอะตอมทองคำเป็นสารเจือจะมีค่าช่วงชีวิตของประจุพาหะโดยเฉลี่ยต่ำกว่าผลึกซิลิคอนที่ไม่ได้เติมอะตอมทองคำ คุณสมบัติข้อนี้ได้นำไปใช้กับทรานซิสเตอร์เพื่อช่วยทำให้คุณสมบัติการสวิตซ์ซิ่งของทรานซิสเตอร์ในขอบข่ายทำได้เร็วขึ้น [21] [22] [23]

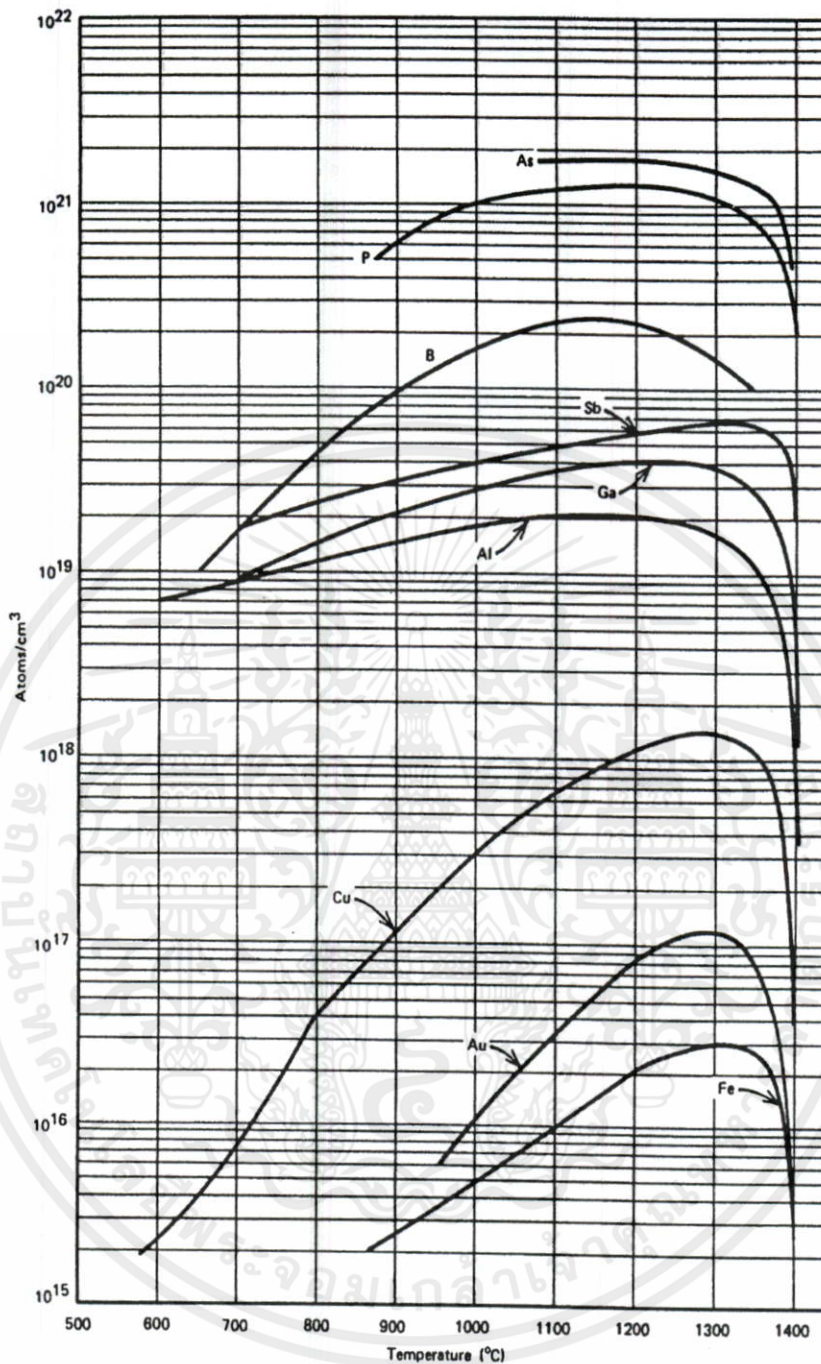
สภาพต้านทานไฟฟ้าของซิลิคอนเอ็กทริเนติกมีค่าสูงขึ้นนั้นเป็นผลเนื่องมาจาก สถานะพลังงานของอะตอมทองคำจับตัวประจุพาหะที่ใช้น้ำไฟฟ้าในวัสดุทำให้ ประจุพาหะที่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระมีจำนวนลดลงอย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นของอะตอมทองคำที่ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงนั้นจะต้องมีค่าสูงพอสมควร (ซึ่งต่างจากในการลดค่าช่วงชีวิตประจุพาหะ) ความหนาแน่นของอะตอมทองคำเป็นปริมาณเท่าใดที่จะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับสภาพต้านทานไฟฟ้าของซิลิคอนก่อนการเติมอะตอมทองคำ จากผลของงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ผลสรุปตรงกันเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานไฟฟ้า

เมื่อมีอะตอมทองคำคือ ซิลิคอนชนิดเอ็นจะตอบสนองการเปลี่ยนแปลงสภาพด้านทานไฟฟ้าได้ดีกว่าซิลิคอนชนิดพี [1] [23] [25] [26] ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากระดับผู้รับของอะตอมทองคำอยู่ห่างจากแถบพลังงานคอนดักชันมากกว่าระยะห่างของระดับผู้ให้ของอะตอมทองคำกับแถบวาเลนซ์ จึงทำให้การไอออนไนซ์จับประจุพาหะได้ในปริมาณที่มากกว่า เมื่อพิจารณาสภาวะที่ความหนาแน่นอะตอมทองคำเท่ากัน



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงชีวิตของโฮล และความหนาแน่นของอะตอมทองคำในซิลิคอนชนิดเอ็น [7]

การที่สภาพด้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจะส่งผลต่อไปยังระดับเฟอร์มิของซิลิคอน โดยระดับเฟอร์มิจะมีแนวโน้มเคลื่อนเข้าใกล้กับกึ่งกลางแถบพลังงาน เป็นผลทำให้ซิลิคอนเข้าใกล้สภาวะอินทรีนสิกมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติในข้อนี้เป็นคุณสมบัติที่ใช้สร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ได้โดยง่าย ไม่จำเป็นต้องสร้างบ่อแยกสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.4 ความสามารถในการซึมผ่านของแข็งของสารเจือชนิดต่าง ๆ ในโครงผลึกซิลิคอน [22]

3.3.1 สารเจืออะตอมทองคำในซิลิคอน

อะตอมทองคำที่ผสมอยู่ในซิลิคอนถือเป็นสิ่งแปลกปลอมในโครงผลึกจัดอยู่ในรูปสิ่งแปลกปลอมทางเคมี (Chemical point defects) เช่นเดียวกับสารเจือแบบอื่น ๆ การเคลื่อนที่ของอะตอมทองคำเข้าไปในโครงผลึกซิลิคอนโดยอาศัยการจับเคลื่อนด้วยอุณหภูมินั้น เมื่อเทียบกับสารเจือชนิดอื่น ๆ จะพบว่าทองคำมีความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าไปในซิลิคอนได้ดีกว่า (สังเกตได้จากความชันของกราฟ) ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 3.4 จึงทำให้สามารถโคปอะตอมทองคำได้หลาย

ความหนาแน่น และเนื่องจากอะตอมทองคำไม่รวมตัวกับซิลิคอนเป็นสารประกอบ ทำให้อะตอมทองคำทำหน้าที่เป็น deep impurity เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลแทรกซ้อนจากสารประกอบจากโครงสร้างผลึก

การเคลื่อนที่ของอะตอมทองคำในผลึกซิลิคอนนั้นเป็นแบบ Interstitial-Substitutional Diffusion (ผสมผสานระหว่างการแทรกตัวและการแทนที่) การแพร่ในตอนแรกจะใช้การแทรกตัวผ่านช่องว่างของอะตอมด้วยความเร็วของ Interstitial Diffusion เมื่อเข้าไปในผลึกได้แล้วอะตอมทองคำมีขนาดใหญ่กว่าซิลิคอนมากจึงสามารถกระแทกอะตอมซิลิคอนออกแล้ววางตัวอยู่ในสถานะแทนที่ (Substitutional Sites) พันธะกับอะตอมซิลิคอนข้างเคียงในโครงสร้างผลึก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ความสามารถในการแพร่ของอะตอมทองคำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ให้ในระหว่างกระบวนการแพร่และปริมาณสารเจือปนที่มีอยู่ในซิลิคอน โดยหลักการทั่วไปสารเจือที่วางตัวในโครงสร้างผลึกแบบ Substitutional จะมีผลกระทบกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างผลึก ส่วนสารเจือที่วางตัวแบบ Interstitial จะไม่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง เมื่ออะตอมทองคำแพร่ลงไปในผลึกซิลิคอน 90 % โดยประมาณ จะวางตัวในโครงสร้างผลึกแบบ Substitutional [22] แสดงว่าอะตอมทองคำเกือบทั้งหมดที่แพร่ลงในผลึกจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน



รูปที่ 3.5 Interstitial-substitutional diffusion by the kick-out mechanism [22]

การเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมทองคำจะมีอิเล็กตรอนเหลืออยู่ในแถบวาเลนซ์เพียงอนุภาคเดียว สารเจือชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่ม Monovalent impurity เมื่ออะตอมทองคำเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกแบบ Substitutional อะตอมทองคำซึ่งในขณะนี้เป็นกลางทางไฟฟ้าจะทำพันธะโควาเลนต์กับอะตอมซิลิคอนข้างเคียง แต่เนื่องจากธาตุทรานซิชันสามารถรับอิเล็กตรอนได้อีกหลายอนุภาคดังนั้น อะตอมทองคำก็สามารถรับอิเล็กตรอนอิสระเข้าไปในตัวเองเพิ่ม ทำให้อะตอมทองคำในสถานะนั้นมีประจุเป็นลบ ซึ่งปริมาณของประจุจะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่รับเข้าไว้ในอะตอมลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดสถานะพลังงานหลายระดับ ระดับที่สนใจในวิทยานิพนธ์นี้ คือ ระดับ

สถานะที่ให้อิเล็กตรอน 1 อนุภาค (อิเล็กตรอนที่ทำพันธะกับโครงผลึกซิลิคอน) และระดับที่รับอิเล็กตรอน 1 อนุภาค ส่วนระดับที่รับอิเล็กตรอนมากกว่า 1 ตัวนั้นจะอยู่สูงกว่าแถบคอนดักชัน ซึ่งในกรณีนั้นอะตอมทองคำจะสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับแถบคอนดักชันไป

คุณสมบัติประการสำคัญของแต่ละสถานะพลังงานจากสารเจือก็คือ ความหนาแน่นของแต่ละสถานะพลังงาน ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับความสามารถในการซึมผ่านของแข็งของสารเจือ (Solid Solubility) คุณสมบัติข้อนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแล้วยังขึ้นอยู่กับระดับเฟอร์มิเดิมของฐานรองสารกึ่งตัวนำอีกด้วย [22] [25] ซึ่งระดับเฟอร์มิเดิมของฐานรองเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของอะตอมสารเจือที่มีอยู่เดิม ในกรณีของอะตอมทองคำจะมีสถานะภาพอยู่ภายในผลึกซิลิคอนอยู่ 3 สถานะ ได้แก่ สภาวะประจุบวก (Au^+) เนื่องจากระดับผู้ให้ปล่อยอิเล็กตรอนออกไปจากอะตอม, สภาวะประจุลบ (Au^-) เนื่องจากระดับผู้รับจับอิเล็กตรอนเข้ามาอยู่ในอะตอม, และสภาวะเป็นกลาง (Au^0) อะตอมทองคำไม่เกิดการไอออนไนซ์ เขียนเป็นความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาได้เป็น



จากการสมดุลมวล ภายใต้สภาวะสมดุลจะมี k_1 และ k_2 เป็นค่าคงที่ของปฏิกิริยา

$$k_1 = \frac{[Au^0]n}{[Au^-]} \quad (3.8 ก)$$

$$k_2 = \frac{[Au^0]p}{[Au^+]} \quad (3.8 ข)$$

เมื่อเทียบกับในกรณีของฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีนติก โดยใช้สัญลักษณ์ i แทนความหนาแน่นของส่วนต่างๆ ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_i = \frac{[Au^0]_i n_i}{[Au^-]_i} \quad (3.9 ก)$$

$$k_2 = \frac{[Au^0]_i n_i}{[Au^+]_i} \quad (3.9 \text{ ข})$$

ในอุปกรณ์ทั่วไปที่สถานะของสารเจือมีหลายรูปแบบและมีสารเจือหลายชนิดจะมีการกระจายตัวของสารเจือในลักษณะที่ให้สนามไฟฟ้ารูปแบบเฉพาะตัว แต่ในสถานะสมดุลของการกระจายตัวของสถานะที่เป็นกลาง Au^0 ไม่ได้มีผลกับสนามไฟฟ้านี้ และยังไปกว่านั้นค่าความหนาแน่นถูกกำหนดโดยแหล่งให้ทองคำภายนอกเท่านั้น ด้วยเหตุนี้สามารถสรุปได้ว่า

$$[Au^0] = [Au^0]_i \quad (3.10)$$

ในกรณีที่แหล่งให้อะตอมทองคำจากภายนอกไม่จำกัด สามารถเทียบความหนาแน่นของอะตอมสารเจือทองคำในแต่ละสถานะ เมื่อเติมลงในฐานรองสารกึ่งตัวนำใด ๆ กับฐานรองสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิกได้เป็น

$$[Au] = [Au^0] + [Au^-] + [Au^+] \quad (3.11 \text{ ก})$$

$$[Au] = [Au^0]_i + [Au^-]_i \frac{n}{n_i} + [Au^+]_i \frac{p}{n_i} \quad (3.11 \text{ ข})$$

จากสมการ (3.11 ก) และ (3.11 ข) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความสามารถในการซึมผ่านของแข็งของสารเจือที่มีหลายสถานะจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับระดับความหนาแน่นของสารเจือเดิมก่อนที่จะทำการเติมอะตอมทองคำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

เนื่องจากค่าความสามารถในการซึมผ่านของแข็งของอะตอมทองคำมีค่าสูงกว่าสารเจือชนิดอื่นประมาณ 5 เท่า ดังนั้นการโคปอะตอมทองคำจึงต้องทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างอุปกรณ์ การเติมอะตอมทองคำด้วยกระบวนการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. นั้น กระทำโดยการระเหยทองคำไปที่ด้านหลังของแผ่นเวเฟอร์ (wafer) ภายใต้สภาวะความดันต่ำประมาณ 1.6×10^{-6} ทอร์ (Torr) หลังจากนั้นทำการขัปลีกทองคำที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที แล้วทำให้เข้าสู่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็ว เมื่อหยุดการแพร่ของอะตอมทองคำ การโคปด้วยวิธีการเช่นนี้จะทำให้ผิวหน้าของซิลิคอนกลายเป็น liquid gold-silicon alloy และทำลายโครงสร้างผลึกบริเวณผิวหน้าของซิลิคอน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไม่สามารถโคปทองคำด้านหน้าของแผ่นเวเฟอร์ได้

จากการแพร่ระลอกของค่าที่ได้อธิบายผ่านมาจะพบว่าในกระบวนการสร้างจะควบคุมการกระจายตัวของอะตอมของค่าได้ลำบาก เนื่องจากคุณสมบัติเดี่ยวที่ควบคุมการกระจายตัวของอะตอมของค่าด้วยกระบวนการสร้างได้ก็คือ อุณหภูมิ แต่ความไม่สมบูรณ์ของแผ่นเวเฟอร์ไม่ว่าจะมีสาเหตุจากอะตอมสารเจืออื่น หรือจากรอยบิดตัวในโครงสร้าง ล้วนแล้วแต่มีผลกระทบกับการกระจายตัวของค่าโดยตรง นอกจากนี้ในขั้นตอนการ Quenching ยังทำให้การกระจายตัวของอะตอมของค่าเปลี่ยนแปลงไปได้มากถ้าทำการลดอุณหภูมิลงไม่เร็วพอ ด้วยเหตุนี้การนำคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่โคปด้วยของค่ามาเปรียบเทียบกันในบางครั้ง จะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันพอสมควร อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ได้จากการเติมของค่าเพิ่มขึ้นนั้นควรที่จะทำให้ผลลัพธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

3.3.2 ระดับเฟอร์มิของซิลิคอนเมื่อทำการเติมสารเจือของค่า

ระดับเฟอร์มิ (Fermi Level) เป็นระดับที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเป็นระดับที่แสดงความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ในสถานะอุณหภูมิศูนย์เคลวิน สถานะต่าง ๆ ที่อยู่เหนือระดับนี้จะเป็นสถานะว่าง (Empty States) ส่วนสถานะที่มีพลังงานต่ำกว่าระดับนี้จะมีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่เต็ม (Fully States) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่ากึ่งกลางแถบพลังงาน ($E_g/2$) เล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เท่ากันของ Effective mass, m^* ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล ($m_h^* < m_e^*$: สำหรับซิลิคอน)

$$E_f (\text{intrinsic}) = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3kT}{q} \ln \frac{m_h^*}{m_e^*} \quad (3.12)$$

เมื่อทำการเติมสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะทำให้การกระจายตัวของประจุพาหะภายในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแสดงด้วยการเลื่อนตำแหน่งของระดับเฟอร์มิในระหว่างแถบหวงห้าม การเติมสารเจือในหมู่ III จากตารางธาตุลงในซิลิคอน อะตอมสารเจือจะประพฤติตัวเป็นผู้รับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสถานะในแถบหวงห้ามบริเวณใกล้กับแถบวาเลนซ์เพื่อรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เกิดเป็นโฮลที่สามารถนำกระแสได้ในแถบวาเลนซ์นั่นเอง สถานะเช่นนี้ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนตำแหน่งลงมาต่ำกว่า $E_f(\text{intrinsic})$ แต่ถ้าทำการเติมสารเจือหมู่ V จากตารางธาตุลงในซิลิคอน อะตอมสารเจือจะประพฤติตัวเป็นอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นผลให้เกิดสถานะในแถบหวงห้ามโดยวางตัวอยู่ใกล้กับแถบคอนดักชันเพื่อจ่ายอิเล็กตรอนให้กับแถบคอนดักชันเมื่อเกิดโอออนไนซ์ ทำให้เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระสามารถนำกระแสได้โดยการเคลื่อนที่ในแถบคอนดักชัน สถานะนี้ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนไปอยู่สูงกว่า $E_f(\text{intrinsic})$

ในสถานะที่ใช้งานจริงการปลูกปลีโดยไม่ให้มีสิ่งเจือปนนั้นไม่อาจกระทำได้ สิ่งเจือปนที่เหลือน้อยในโครงผลึกเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดเป็นสถานะภายในแถบหวงห้าม สารเจือชนิดหนึ่ง ๆ จะมีระดับสถานะที่แตกต่างกันดังแสดงในรูป 3.2 การหาระดับเฟอร์มิของซิลิคอนภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมิที่มีระดับพลังงานในแถบหวงห้ามหลายระดับนั้น สามารถหาได้โดยอาศัยหลักการ Principle of Detailed Balance ซึ่งมีใจความว่า ภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมิ กระบวนการทางฟิสิกส์หนึ่ง ๆ จะมีอัตราการเกิดกระบวนการเฉลี่ยเท่ากับอัตราการเกิดกระบวนการย้อนกลับ หรือกระบวนการทางฟิสิกส์หนึ่ง ไม่อาจขัดแย้งด้วยกระบวนการอื่น โดยแต่ละกระบวนการจะต้องสมดุลในตัวเอง

ด้วยหลัก Principle of detailed balance เมื่อนำมาพิจารณาระบบที่มี 2 สถานะ คือ i และ j โดยให้ E_i และ E_j คือ พลังงานที่สถานะทั้งสองตามลำดับ ภายใต้สภาวะสมดุลอุณหภูมิ จำนวนอนุภาคเฉลี่ยต่อหน่วยปริมาตรของระบบที่เปลี่ยนสถานะจาก i ไป j ต่อหน่วยเวลา จะต้องเท่ากับการเปลี่ยนแปลงแบบย้อนกลับจากสถานะ j ไปยัง i จากหลักการดังกล่าวนี้ เมื่อพิจารณารวมเข้ากับ Pauli exclusion principle จะได้การกระจายตัวของอิเล็กตรอนเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายตัวของเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function)

$$f_j = \frac{1}{1 + e^{(E_j - E_f)/kT}} \quad (3.13)$$

สมการ (3.13) เป็นการพิจารณาฟังก์ชันการกระจายตัวของอนุภาคที่สถานะพลังงาน j ซึ่งการประพัตติตัวของอนุภาคเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเฟอร์มิ-ดิแรก โดย f_j คือ สัดส่วนการครอบครองอิเล็กตรอนเฉลี่ยในทุกสถานะ j จัดรูปสมการ (3.13) ให้อยู่ในรูป $f_j / (1 - f_j)$ ได้

$$\frac{f_j}{(1 - f_j)} = e^{(E_f - E_j)/kT} \quad (3.14 ก)$$

$$\frac{[N]f_j}{[N](1 - f_j)} = e^{(E_f - E_j)/kT}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $\frac{[N]_{(occupy)}}{[N]_{(empty)}} = e^{(E_f - E_j)/kT}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ $(3.14 ข)$ วิชาการด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะ ห้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ $[N]$ คือ ความหนาแน่นของสถานะ j ทั้งหมด
 $[N]_{(occupy)}$ คือ ความหนาแน่นของสถานะ j ที่มีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่
 $[N]_{(empty)}$ คือ ความหนาแน่นของสถานะ j ที่ไม่มีอิเล็กตรอนครอบครอง

และ

$$[N] = [N]_{(occupy)} + [N]_{(empty)} \quad (3.15)$$

จากสมการ (3.14 ข) และ (3.15) จัดรูปสมการ เพื่อหา $\frac{[N]_{(occupy)}}{[N]}$ และ $\frac{[N]_{(empty)}}{[N]}$ จะได้

$$\frac{[N]_{(occupy)}}{[N]} = \frac{1}{1 + e^{(E_j - E_f)/kT}} \quad (3.16 ก)$$

$$\frac{[N]_{(empty)}}{[N]} = \frac{1}{1 + e^{(E_f - E_j)/kT}} \quad (3.16 ข)$$

สมการ (3.16 ก) และ (3.16 ข) เป็นสมการที่แสดงถึงอัตราส่วนความหนาแน่นของสถานะพลังงาน E_j ที่มีอิเล็กตรอนครอบครองและไม่มีอิเล็กตรอนครอบครองต่อความหนาแน่นสถานะพลังงานทั้งหมด ซึ่งเป็นสมการที่ใช้บอกลักษณะการครอบครองสถานะพลังงานของอนุภาค ณ สถานะพลังงาน j ใดๆ

กลับมาพิจารณาชิลิกอนที่เติมด้วยอะตอมทองคำ โดยฐานรองเดิมของซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิกชนิดเอ็น จะพบว่าความหนาแน่นของประจุพาหะจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับความหนาแน่นของสถานะพลังงานของสารเจือที่ถูกครอบครอง ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สถานะของอะตอมผู้ให้ (N_D^+), สถานะของอะตอมทองคำผู้ให้ (Au^+), และ สถานะอะตอมทองคำผู้รับ (Au^-)

เมื่อทำการพิจารณาอะตอมทองคำเพียงชนิดเดียวจะพบว่าอะตอมทองคำมีสถานะภาพที่เป็นไปได้ในโครงสร้างผลึก 3 สถานะ ดังที่ได้อธิบายโดยละเอียดในหัวข้อที่แล้ว จึงสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้

$$[Au] = [Au^0] + [Au^+] + [Au^-] \quad (3.17)$$

เมื่อ $[Au]$ คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของอะตอมทองคำทั้งหมด
 $[Au^0]$ คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของอะตอมทองคำที่ไม่ไอออนไนซ์
 $[Au^+]$ คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของอะตอมทองคำที่ไอออนไนซ์ให้โฮล

$[Au^+]$ คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานของอะตอมทองคำที่ไอออนไนซ์ให้อิเล็กตรอน

จากสมการ (3.17) สามารถหาความหนาแน่นสถานะพลังงานของอะตอมทองคำที่พร้อมที่จะให้อิเล็กตรอนได้เป็น

$$[Au] - [Au^+] = [Au^0] + [Au^-] \quad (3.18)$$

จะได้

$$\frac{[Au] - [Au^+]}{[Au]} = \frac{[Au^0] + [Au^-]}{[Au]} \quad (3.19 ก)$$

และ

$$1 - \frac{[Au^+]}{[Au]} = \frac{1}{1 + e^{(E_{Au^+} - E_f)/kT}} \quad (3.19 ข)$$

$$\frac{[Au^+]}{[Au]} = \frac{1}{1 + e^{-(E_{Au^+} - E_f)/kT}} \quad (3.19 ค)$$

และทำการหา

$$\frac{[Au^-]}{[Au]} = \frac{1}{1 + e^{(E_{Au^-} - E_f)/kT}} \quad (3.20)$$

แทนค่า (3.19 ค) และ (3.20) ลงใน (3.19 ก) จะได้

$$\frac{[Au^0]}{[Au]} + \frac{[Au^-]}{[Au]} = 1 - \frac{[Au^+]}{[Au]}$$

$$\frac{[Au^0]}{[Au]} = \left(\frac{1}{1 + e^{(E_{Au^+} - E_f)/kT}} \right) - \left(\frac{1}{1 + e^{(E_{Au^-} - E_f)/kT}} \right) \quad (3.21)$$

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นชนิดคอนชดเอ็น ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการความเป็นกลางทางประจุ (Charge neutrality) ของฐานของชนิดนี้ ได้เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n + [Au^-] = p + [Au^+] + [N_D] \quad (3.22)$$

แทนค่าฟังก์ชันการไอออนไนซ์ลงในสมการ (3.22) จะได้

$$n = N_V e^{(E_V - E_f)/kT} + \frac{[Au]}{1 + e^{-(E_{Au^+} - E_f)/kT}} + \frac{N_D}{1 + e^{-(E_D - E_f)/kT}} - \frac{[Au]}{1 + e^{(E_{Au^-} - E_f)/kT}} \quad (3.23)$$

สุดท้ายจะสามารถหาระดับเฟอร์มิได้โดยหาจุดตัดกราฟระหว่างสมการความเป็นกลางทางประจุ (3.23) และ สมการความหนาแน่นประจุ (3.6) [20] ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะมีค่าดังต่อไปนี้

$$N_C = 2[2\pi m_n^* kT / h^2]^{3/2}$$

$$N_V = 2[2\pi m_p^* kT / h^2]^{3/2}$$

$$E_C = 1.12 \text{ eV}$$

$$E_V = 0 \text{ eV}$$

$$E_{Au^-} = 0.35 \text{ eV}$$

$$E_{Au^+} = 0.58 \text{ eV}$$

$$E_D = \text{ระดับพลังงานของฟอสฟอรัส} = 1.075 \text{ eV}$$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์} \ 300 \text{ K}$$

$$[N_D] \text{ ของฐานรอง (5}\Omega\text{-cm)} = 9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$[N_D] \text{ ของฐานรอง (600}\Omega\text{-cm)} = 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

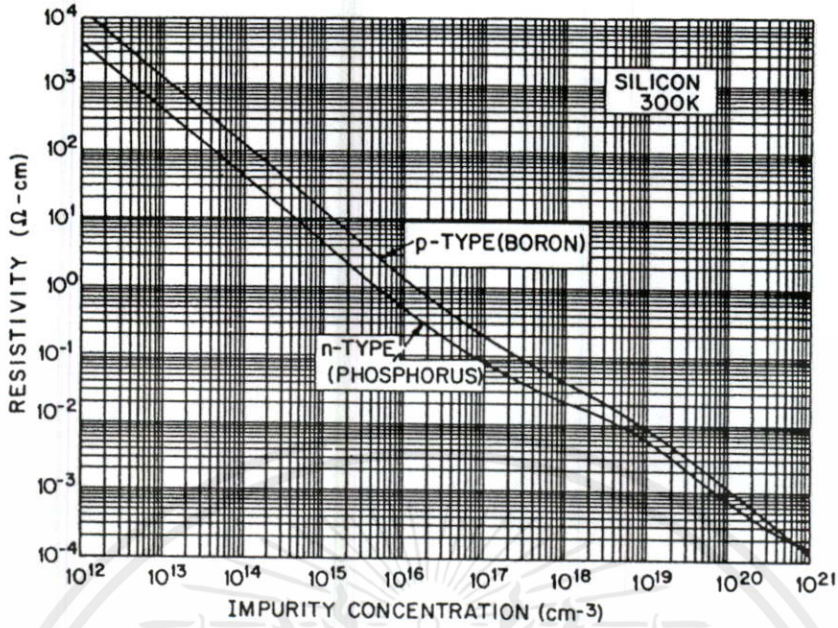
$$[Au] = \text{กำหนดให้มิต่ำเท่ากับ } 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ทำการคำนวณมาแสดงผลด้วยโปรแกรม Matlab version 5.3 Release II ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระดับเฟอร์มิของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ($T = 300 \text{ K}$)

Resitivity ($\Omega\text{-cm}$)	N_D (Phosphorous) (cm^{-3})	E_f (eV)	[Au] (cm^{-3})	E_f (eV)
5	9×10^{14}	0.85	1×10^{15}	0.65
600	7×10^{12}	0.75	1×10^{15}	0.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 สภาพต้านทานไฟฟ้า(Ω-cm) และความหนาแน่นอะตอมสารเจือของซิลิคอนที่ 300K [20]

3.4 การเคลื่อนที่ของประจุในช่องทางเดินกระแส

การเคลื่อนที่ของประจุอิสระภายในซิลิคอนมีหลักการเช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของประจุในของแข็งทั่วไป ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุจะมีอุปสรรคหลายชนิดขัดขวางการเคลื่อนที่ เช่น การสั่นของโครงผลึกเนื่องจากได้รับพลังงานจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ผลกระทบจากสิ่งเจือปน หรือแม้กระทั่งแรงคูลอมบ์ มีสาเหตุมาจากอิทธิพลของสนามจากประจุไฟฟ้าที่กระทำต่อกัน คุณสมบัติที่ใช้บอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุในสารกึ่งตัวนำ คือ ค่าความคล่องตัว (mobility) ซึ่งมีนิยามว่าเป็น ความเร็วเฉลี่ยของประจุเคลื่อนที่ต่อหน่วยสนามไฟฟ้าที่ใช้ไบแอส เนื่องจากอิทธิพลที่มีผลกับค่าความคล่องตัวมาจากหลายสาเหตุ ทำให้สามารถหาค่าความคล่องตัวได้หลายวิธี[17] โดยความคล่องตัวที่หาได้ในแต่ละวิธีนั้นจะมีค่าแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าเป็นค่าคล่องตัวที่ได้จากการวัดที่มีผลกระทบจากองค์ประกอบใดมากกว่ากัน ค่าความคล่องตัวสุทธิสามารถหาได้โดยใช้กฎของ Mathiessen [5] [8] [17]

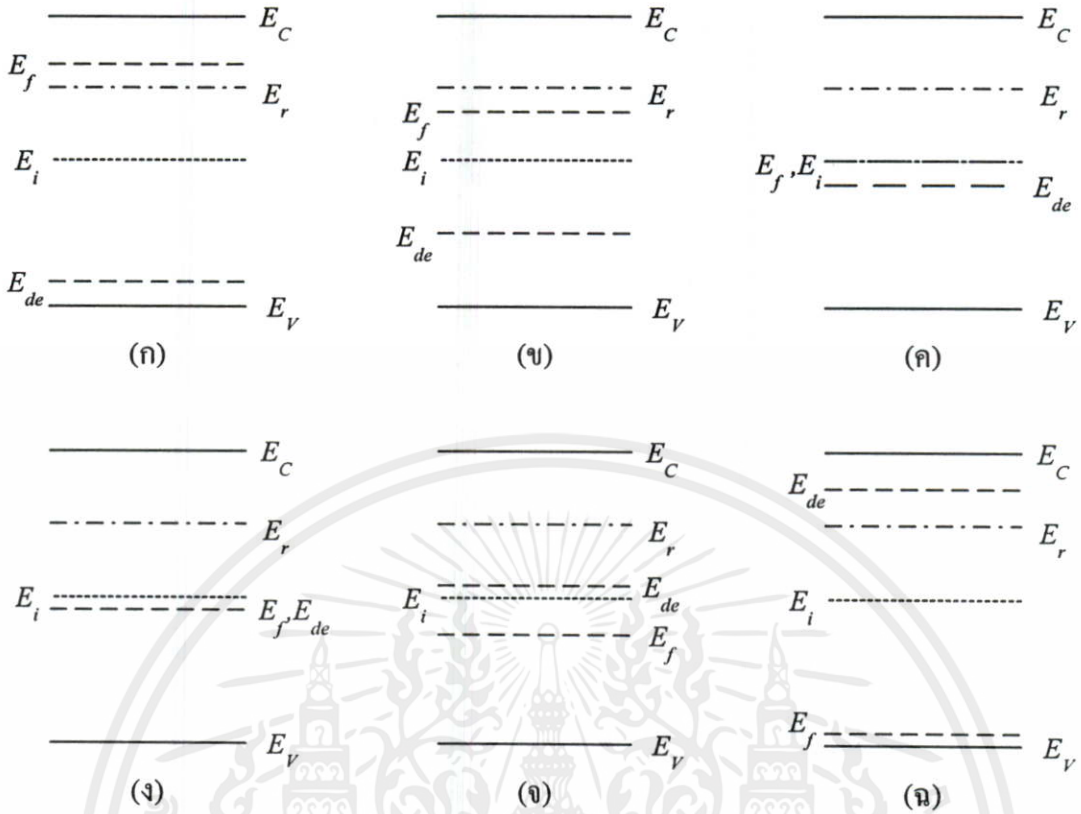
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \dots \tag{3.24}$$

เมื่อ μ คือ ความคล่องตัวสุทธิ
 μ_1 คือ ค่าความคล่องตัวที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยที่ 1
 μ_2 คือ ค่าความคล่องตัวที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยที่ 2

โดยปกติแล้วการศึกษาค่าความคล่องตัวในสารกึ่งตัวนำจะเป็นการศึกษาผลกระทบเนื่อง จากอุณหภูมิ และความหนาแน่นอะตอมสารเจือเป็นหลัก แต่ในกรณีของ MOSFET แล้วบริเวณช่อง ทางเดินกระแสที่ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านนั้นเป็นบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ โดยมีแรงของสนาม ไฟฟ้ากระทำในแนวตั้งฉากกับผิวตลอดเวลาเพื่อทำการสะสมประจุที่ช่องทางเดินกระแส การ เคลื่อนที่ของประจุผ่านบริเวณที่มีประจุไฟฟ้าหนาแน่นเช่นนี้ จะได้รับผลกระทบจากประจุชนิด ต่างๆ เช่นประจุเนื่องจากอะตอมสารเจือ ประจุสะสมบริเวณชั้นออกไซด์ และประจุสะสมที่บริเวณ ผิว เป็นต้น ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะภายใต้สภาวะเช่นนี้ เรียกว่า ค่าความคล่องตัวพื้นผิว (Surface mobility) หรือ ค่าความคล่องตัวยังผล (Effective mobility) โดยเป็นค่าที่ได้จากการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตัวอุปกรณ์ ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า ความคล่องตัวในเนื้อวัสดุ (Bulk mobility) ค่าความคล่องตัวที่ใช้ในสมการกระแสของ MOSFET (Charge-sheet model) ก็เป็นค่าความคล่องตัวพื้นผิว[14] ดังนั้นในหัวข้อนี้จะไม่แสดงรายละเอียด ผลกระทบของอะตอมของค่าที่มีต่อการเคลื่อนที่ของประจุในช่องทางเดินกระแส เนื่องจากผล กระทบเหล่านั้นจะมีผลน้อยกว่าผลกระทบจากการไบแอสสนามไฟฟ้าให้กับช่องทางเดินกระแส แต่การอธิบายผลกระทบของอะตอมของค่าในส่วนนี้ จะเป็นการสรุปผลที่เกิดขึ้นโดยสังเขปเพื่อ เป็นประโยชน์ต่อการอธิบายการทำงานของ MOIS ในบทถัดไป

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นแล้วว่าระดับพลังงานของอะตอมของค่าที่มีอิทธิพลกับ การรวมตัวของประจุพาหะนั้นจะเป็นระดับพลังงานที่อยู่ใกล้กับระดับเฟอร์มิมากที่สุด ส่วนระดับ พลังงานที่เหลือจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์น้อยจนสามารถละทิ้งได้ ในกรณีของ PMOIS เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าไบแอสให้กับเกตจะส่งผลไปยังช่องทางเดินกระแสทำให้กลายเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี ภายใต้สภาวะนี้ประจุพาหะช่องมาก (โฮล) จะถูกระดับพลังงานผู้ให้จับได้ง่าย แม้ว่าอะตอมของค่าในสภาวะนั้นเป็นกลางทางไฟฟ้า เพราะช่องทางเดินกระแสในสภาวะนั้นมีโฮล เป็นจำนวนมากนั่นเอง เมื่ออะตอมของค่าผู้ให้ร่วมกับโฮลจะทำให้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกเกิดเป็น แรงดึงดูด ดึงดูดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยทำให้เกิดการรวมตัวประจุ ระดับพลังงาน ของอะตอมของค่าที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ PMOIS คือ ระดับพลังงานของผู้ให้ ($E_v+0.35$ eV จับโฮล) ส่วนในกรณีของ NMOIS ก็พิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน ระดับพลังงานของอะตอม ของค่าที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ NMOIS คือ ระดับพลังงานของผู้รับ ($E_c-0.55$ eV จับ อิเล็กตรอน) [7] [24]

มีงานวิจัยในอดีตตามเอกสารอ้างอิง [27] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Recombination center โดยใช้แสง และ ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลงช่วงชีวิตของประจุพาหะส่วนน้อย (Minority carrier lifetime) เทียบกับระดับต่าง ๆ ในแถบวงห้ามที่เปลี่ยนไป โดยมีสภาวะต่าง ๆ 6 สภาวะดัง แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบระหว่างระดับเฟอร์มิ(E_f), ระดับ Recombination(E_r), กึ่งกลางแถบพลังงาน(E_i) และ ระดับ demarcation (E_{dc})

วัสดุที่ใช้พิจารณาในส่วนนี้เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นของ Recombination center มากกว่าความหนาแน่นของประจุที่ได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิ โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระดับเฟอร์มิ และ ระดับ Demarcation

ในสถานะนี้ Recombination center จะมี $E_r > E_i$ เริ่มต้นพิจารณาจากรูป 3.8(ก) โดยระดับเฟอร์มิมีค่าสูงที่สุดแล้วค่อย ๆ เลื่อนต่ำลงไปยังแถบวาเลนซ์ ระดับ Demarcation เปลี่ยนแปลงในอัตราเดียวกับระดับเฟอร์มิแต่ทิศทางตรงข้าม

กรณี(ก) วัสดุมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิอยู่สูงกว่าระดับ Recombination สถานะของ Recombination (N_r) ทั้งหมดอยู่ระหว่าง E_f และ E_{dc} ช่วงชีวิตของประจุพาหะส่วนน้อยมีค่าตามความสัมพันธ์ (3.25) โดย S_p คือ Capture crosssection ของโฮล และ v คือ ความเร็วครีฟท์ (Drift velocity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\tau_{po} = \frac{1}{v S_p N_r} \tag{3.25}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบนิ่งนอนใจ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อระดับเฟอร์มิเคลื่อนห่างออกจากแถบคอนดักชันไปยังระดับ Recombination ช่วงชีวิตยังคงไม่เปลี่ยนแปลงและมีค่าเท่ากับ τ_{po}

กรณี (ข) วัสดุยังเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แต่ระดับเฟอร์มิอยู่ต่ำกว่า E_f ทำให้ N_r บางส่วนถูกครอบครองด้วยอิเล็กตรอน เมื่อระดับเฟอร์มิเคลื่อนจาก E_f ไปยัง E_i ค่าช่วงชีวิตเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชียลตามความสัมพันธ์

$$\tau_p = \tau_{po} \exp\left(\frac{E_r - E_f}{kT}\right) \quad (3.26)$$

ซึ่งเป็นผลมาจากการครอบครองอิเล็กตรอนใน N_r ลดลงเป็นแบบเอ็กโพเนนเชียล

$$\exp\left(-\frac{E_r - E_f}{kT}\right)$$

กรณี (ค) วัสดุเป็นอินทรีนสิก โดยระดับเฟอร์มิวางตัวในตำแหน่งเดียวกับ E_i แต่อยู่ระหว่าง E_f และ E_{de} ยังคงมีค่าแตกต่างกันเท่ากับ $kT \ln(S_n/S_p)$ เป็นสภาวะที่ทำให้ช่วงชีวิตของประจุพาหะส่วนน้อยมีค่าสูงที่สุดเมื่ออยู่ในสภาวะสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แต่ไม่ใช่ค่าสูงสุดสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อ E_f เคลื่อนต่ำลงกว่า E_i วัสดุจะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยมีประจุพาหะส่วนน้อยเป็นอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าช่วงชีวิต ในสภาวะเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำ ถ้า S_n ไม่เท่ากับ S_p ค่าช่วงชีวิตของประจุพาหะส่วนน้อยในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งระดับเฟอร์มิเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่ง $kT \ln(S_n/S_p)$ ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิเพราะหลังจากนั้นผลต่างระหว่าง E_f และ E_{de} จะมากขึ้น

กรณี (ง) เป็นสภาวะที่สารกึ่งตัวนำชนิดพี มีช่วงชีวิตสูงที่สุด และระดับเฟอร์มิของวัสดุเท่ากับระดับ Demarcation

กรณี (จ) ในสภาวะนี้สารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีระดับ Demarcation อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ ประสิทธิภาพของ N_r จะลดลงน้อยกว่าเมื่อ E_f อยู่ระหว่าง E_{de} และ E_f เป็นอัตราส่วน $\exp[-(E_{de} - E_f)/kT]$ และทำให้ช่วงชีวิตมีค่าลดลงตามระดับ Demarcation เคลื่อนเข้าไปยัง E_f ถ้า τ_{no} คือค่าช่วงชีวิตของประจุพาหะส่วนน้อยที่ระดับ E_f อยู่ระหว่าง E_{de} และ E_f แล้ว ช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนจะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\tau_n = \tau_{no} \exp\left(\frac{E_r - E_f}{kT}\right) \quad (3.27)$$

กรณี(ณ) เมื่อ N_r วางตัวอยู่ระหว่าง E_{de} และ E_f ดังนั้นค่าช่วงชีวิตจะคงที่ตามความสัมพันธ์

$$\tau_{no} = \frac{1}{vS_n N_r} \quad (3.28)$$

3.5 สรุป

ผลกระทบของอะตอมทองคำเมื่อเติมลงในซิลิคอนจะทำให้เกิดระดับพลังงานขึ้นในแถบหวงห้าม 2 สถานะ คือ สถานะผู้ให้ที่มีตำแหน่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ 0.35 eV และสถานะผู้รับมีตำแหน่งอยู่ต่ำกว่าแถบคอนดักชัน 0.55 eV ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดอื่น ทำให้มีระดับสถานะ shallow ที่เป็นสถานะผู้ให้อีกหนึ่งระดับเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบของฐานรองที่พิจารณา มีระดับสถานะพลังงานในแถบหวงห้าม 3 ระดับ ซึ่งสามารถหาระดับเฟอร์มิรวมของทั้งระบบได้ด้วยหลัก Principle of detailed balance ดังแสดงในหัวข้อ 3.3.2 ซึ่งจากกราฟที่ได้จะเห็นว่าการเติมอะตอมทองคำทำให้ระดับเฟอร์มิของระบบเคลื่อนเข้าไปในทิศกึ่งกลางของแถบพลังงาน ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของประจุพาหะในสภาวะสมดุลอุณหภูมิตกลง นอกจากนี้ อะตอมทองคำยังทำให้ช่วงชีวิตของประจุพาหะส่วนน้อยของฐานรองมีค่าลดลง แต่เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการประยุกต์ทฤษฎีเพื่ออธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์ โครงสร้าง MOS ซึ่งค่าความคล่องตัวมีอิทธิพลจากการไบแอสสนามไฟฟ้าให้กับเกตมากกว่า จึงไม่สามารถใช้ความคล่องตัวในเนื้อวัสดุ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้ในบทนี้ก็สิ่งสำคัญที่จะใช้อธิบายแนวโน้มการทำงานของ MOIS ในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

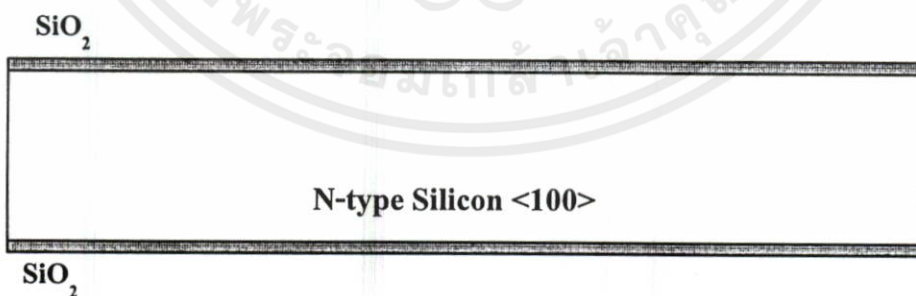
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทำงานของทรานซิสเตอร์ แบบ MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS บนฐานรองสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีพิสัยความต้านทานแตกต่างกัน 2 ค่า คือ $5 \Omega\text{-cm}$ และ $600 \Omega\text{-cm}$ โดยใช้หลักการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [1] และ [2] ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการสร้างในหัวข้อ 4.1 จากนั้นในหัวข้อ 4.2 จะเป็นการนำทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่ได้มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และวิเคราะห์การทำงานย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มในหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ การระบุตำแหน่งย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มด้วยการวัดค่าแรงดันขีดเริ่ม, การกำหนดย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มจากผลของความสัมพันธ์กระแส และแรงดัน, การทดลองและการระบุค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม และผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของ MOIS

4.1 กระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้หลักการสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ด้วยกระบวนการสร้างที่มีรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [1] ดังขั้นตอนที่แสดงต่อไปนี้

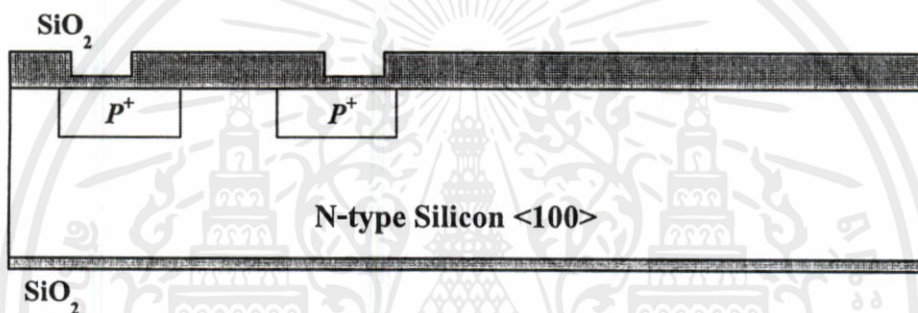


รูปที่ 4.1 แผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาด และสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ปกคลุมผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 1 เลือกแผ่นซิลิคอนผลึกเดี่ยวขนาดพิสัยความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ และ $600 \Omega\text{-cm}$ โดย
ไม่ว่ากรณีใดๆทางต้น ออกพิมพ์มีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
มีระนาบของผลึก <100> ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกรดไนตริกเพื่อกำจัดโลหะที่ติดอยู่บนผิวหน้า
ของแผ่นผลึกออก จากนั้นทำการล้างไขมันที่ผิวหน้าของผลึกด้วยไตรคลอโรเอธิลีน และล้างไตร

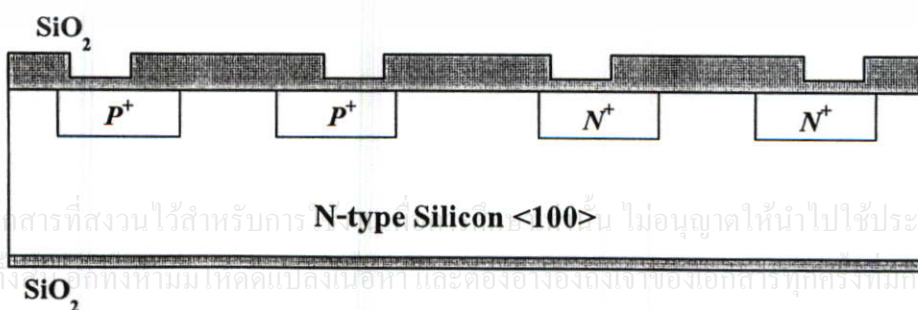
คลอโรเอธิลีนด้วยอะซีโตนและน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออน จากนั้นทำการสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อปกคลุมผิวของแผ่นผลึกทั้งหมดให้ได้ความหนาของชั้นฉนวนของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมดัง รูปที่ 4.1

ขั้นที่2 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ออกเพื่อทำการแพร่สารชนิดพี (Boron,B) ด้วยกระบวนการทางแสง แล้วทำการแพร่สารเจือชนิดพี เพื่อสร้างขั้วซอร์สและเดรนของทรานซิสเตอร์ PMOIS ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการขั้วลึกร่วมสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 40 นาที หลังจากทำการขั้วลึกร่วมแล้วควรมีค่าประมาณของอะตอมสารเจือที่ผิวประมาณ $10^{15} - 10^{16} \text{ atom-cm}^{-3}$ ดังแสดงในรูป 4.2



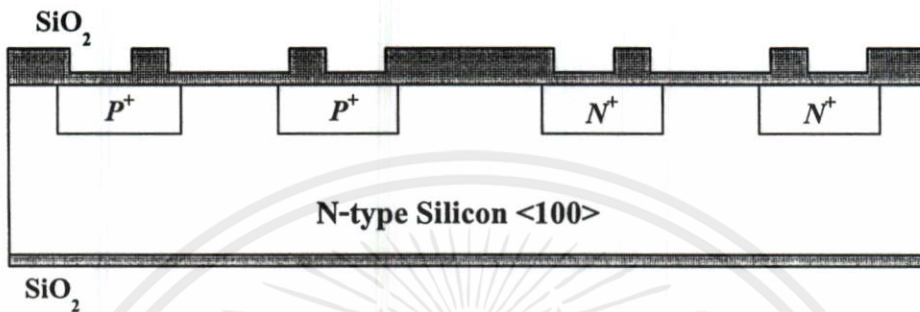
รูปที่ 4.2 การสร้างขั้วซอร์ส และเดรนของทรานซิสเตอร์ PMOIS

ขั้นที่3 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ออกเพื่อทำการแพร่สารเจือชนิดเอ็น (Phosphorous, P) ด้วยกระบวนการทางแสงแล้วทำการแพร่สารเจือชนิดเอ็น เพื่อสร้างขั้วซอร์สและเดรนของทรานซิสเตอร์ NMOIS ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นทำการขั้วลึกร่วมสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 40 นาที หลังจากทำการขั้วลึกร่วมแล้วความหนาแน่นอะตอมสารเจือชนิดเอ็น ที่บริเวณผิวควรมีค่าประมาณ $10^{15} - 10^{16} \text{ atom-cm}^{-3}$ ดังแสดงในรูป 4.3



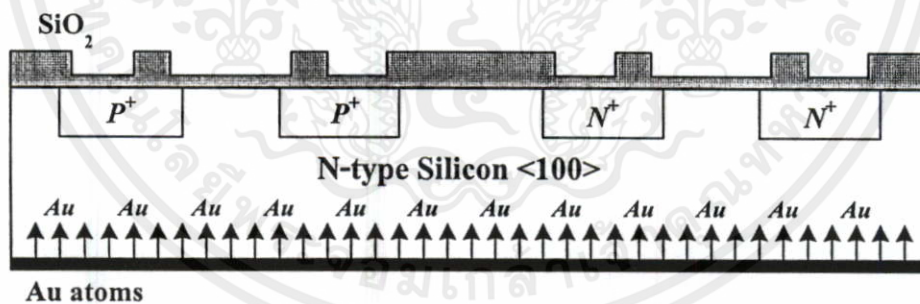
รูปที่ 4.3 การสร้างขั้วซอร์ส และเดรนของทรานซิสเตอร์ NMOIS

ขั้นที่ 4 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ชนิด ด้วยกระบวนการทางแสง แล้วทำการสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นใหม่ให้มีความหนาประมาณ 700 Å โดยใช้อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 20 นาที ดังรูป 4.4



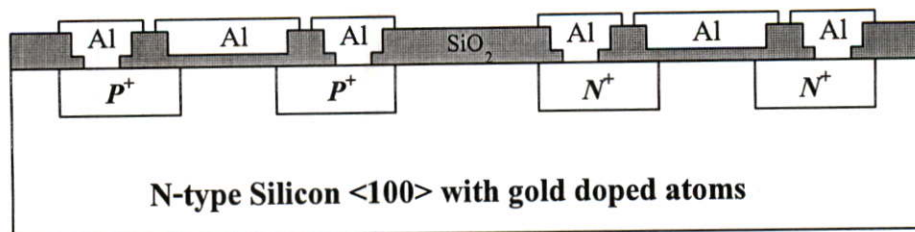
รูปที่ 4.4 การสร้างฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ที่บริเวณช่องทางเดินกระแส

ขั้นที่ 5 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ ด้านตรงข้ามกับผิวหน้าที่ใช้ในการสร้างทรานซิสเตอร์ทั้งหมด แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ จากนั้นทำการขัปลอกทองคำที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 90 นาที จะทำให้ฐานรองที่ใช้ในการสร้างทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ดังรูป 4.5



รูปที่ 4.5 การแพร่สารเจือทองคำเข้าไปในฐานรองทรานซิสเตอร์

ขั้นที่ 6 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ บริเวณขั้วซอร์สและเดรนของทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรถัดไป แล้วทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ จากนั้นทำการกัดลวดลายในวงจรถัดไปที่ได้ออกแบบไว้ แล้วจึงอบไว้เพื่อให้รอยสัมผัสต่างๆ ติดสนิทเกิดเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact) กับขั้วของทรานซิสเตอร์มากขึ้น ดังรูป 4.6



รูปที่ 4.6 โครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

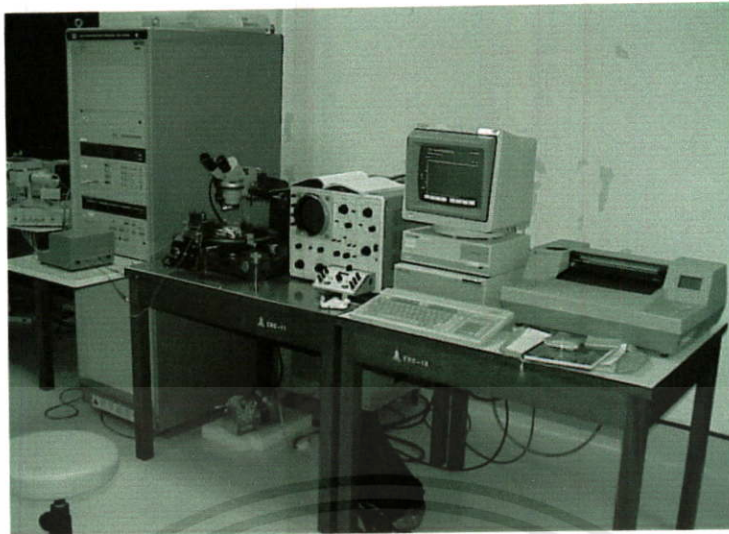


รูปที่ 4.7 รูปถ่ายทรานซิสเตอร์ที่ได้ออกแบบ และสร้างในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

การเชื่อมต่อขั้วเข้ากับฐานรองเพื่อลดปรากฏการณ์ Body Effect ในทรานซิสเตอร์แบบ CMOS จะทำให้เกิดเป็นโครงสร้าง PNPN ซึ่งทำให้เกิดเป็นปรากฏการณ์ Latch up ดังนั้นในกระบวนการสร้างจะต้องมีการออกแบบลวดลายวงจรอย่างเหมาะสม เพื่อให้ผลจากปรากฏการณ์นี้กระทบต่อการทำงานของวงจรมีน้อยที่สุด แต่สำหรับโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่ได้ทำการสร้างจะไม่สามารถเชื่อมต่อขาขั้วเข้ากับฐานรองได้ เนื่องจากฐานรองมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับอินทรีนสิก ผลการต่อแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรที่เชื่อมต่อขั้วเข้ากับฐานรองจะทำให้ไฟเลี้ยงไหลลงสู่จุดที่มีแรงดันต่ำกว่าโดยผ่านฐานรอง ซึ่งจะเป็นผลทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงานตามฟังก์ชันที่ต้องการได้ ดังนั้นในขณะที่ทำงานทรานซิสเตอร์แบบ MOIS จึงจำเป็นที่จะต้องวางอยู่บนวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน [2]

4.2 การวัดคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่ม

หลังจากการสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ด้วยกระบวนการในหัวข้อ 4.1 แล้วจึงทำการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ในสภาวะการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำรุ่น HP 4061A ของบริษัท Yokogawa-Hewlett-Packard, Ltd. ติดตั้งอยู่ที่ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รูปที่ 4.8 Model HP 4061A Semiconductor /Component Test System with System Controller

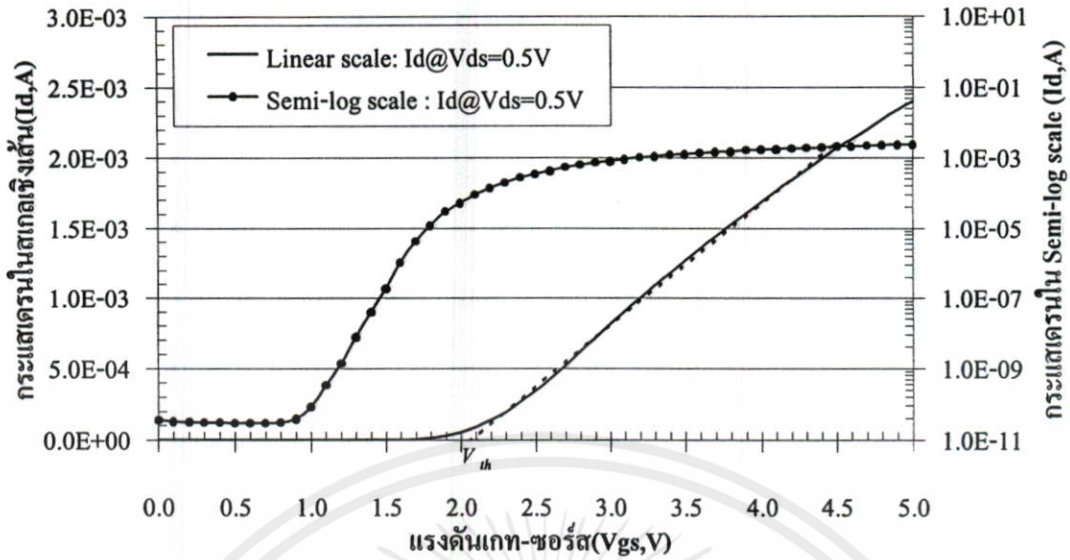
4.2.1 การทดลอง และผลการทดลองหาค่าแรงดันขีดเริ่ม เพื่อระบุตำแหน่งของ ย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS

กระแสในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มเป็นกระแสที่มีค่าต่ำมากอยู่ในระดับ 10^{-6} A ซึ่งกระแสในการทำงานย่านนี้สามารถบ่งบอกถึงความเร็วในการทำงานของทรานซิสเตอร์ การวัดกระแสในระดับต่ำนี้จะต้องระมัดระวังในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งอุณหภูมิขณะทำการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อยู่ที่ 25°C (298 K)

การระบุช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มอย่างคร่าวๆ นั้น สามารถระบุได้ด้วยการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ (V_{th}) ด้วยวิธีประมาณกราฟเส้นตรงหาจุดตัดแกน ซึ่งจะได้เป็นค่าสูงสุดในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มโดยประมาณ จากนั้นจึงทำการวัดค่าแรงดันทำงานที่อยู่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มในแรงดันค่าต่างๆ กัน โดยทำการนำข้อมูลมาแสดงในรูปความสัมพันธ์เป็น Semi-log กระแสในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันเกต-ซอร์ส เป็นแบบ เอ็กโพเนนเชียล เมื่อพล็อตกราฟ Semi-log จะ ได้เส้นกราฟความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรง ช่วงแรงดันนั้น คือย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

วิธีการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยการประมาณกราฟเส้นตรงหาจุดตัดแกน [17] [30]

1. ตั้งค่าแรงดันเดรน-ซอร์สที่ใช้ในขณะที่ทำการวัดให้มีค่าต่ำๆ (ประมาณ 0.5V หรือ -0.5V ขึ้นอยู่กับชนิดของ MOISFET)
2. ทำการวัดกระแสเดรน (I_{DS}) ที่สัมพันธ์กับแรงดันเกต-ซอร์ส (V_{GS})
3. ทำการลากเส้นตรงจากช่วงการทำงานในส่วนที่เป็นเชิงเส้นย้อนกลับสู่จุดกำเนิดของกราฟ จุดตัดแกนแรงดันเกต-ซอร์ส คือค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{th})



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการหาแรงดันขั้วเริ่มด้วยวิธีประมาณกราฟเส้นตรงหาจุดตัดแกน

ข้อควรระวังในการวัดหาแรงดันขั้วเริ่มด้วยวิธีการนี้จะต้องจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง MOISFET ให้อยู่ในสถานะไม่อิ่มตัว (Non-saturation mode หรือ Triode region) กล่าวคือ จะต้องกำหนดให้ $|V_{DS}|$ มีค่าต่ำกว่า $|V_{GS}|$ มากๆ จึงสามารถประมาณช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่อยู่เหนือแรงดันขั้วเริ่มเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นได้ ซึ่งสมการในช่วงการทำงานนี้ของ NMOIS [1] คือ

$$I_D = k' \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \tag{4.1 ก}$$

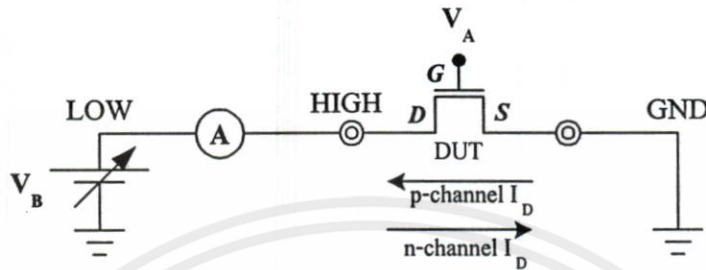
$$I_D = \mu_n \left(\frac{K_{OX} \epsilon_o}{t_{OX}} \right) \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} \tag{4.1 ข}$$

การทำงานในช่วงนี้ของ MOISFET จะประพฤติตัวคล้ายกับเป็นตัวต้านทานที่สามารถเปลี่ยนค่าได้ตามการไบแอสแรงดัน V_{GS} ซึ่งมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นดังสมการ (4.2)

$$\rho = \frac{1}{\mu_n C_{OX} (V_{GS} - V_{th})} \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์ประกอบ ด้วยแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง 2 จุด V_A และ V_B นอกจากนี้ยังมีเครื่องวัดกระแส (4140B pA Meter/DC Voltage Source) การทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวทำการต่อวงจรดังแสดงในรูป 4.10



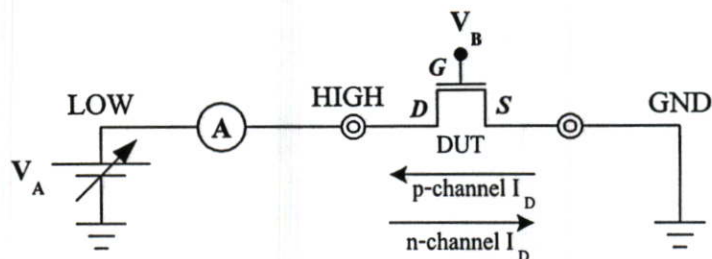
รูปที่ 4.10 การวัดกระแสทรานซิสเตอร์กับแรงดันเกต-ซอร์ส ของ MOISFET

จากรูปจะเห็นว่ากระแสทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการวัดจะตรงข้ามกับนิยามของทิศการไหลของกระแส ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ค่าที่ได้จากการวัดจะมีทิศทางดังแสดงในตารางที่ 4.1 จุด LOW (Low lead connection) ที่แสดงในวงจรมีลักษณะเป็นสวิตช์ที่ใช้สำหรับเลือกต่อเข้ากับ V_A , V_B หรือ GND ได้ เท่านั้น จึงไม่สามารถที่จะต่ออุปกรณ์ทดสอบ (Device Under Test, DUT) เข้ากับเครื่องวัดกระแส เพื่อให้ผลที่ได้จากการวัดมีทิศทางเดียวกับกระแสมาตรฐานดังแสดงในตาราง 2.1 ได้ อย่างไรก็ตามขอให้เป็นความเข้าใจในตรงกันว่ากระแสทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการวัดจะมีทิศตรงข้ามกับนิยามก่อนหน้า

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบทิศทางของกระแส และแรงดันที่ใช้ในการหาแรงดันขีดเริ่ม

ชนิดของ	ทิศทางที่ตกลงในตาราง 2.1			ทิศทางที่ได้จากการวัด		
	V_A	V_B	I_D	V_A	V_B	I_D
MOISFET						
N- channel	+	+	+	+	+	-
P- channel	-	-	-	-	-	+

แหล่งจ่ายไฟ V_A ได้รับการออกแบบมาให้มีโหมดในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของแรงดันหลายรูปแบบ เช่น การจ่ายไฟฟ้าแบบ DC, การจ่ายไฟฟ้าแบบขั้นบันได, และการจ่ายไฟฟ้าแบบความชันต่อเนื่อง เป็นต้น ส่วนแหล่งจ่ายไฟ V_B ได้รับการออกแบบให้มีโหมดการจ่ายไฟฟ้าแบบ DC เพียงอย่างเดียว ดังนั้น เมื่อต้องการเปลี่ยนการวัดกระแสจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทรานซิสเตอร์กับแรงดันเกต-ซอร์ส มาเป็นการวัดกระแสความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทรานซิสเตอร์กับแรงดันเกต-ซอร์สจึงต้องสลับแหล่งจ่ายไฟดังแสดงในรูป 4.11

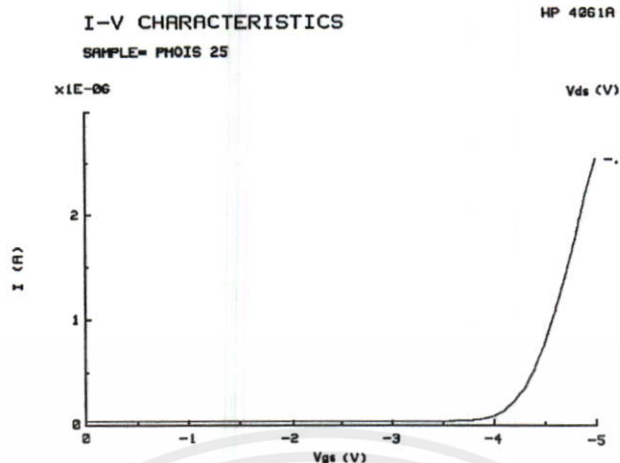


รูปที่ 4.11 วงจรสำหรับการวัดกระแสครนกับแรงดันครน-ซอร์ส ของ MOISFET

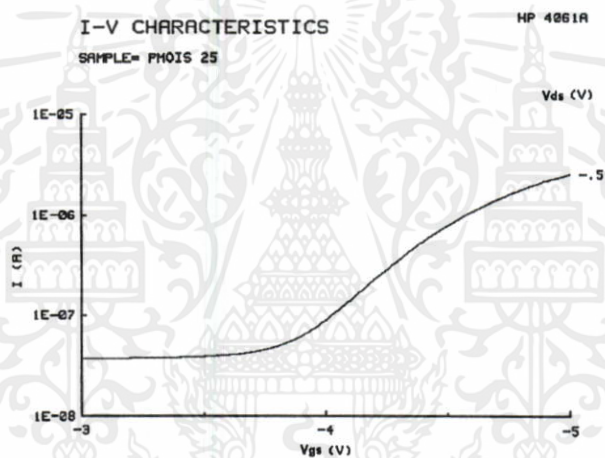
เมื่อทำการโพรบ (probe) ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ดังวิธีการที่ได้อธิบายผ่านมาข้างต้นแล้ว จึงทำการเรียกโปรแกรม IVALL¹ เพื่อควบคุมการวัดของระบบ HP 4061A และกำหนดค่าแรงดันไบแอสพร้อมทั้งช่วงการเปลี่ยนแปลงให้กับ V_A และ V_B สำหรับวัดการทำงานของทรานซิสเตอร์ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.12 – 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

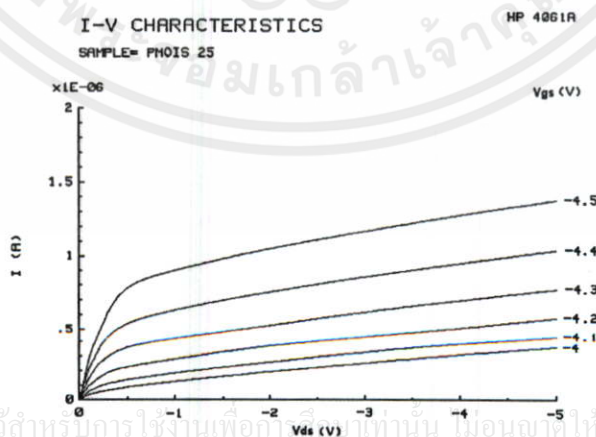
¹ IVALL : I-V Characteristics Measurement Program [29]



(ก) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Linear-linear scale



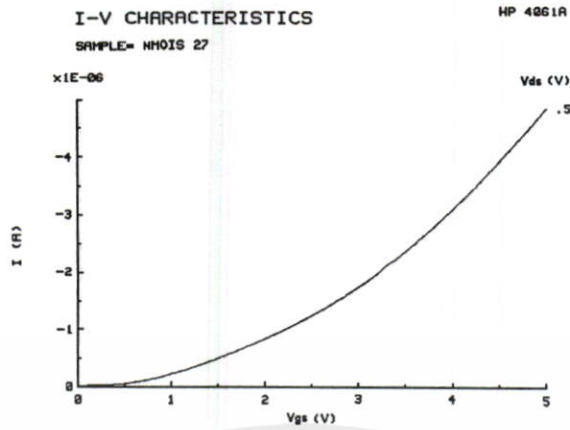
(ข) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Semi-log scale



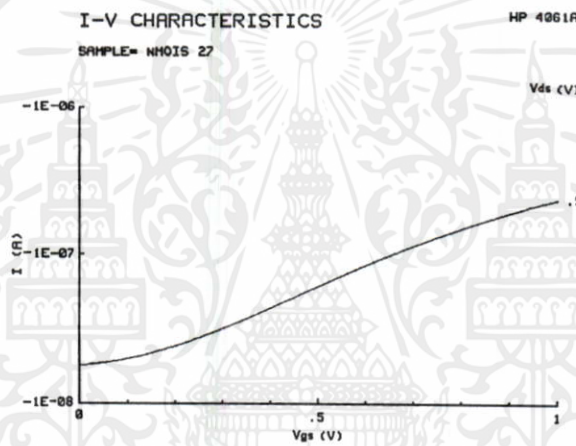
(ค) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{DS} ใน Linear-linear scale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้า (ก) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Linear-linear scale ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

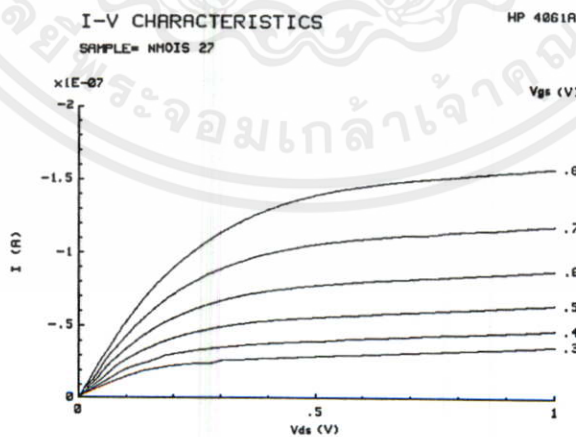
รูปที่ 4.12 กราฟคุณสมบัติของ PMOIS หมายเลข 25 มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$
พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $600 \Omega\text{-cm}$



(ก) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Linear-linear scale



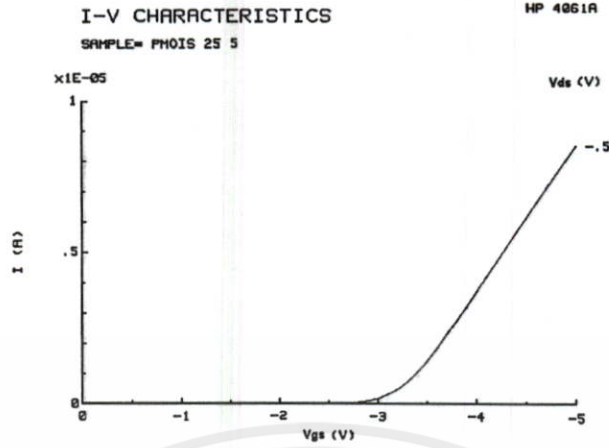
(ข) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Semi-log scale



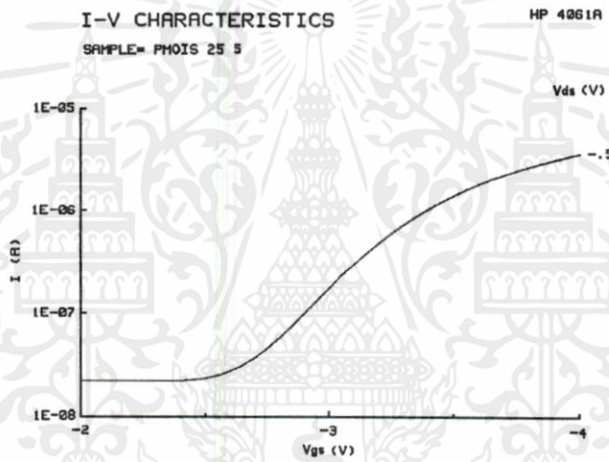
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน (ก) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{DS} ใน Linear-linear scale นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า **รูปที่ 4.13** กราฟคุณสมบัติของ NMOIS หมายเลข 27 มี $W = 200 \mu\text{m}$ และ $L = 20 \mu\text{m}$ ที่มีการนำไปใช้

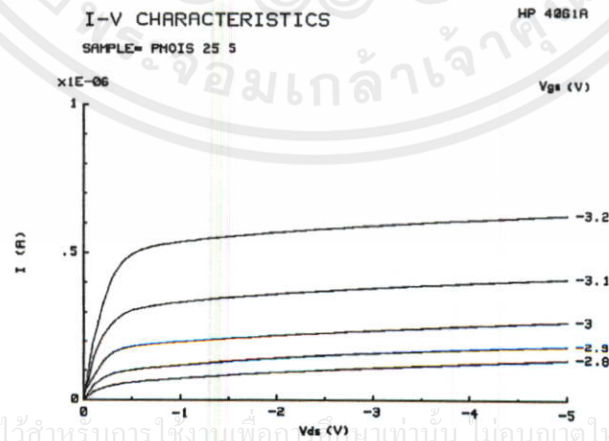
พิถีพิถันด้านทานของแผ่นผลึก $600 \Omega\text{-cm}$



(ก) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Linear-linear scale

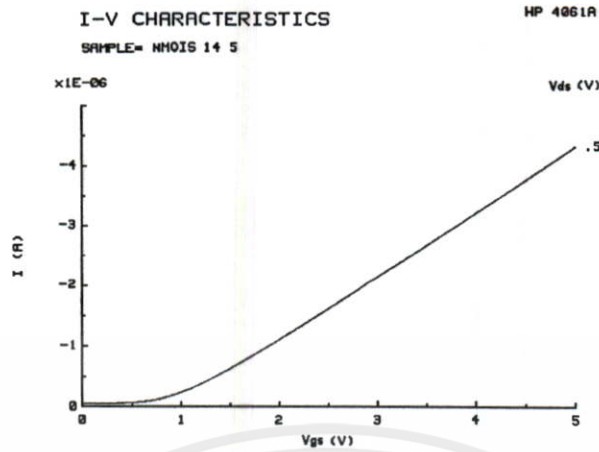


(ข) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Semi-log scale

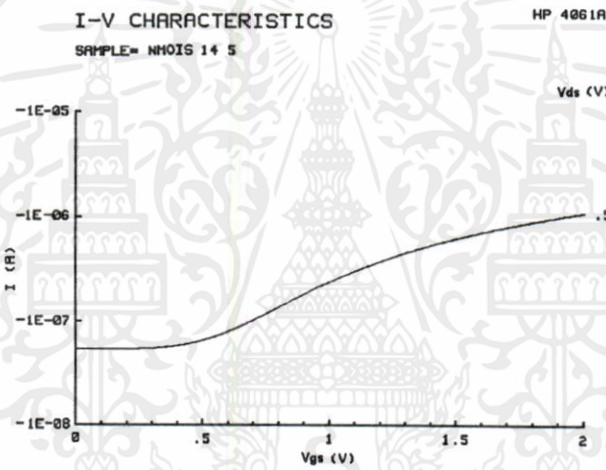


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง (ค) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{DS} ใน Linear-linear scale ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

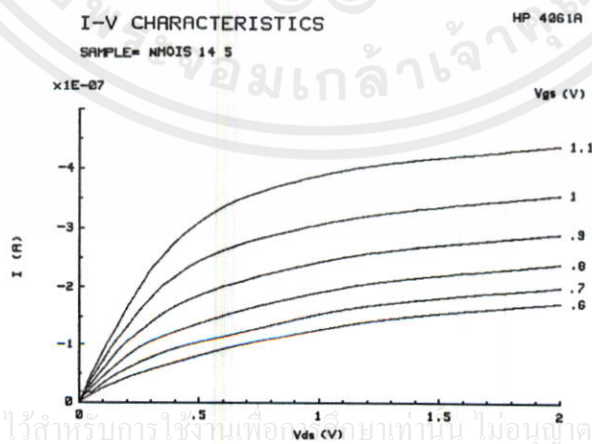
รูปที่ 4.14 กราฟคุณสมบัติของ PMOS หมายเลข 25 มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$
พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $5\Omega\text{-cm}$



(ก) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Linear-linear scale



(ข) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{GS} ใน Semi-log scale



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารต้นฉบับ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง (ค) กราฟความสัมพันธ์ I_D-V_{DS} ใน Linear-linear scale การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 กราฟคุณสมบัติของ NMOIS หมายเลข 14 มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$
 พิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก $5 \Omega\text{-cm}$

จากผลการวัดคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่มีความแตกต่างในโครงสร้าง 4 รูปแบบคือ

1. PMOIS หมายเลข 25 มี $W = 40 \mu\text{m}$, $L = 40 \mu\text{m}$, $W/L = 1$ และพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นเป็น $600 \Omega\text{-cm}$
2. NMOIS หมายเลข 27 มี $W = 200 \mu\text{m}$, $L = 20 \mu\text{m}$, $W/L = 10$ และพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นเป็น $600 \Omega\text{-cm}$
3. PMOIS หมายเลข 25 มี $W = 40 \mu\text{m}$, $L = 40 \mu\text{m}$, $W/L = 1$ และพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นเป็น $5 \Omega\text{-cm}$
4. NMOIS หมายเลข 14 มี $W = 40 \mu\text{m}$, $L = 40 \mu\text{m}$, $W/L = 1$ และพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นเป็น $5 \Omega\text{-cm}$

ข้อมูลในรูปที่ 4.12 - 4.15 แสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์แบบ MOIS สามารถทำงานได้ในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม โดยมีฟังก์ชันการทำงานอยู่ในรูปเอ็กโพเนนเชียล เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์แบบ MOS กราฟในรูป 4.12(ก) 4.13(ก) 4.14(ก) และ 4.15(ก) เป็นกราฟความสัมพันธ์ $I_D - V_{GS}$ และเป็นข้อมูลชุดเดียวกันกับกราฟในรูป 4.12(ข) 4.13(ข) 4.14(ข) และ 4.15(ข) ตามลำดับ เพียงแต่นำเสนอในสเกลแกน y ที่ต่างกัน ในรูปชุด (ก) จะเป็นการนำเสนอในสเกลแบบเชิงเส้น ซึ่งใช้สำหรับหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ส่วนในรูปชุด (ข) เป็นการนำเสนอในสเกลแบบ Semi-log จะแสดงให้เห็นช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มได้อย่างชัดเจน โดยเป็นบริเวณที่มีเส้นกราฟเกือบเป็นเส้นตรงเมื่ออยู่ในสเกลแบบ Semi-log

เมื่อพิจารณาในส่วนก่อนแรงดันขีดเริ่มจะพบว่า แรงดันขีดเริ่มใน PMOIS มีค่าเท่ากับ -4.3 V และ -3.3 V เมื่อฐานรองมีพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นเป็น $600 \Omega\text{-cm}$ และ $5 \Omega\text{-cm}$ ตามลำดับ ส่วนแรงดันขีดเริ่มใน NMOIS มีค่าเท่ากับ 1.5 V และ 1.0 V เมื่อฐานรองมีพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นเป็น $600 \Omega\text{-cm}$ และ $5 \Omega\text{-cm}$ ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมบูรณ์ของแรงดันขีดเริ่มใน PMOIS จะสูงกว่าค่าสัมบูรณ์ของแรงดันขีดเริ่มใน NMOIS ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยการพิจารณากระบวนการจับประจุของระดับพลังงานเนื่องจากอะตอมสารเจือทองคำในแถบหวงห้าม ภายใต้สภาวะที่ฐานรองชนิดอื่นได้รับการเติมอะตอมสารเจือทองคำด้วยความหนาแน่นสูง การทำงานของทรานซิสเตอร์ PMOIS จะใช้แรงดันเกตไบแอสเพื่อดึงคู่อิเล็กตรอนให้มาสะสมเป็นช่องทางเดินกระแส โอลบางส่วนจะถูกจับเนื่องจากผลการไอออนไนซ์ของระดับผู้ให้ของอะตอมทองคำ โดยใช้พลังงานในการไอออนไนซ์ 0.36 eV ในกรณีทรานซิสเตอร์ NMOIS จะใช้แรงดันเกตไบแอสเพื่อดึงคู่อิเล็กตรอนสร้างเป็นช่องทางเดินกระแส อิเล็กตรอนบางส่วนจะถูกจับเนื่องจากผลของการไอออนไนซ์ของระดับผู้รับของอะตอมสารเจือทองคำ โดยใช้พลังงานในการไอออนไนซ์ 0.54 eV เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองกระบวนการจะพบว่า การจับโฮลของอะตอมทองคำจะใช้พลังงานน้อยกว่าการจับอิเล็กตรอน ซึ่ง

เป็นผลทำให้ค่าสัมบูรณ์ของแรงดันเกตไบแอสของ PMOS จะมากกว่าค่าสัมบูรณ์ของแรงดันเกตไบแอสใน NMOS เนื่องจากใน PMOS จะจับโฮลมากกว่าการจับอิเล็กตรอนใน NMOS เมื่อพิจารณาค่าแรงดันเกตไบแอสเปรียบเทียบที่ทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะสะสมในช่องทางเดินกระแสมีค่าเดียวกัน

แรงดันขีดเริ่มเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับฐานรองและวัสดุที่ใช้สร้าง ดังสมการที่ (2.47) เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันขีดเริ่มของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์โดยมีพิถกความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นแตกต่างกัน จะพบว่า NMOS มีค่าแรงดันขีดเริ่มสูงขึ้น เมื่อพิถกความต้านทานของแผ่นผลึกมีค่าสูงขึ้น แต่สำหรับ PMOS แล้ว ผลที่ได้จากการทดลองจะตรงข้ามกับการประมาณการณ์ทางทฤษฎี ซึ่งคาดว่ามีสาเหตุมาจากการแพร่อะตอมทองคำลงในฐานรองไม่สามารถควบคุมได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากมีองค์ประกอบสำคัญหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ และ ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการสร้างจะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงทำให้ต้องพัฒนาวิธีการแพร่อะตอมทองคำให้มีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่าวิธีการที่ใช้การแพร่ด้วยอุณหภูมิในอนาคตต่อไป

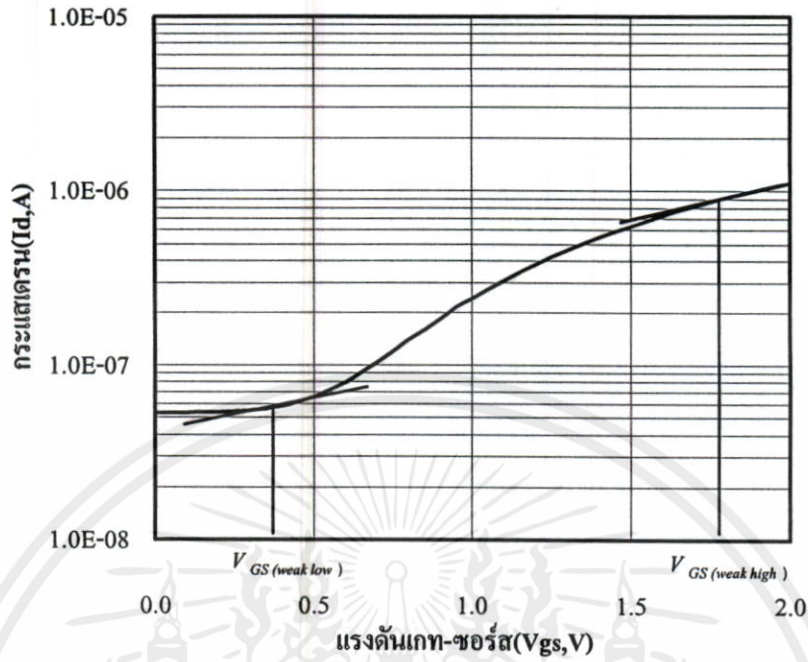
4.2.2 การกำหนดย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่ม

ค่าแรงดันขีดเริ่มเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นที่ใช้ระบุย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มอย่างคร่าว ๆ ได้ เนื่องจากวิธีการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยการประมาณกราฟเส้นตรงหาจุดตัดแกน จะได้ค่าแรงดันขีดเริ่มที่ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS}^{weak\ high}$) การกำหนดขอบเขตของย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มนั้น ในทางทฤษฎีของ PMOS สามารถระบุได้ด้วยศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำที่ช่องทางเดินกระแสดังต่อไปนี้

$$V_{GS(weak\ low)} = V_{FB} - |\phi_f| - \gamma(|\phi_f|)^{1/2} \quad (4.3)$$

$$V_{GS(weak\ high)} = V_{FB} - |2\phi_f| - \gamma(2|\phi_f|)^{1/2} \quad (4.4)$$

แต่ในทางการทดลองแล้วการวัดศักย์ไฟฟ้าที่ผิวช่องทางเดินกระแสเป็นไปได้ยาก จากข้อมูล $I_D - V_{GS}$ ที่วัดได้ สามารถระบุย่านปฏิบัติการได้โดยพิจารณาจากความชันของกราฟ ($\ln I_D / V_{GS}$) โดยจุดเริ่มเข้าสู่ย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS}^{weak\ low}$) และจุดสุดท้ายของย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ($V_{GS}^{weak\ high}$) จะมีความชันเท่ากับ 1 ส่วนตำแหน่งอื่น ๆ ในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มจะมีความชันมากกว่า 1



รูปที่ 4.16 แสดงการหาขอบเขตย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่ม

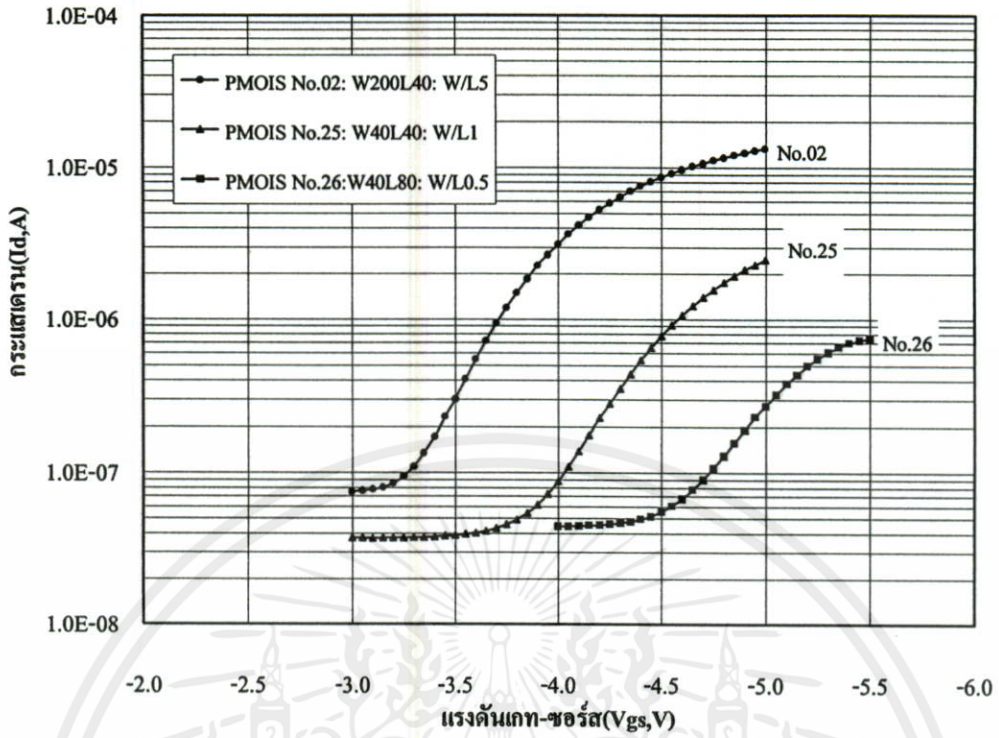
ตารางที่ 4.2 ความกว้างช่วงปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบของ PMOIS ที่มี W/L ต่างกัน โดยพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเท่ากับ 600 Ω-cm

Device No.	W (μm)	L (μm)	W/L	$V_{GS(weak\ low)}$ (V)	$V_{GS(weak\ high)}$ (V)	ความกว้างของช่วงปฏิบัติการ (V)
02	200	40	5	-3.15	-4.60	1.45
25	40	40	1	-3.70	-4.95	1.25
26	40	80	0.5	-4.45	-5.35	0.90

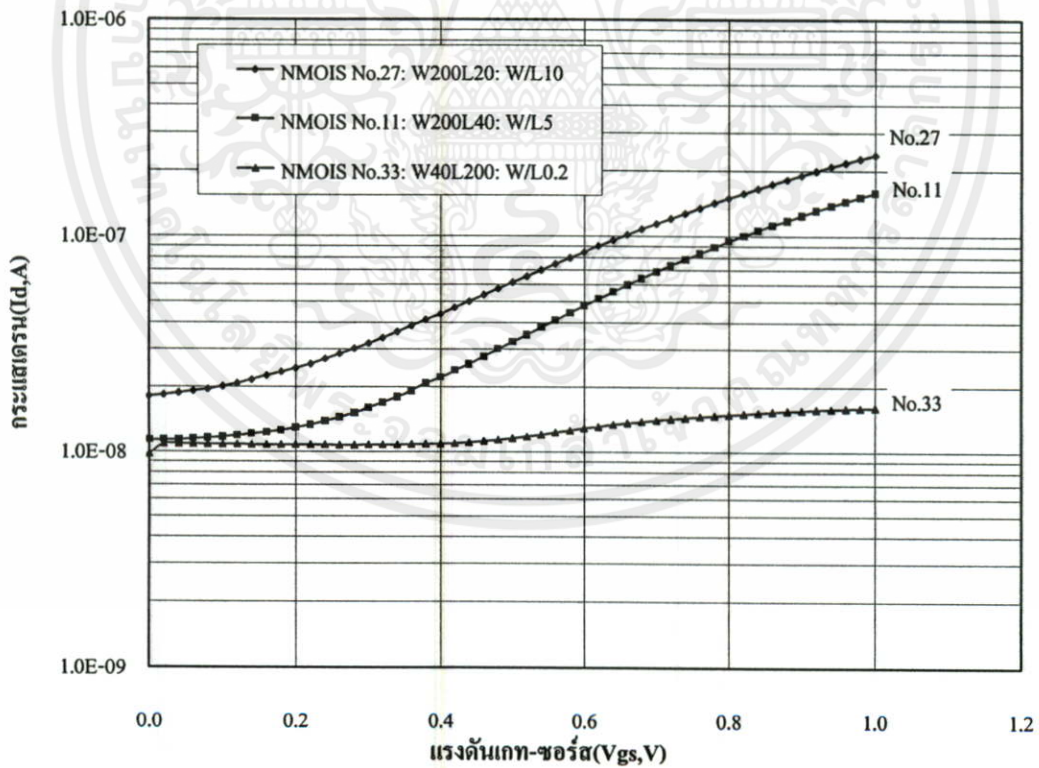
ตารางที่ 4.3 ความกว้างช่วงปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบของ PMOIS ที่มี W/L ต่างกัน โดยพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกเท่ากับ 5 Ω-cm

Device No.	W (μm)	L (μm)	W/L	$V_{GS(weak\ low)}$ (V)	$V_{GS(weak\ high)}$ (V)	ความกว้างของช่วงปฏิบัติการ (V)
03	80	40	2	-2.35	-3.85	1.50
12	30	60	0.5	-2.50	-3.80	1.30
25	40	40	1	-2.50	-3.95	1.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยไว้ด้วย



(ก) PMOIS 600 Ω-cm



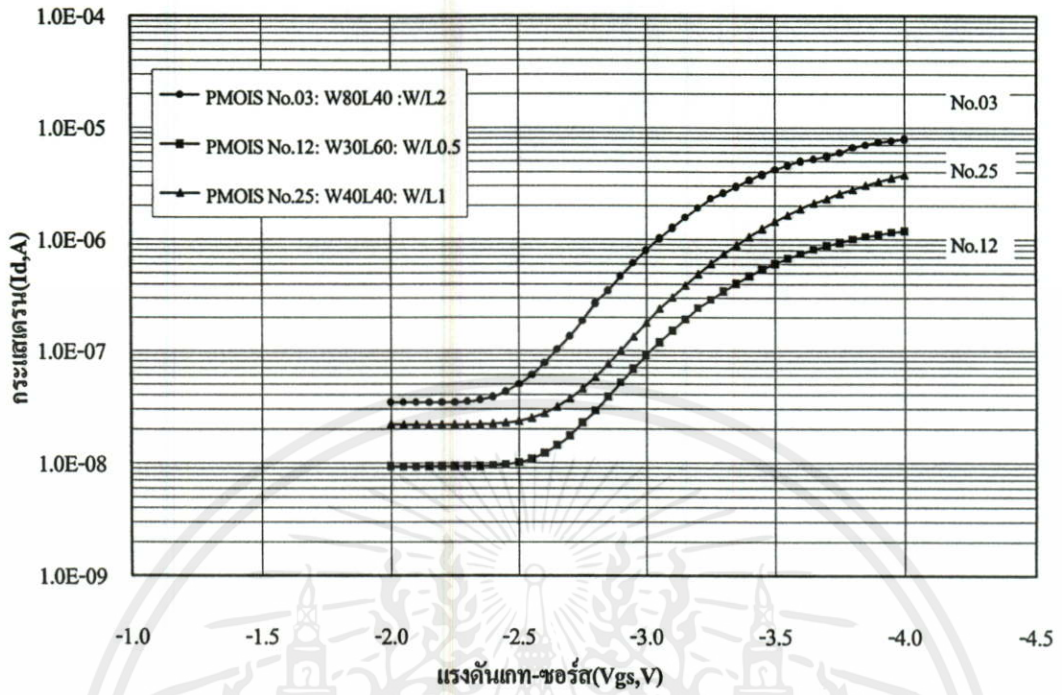
(จ) NMOIS 600 Ω-cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (จ) NMOIS 600 Ω-cm ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

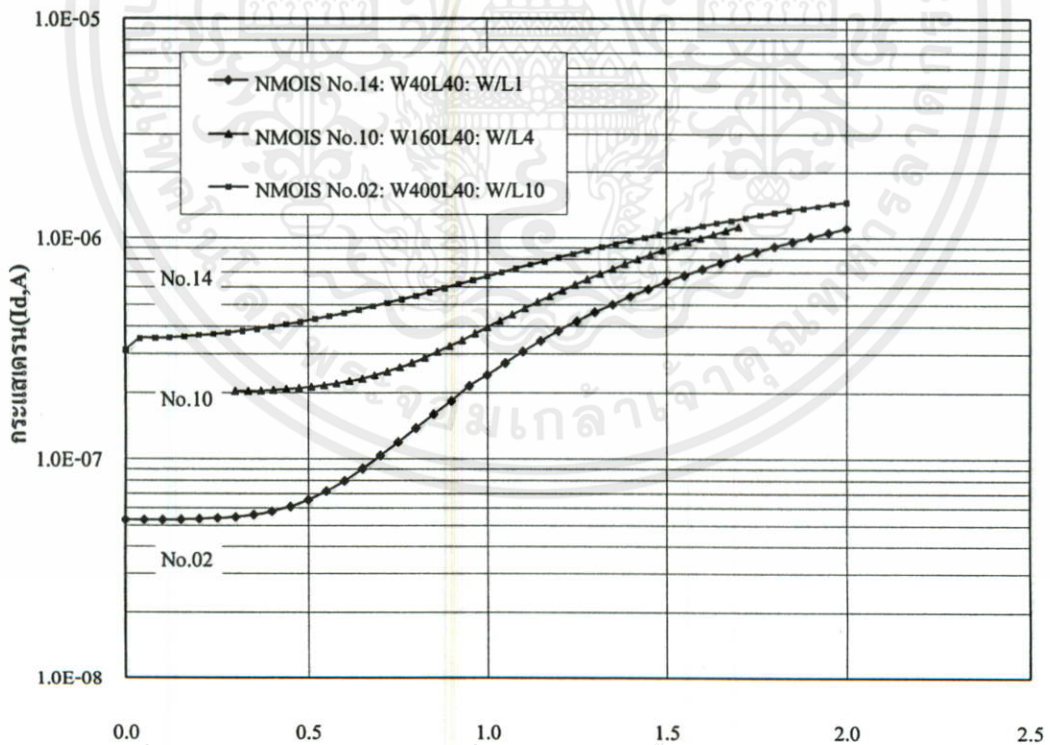
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งที่ 475 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร 02-2562000

รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบกระแสเดรน และแรงดันเกต-ซอร์ส ระหว่าง PMOIS และ NMOIS

พิกัดความต้านทาน 600 Ω-cm



(ก) PMOIS 5 Ω-cm



(ข) NMOIS 5 Ω-cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน แรงดันเกต-ซอร์ส(Vgs,V)ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบกระแสเดรน และแรงดันเกต-ซอร์ส ระหว่าง PMOIS และ NMOIS
พิกัดความต้านทาน 5 Ω-cm

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17, 4.18 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 พบว่า กระแสในช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มของ MOIS จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตรงกับค่า W/L ซึ่งเป็นตัวแปรในสมการกระแส เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์แบบ MOS ค่าความกว้างของช่วงปฏิบัติการของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ชนิดพี ที่มีฐานรองต่างกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -1.20 V สำหรับ PMOIS ที่มีพิคัดความต้านทาน $600 \Omega\text{-cm}$ และ -1.42 V สำหรับ PMOIS ที่มีพิคัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ จากข้อมูลที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองนั้นจะมีผลกระทบกับความกว้างของช่วงปฏิบัติการน้อยมาก เมื่อพิจารณาเทียบกับสมการ (4.3) และ (4.4) จะพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของฐานรองคือ V_{FB} และ γ [20] โดยที่การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทั้งสองจะส่งผลกระทบต่อแรงดันทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS อย่างเท่า ๆ กัน ตลอดย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม จึงทำให้ค่าความกว้างของย่านปฏิบัติการในการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลความเปลี่ยนแปลงของ ϕ_f

แรงดันแถบพลังงานราบ (V_{FB}) ในทางทฤษฎีแล้วมีค่าเท่ากับ $\Phi_M - \Phi_S$ ดังแสดงในสมการ (2.2) การเติมอะตอมทองคำทำให้ Φ_S มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก Φ_S คือ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างระดับพลังงานอิเล็กตรอนอิสระ (E_o) และ ระดับเฟอร์มิโนสารกึ่งตัวนำ (E_f) ดังนั้นผลที่ฐานรองสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงทำให้ ϕ_{MS} ของอุปกรณ์ MOIS ในการทดลองมีค่าเป็น

$$\phi_{MS} = \Phi_M - \left(\chi_{Si} + \frac{E_g}{2q} - |\phi_{fAu}| \right) \quad (4.5)$$

โดย ϕ_{fAu} ที่เปลี่ยนไปจาก ϕ_f เดิมสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการ (3.23) ซึ่งในที่นี้ ϕ_{MS} เมื่อสมมติให้ฐานรองได้รับการเติมทองคำเป็นจำนวน $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจะมีค่าเท่ากับ -0.6 V ในสารกึ่งตัวนำที่มีพิคัดความต้านทาน $600 \Omega\text{-cm}$ และ -0.7 V ในสารกึ่งตัวนำที่มีพิคัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ เมื่อพิจารณาในส่วน ϕ_{MS} ของ PMOIS พบว่าการส่งผลของอะตอมทองคำที่ทำให้ ϕ_{MS} มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลกระทบต่อแรงดันเกต-ซอร์ส ไบแอสในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มให้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

สำหรับ NMOIS แล้วจะให้ผลลัพธ์ที่ต่างออกไป เนื่องจากฐานรองของ NMOIS เป็นชนิดคอนชนิดเอ็น ที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ดังนั้นสมการกำหนดช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มใน NMOIS จึงเป็น

$$V_{GS(weak\ low)} = V_{FB} \quad (4.6\text{ ก})$$

$$V_{GS(\text{weak high})} = V_{FB} + \phi_f + \gamma(\phi_f)^{1/2} \quad (4.6 \text{ ข})$$

จากการพิจารณาในทางทฤษฎีจะเห็นว่า NMOIS มีแนวโน้มการทำงานที่จะสามารถใช้เป็นทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านแรงดันต่ำได้ดีเนื่องจากมีช่วงการทำงานที่ต่ำกว่าทรานซิสเตอร์แบบ MOS ดังแสดงในสมการที่ (4.3) และ (4.4) แต่จากการทดลองวัดคุณสมบัติของ NMOIS ในการทำงานย่านนี้พบว่า คุณสมบัติของ NMOIS ที่สร้างได้มีคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกัน และมีค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มสูง เมื่อเทียบกับ PMOS จึงทำให้ต้องมีการพัฒนากระบวนการสร้างสำหรับ NMOIS ต่อจึงจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง แต่อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลที่ได้นำเสนอมาในรูปที่ 4.13 และ 4.15 ได้แสดงให้เห็นว่า NMOIS มีแนวโน้มที่จะทำงานได้ในช่วงแรงดันเกต-ซอร์ส ไปแอสต์จริง ซึ่งเป็นไปตามแนวทางที่ได้พิจารณาจากทฤษฎี

ในส่วนของสัมประสิทธิ์ของแผ่นฐานรอง (γ) เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอะตอมสารเจือในฐานรองโดยตรง โดยมีความสัมพันธ์กับค่า Debye Length (L_D) ดังความสัมพันธ์

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\phi_T \cdot C_{FB}}}{C_{OX}} \quad (4.7)$$

เมื่อ

$$C_{FB} = \frac{K_{Si} \epsilon_o}{L_D}$$

จากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า อะตอมทองคำจะมีผลทำให้ γ เปลี่ยนไปได้โดยเปลี่ยนแปลงที่ L_D สมการดั้งเดิมของค่า Debye length ของฐานรองสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น [27] เป็นไปตามสมการที่ (4.8)

$$L_{Dn} = \sqrt{\frac{K_{Si} \epsilon_o \phi_T}{qn_o}} \approx \sqrt{\frac{K_{Si} \epsilon_o \phi_T}{qN_D}} \quad (4.8)$$

จากการพิจารณาว่าอะตอมสารเจือชนิดอื่น ที่เป็น shallow level เกิดการไอออนไนซ์ได้หมดทุกตัวจึงทำให้สามารถประมาณได้ว่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดอื่น มีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นประจุพาหะข้างมากในฐานรอง (อิเล็กตรอน) แต่ในส่วนของฐานรองสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ความหนาแน่นประจุพาหะข้างมากใน

ฐานรองลดลง เนื่องจากอะตอมทองคำทำหน้าที่เป็น recombination center และอะตอมทองคำเป็น พลังงานในระดับลึก ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้การประมาณความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสุทธิ เท่ากับความหนาแน่นประจุพาหะข้างมากในฐานรองได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสารเจือที่เป็น deep level นั้นมีระดับพลังงานอยู่ใกล้กับระดับเฟอร์มิจึงทำให้ไม่สามารถไอออไนซ์ได้ทั้งหมดในสภาวะ ทำงานปกติ ดังนั้นในกรณีของ MOIS ค่าสมการ Debye length จะสามารถปรับปรุงได้เป็น

$$L_{D(MOIS)} \approx \sqrt{\frac{K_{Si} \epsilon_0 \phi_T}{q n_{Au}}} \quad (4.9)$$

โดย

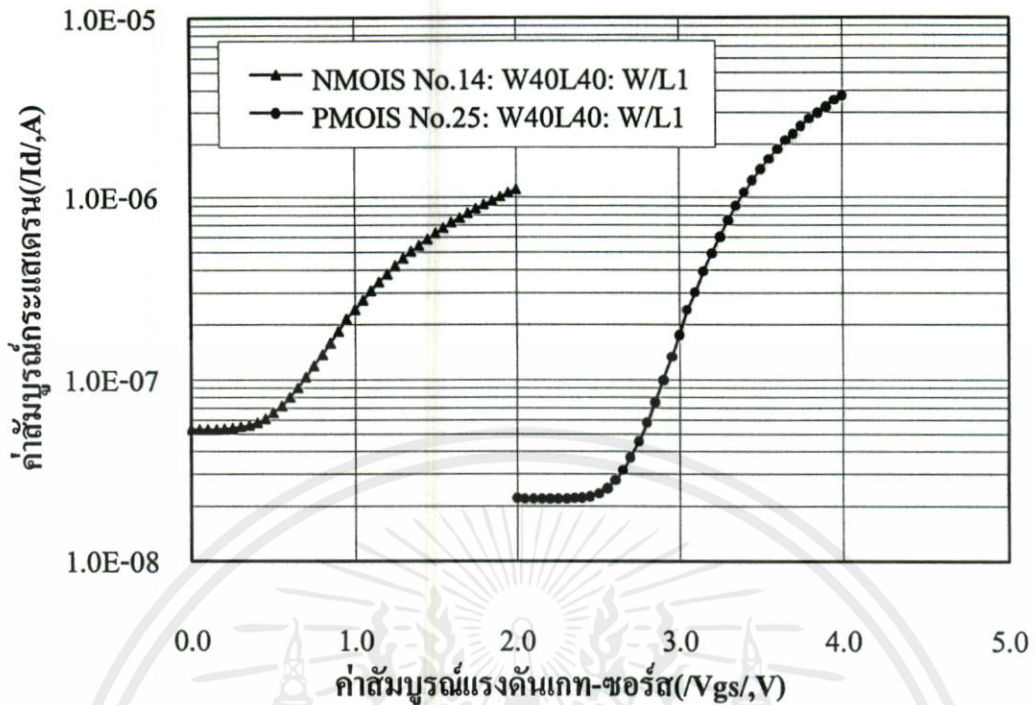
$$n = N_V e^{(E_V - E_F)/kT} + \frac{[Au]}{1 + e^{-(E_{Au^+} - E_F)/kT}} + \frac{N_D}{1 + e^{-(E_D - E_F)/kT}} - \frac{[Au]}{1 + e^{(E_{Au^-} - E_F)/kT}} \quad (4.10)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเทอมที่ 2 และเทอมที่ 4 ทางด้านขวามือของสมการ (4.10) จะพบว่าฐานรองสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ที่ได้รับการเติมอะตอมสารเจือทองคำจะมีเทอมที่ 4 มากกว่า เทอมที่ 2 เนื่องจาก E_{Au^-} อยู่ใกล้ระดับเฟอร์มิมากกว่า E_{Au^+} ซึ่งหมายความว่า ความหนาแน่นประจุ พาหะของฐานรองที่ลดลง เนื่องจากผลของการเติมอะตอมทองคำจะทำให้ค่า Debye length มีค่าลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้สนามไฟฟ้าสามารถดึงดูดประจุพาหะให้มาสะสมที่บริเวณผิวได้น้อยลง ความหนาแน่นการกระจายตัวของประจุในช่องทางเดินกระแสจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4 ความกว้างช่วงปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบระหว่าง PMOIS และ NMOIS ที่มี $W = 40 \mu\text{m}$, $L = 40 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$

ชนิดของ MOIS	Device No.	$V_{GS(weak\ low)}$ (V)	$V_{GS(weak\ high)}$ (V)	ค่าความกว้างของช่วง ปฏิบัติการ (V)
PMOIS	25	-2.50	-3.95	1.45
NMOIS	14	0.40	1.80	1.40

จากข้อมูลในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของทรานซิสเตอร์ แบบ MOIS ชนิดพี และ ชนิดเอ็น ที่มีขนาดช่องทางเดินกระแสเท่ากันพบว่า NMOIS มีระดับย่าน ปฏิบัติการก่อนแรงดันขีดเริ่มต่ำกว่า PMOIS ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากการที่ค่าสัมบูรณ์แรงดันขีดเริ่ม ของ NMOIS มีค่าต่ำกว่าค่าสัมบูรณ์แรงดันขีดเริ่มของ PMOIS ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแสและแรงดันเกต-ซอร์ส ระหว่าง PMOIS และ NMOIS พิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$

เมื่อนำข้อมูลจากรูป 4.12(ค), 4.13(ค), 4.14(ค) และ 4.15(ค) มาพิจารณาร่วมด้วยจะพบว่า การทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่มของ NMOIS จะทำงานได้ดีในช่วงที่มีการไบแอสแรงดัน V_{DS} ต่ำกว่า PMOIS เล็กน้อย ซึ่งสำหรับ NMOIS หมายเลข 14 ที่มีพิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ จะสามารถไบแอสแรงดัน V_{DS} ได้สูงสุดประมาณ 2 V แต่เมื่อให้แรงดันไบแอส V_{DS} สูงขึ้น จะทำให้เส้นกราฟเกิดการโค้งขึ้น ส่งผลต่อกระแสเดรนทำให้มีค่าไม่คงที่ตลอดช่วงการทำงาน โดยปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดกับ PMOIS ที่ได้รับการไบแอสแรงดัน V_{DS} ไปจนถึง -5 V (แรงดันมาตรฐานของการประยุกต์ใช้งานดิจิทัล) ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อระหว่าง ซอร์ส และเดรน กับช่องทางเดินกระแส เนื่องจาก NMOIS เป็นรอยต่อแบบ N⁺-N จึงทำให้ความสามารถในการปิดกั้นกระแสนอนกลับทำได้ไม่ดีนัก เมื่อได้รับการไบแอสแรงดันย้อนกลับค่าสูง ๆ ซึ่งเป็นข้อควรระวังอีกประการหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม อย่างไรก็ตาม ในช่วงการทำงานแรงดันต่ำจะพบว่าทรานซิสเตอร์แบบ MOIS จะสามารถทำงานได้สมบูรณ์ตามฟังก์ชันของทรานซิสเตอร์ในโหมดเอ็นฮานซ์เมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การทดลอง และผลการทดลองหาค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม จากนิยามที่ได้แสดงในบทที่ 2 ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม หมายถึง แรงดันเกตไบแอส ที่ทำให้กระแสเดรนมีค่าลดลงจากเดิม 10 เท่า ซึ่งมีสมการเป็น

$$S_t = 2.3 \left[\frac{d \ln I_D}{dV_{GS}} \right]^{-1} \quad (4.11)$$

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันเกต-ซอร์ส ของ MOIS ที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อหาความชัน ($\ln I_D / V_{GS}$) สามารถทำการหาค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มต่อได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนนี้จำเป็นต้องปรับค่ากระแสเดรนด้วยฟังก์ชันลอการิทึม (Logarithm) ซึ่งจำนวนที่เป็นลบภายใต้ฟังก์ชันนี้ไม่นิยามในทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นกระแสเดรนที่เป็นลบจะไม่สามารถหาค่าได้ ในส่วนของการวิเคราะห์ผลจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับค่ากระแสเพื่อไม่ให้เป็นจำนวนลบ และเพื่อป้องกันการสับสนในส่วนของกราฟวิเคราะห์ข้อมูล ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการปรับค่ากระแส และแรงดันให้เป็นจำนวนบวกทั้ง PMOIS และ NMOIS เพื่อที่จะได้สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของการทำงานย่านนี้ระหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสองชนิดได้โดยตรง

ภายหลังจากทำการปรับข้อมูลกระแส และแรงดันเรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลตลอดย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ในรูปสมการเส้นตรง ความชันของสมการเส้นตรงที่ได้จะเป็นตัวแทน ค่า ($\ln I_D / V_{GS}$) ตลอดย่านการทำงาน จากนั้นจึงสามารถหาค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม โดยใช้ความสัมพันธ์

$$S_t = 2.3 \left[\frac{1}{\text{Data slope}} \right] \quad (4.12)$$

ข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแผ่นผลึกฐานรอง และโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับขนาดของช่องทางเดินกระแสแต่อย่างใด ทรานซิสเตอร์แบบ PMOIS จะมีค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.59 V/dec. และ 0.67 V/dec. เมื่อแผ่นผลึกฐานรองมีค่าพิทักความต้านทานเท่ากับ 5 Ω -cm และ 600 Ω -cm ตามลำดับ ส่วนทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS จะมีค่าความชันย่านการ

ทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 1.08 V/dec. และ 0.79 V/dec. เมื่อแผ่นผลึกฐานรองมีค่าพิคัดความต้านทานเท่ากับ 5 Ω -cm และ 600 Ω -cm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มเปรียบเทียบของ MOIS ที่มี W/L ต่างกัน

Resitivity (Ω -cm)	ชนิดของ MOIS	Device No.	ช่องทางเดินกระแส		W/L	S_i (V/dec.)
			W (μ m)	L (μ m)		
5	PMOIS	03	80	40	2	0.59
5	PMOIS	12	30	60	0.5	0.58
5	PMOIS	25	40	40	1	0.60
5	NMOIS	14	40	40	1	1.08
600	PMOIS	02	200	40	5	0.63
600	PMOIS	25	40	40	1	0.64
600	PMOIS	26	40	80	0.5	0.74
600	NMOIS	27	200	20	10	0.79

จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าภายใต้กระบวนการสร้างเดียวกัน PMOIS จะมีความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มต่ำกว่า NMOIS ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจากความกว้างของชั้นดีพลีชันที่อยู่ระหว่างชั้นอินเวอร์ชันและเนื้อภายในฐานรองสารกึ่งตัวนำมีค่าแตกต่างกัน ในกรณีของ NMOIS เป็นรอยต่อระหว่าง N-N⁺ ส่วนกรณีของ PMOIS เป็นรอยต่อระหว่าง P-N⁺ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะพบว่า ความกว้างของชั้นดีพลีชัน ในกรณีของ NMOIS จะแคบกว่าเนื่องจากมีความแตกต่างกันของระดับเฟอร์มิในวัสดุน้อยกว่า ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มในรูปความสัมพันธ์กับความกว้างของชั้นดีพลีชันภายใต้ช่องทางเดินกระแสจะเป็นดังสมการต่อไปนี้

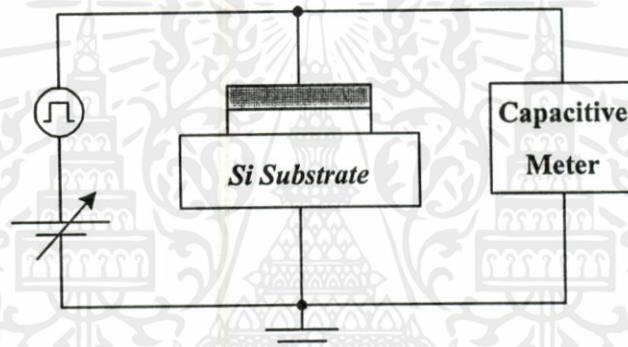
$$S_i = 2.3 \left(\frac{kT}{q} \right) \left[1 + \frac{K_{Si} x_{Ox}}{K_{Ox} x_{Si}} \right] \quad (4.13)$$

ผลความแตกต่างของค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มที่ได้แสดงให้เห็นถึงความไวการเปลี่ยนแปลงของกระแสตรงต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกต-ซอร์ส ซึ่งในกรณีของ PMOIS จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสตรงในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มมากกว่า

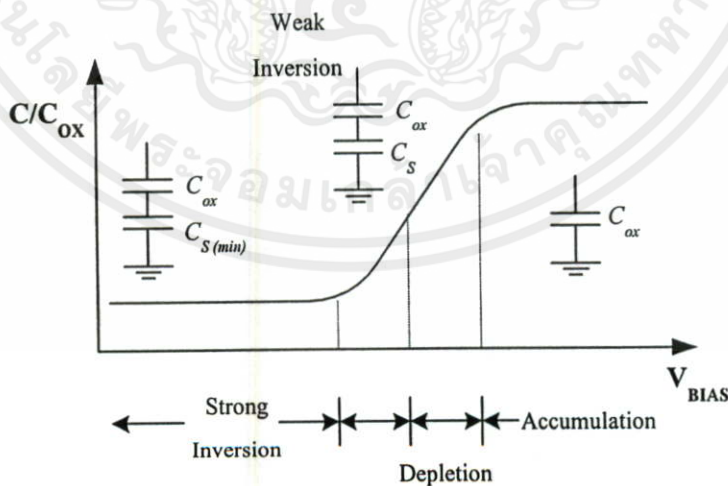
NMOIS เพราะว่า PMOIS ใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันเกต-ซอร์สน้อยกว่า NMOIS เพื่อให้กระแสเดรนเปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวน 10 เท่าเช่นเดียวกัน

4.2.4 การทดลอง และผลการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าใน MOIS

การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงประจุพาหะภายในช่องทางเดินกระแสสามารถทำได้โดยการวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V Characteristics) ระหว่างขั้วเกต และฐานรอง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำชุดเดียวกันกับการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน โดยวงจรสมมูลการวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MOIS เป็นดังในรูปที่ 4.20 การทดสอบจะทำการกำหนดช่วงแรงดันการวัด ความถี่ที่ใช้ในการวัด และช่วงเวลาหยุดคอยให้กับเครื่อง เพื่อทำการวัดความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบแอสค่าต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.20 วงจรสมมูลในการวัดค่าความจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS



เอกสารนี้รูปที่ 4.21 กราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปกราฟการตอบสนองความถี่สูงของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะมีรูปร่างดังกราฟในรูปที่ 4.21 ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดในกราฟเทียบได้กับแรงดันที่ทำให้เกิดการสะสมประจุพาหะในย่านแอกคิวเมชัน ในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับผลึกฐานรอง เส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อแรงดันไบแอสทำให้ช่องทางเดินกระแสเข้าสู่ย่านดีพลีชัน จากนั้นจะมีค่าต่ำสุดเมื่อเข้าสู่ย่านอินเวอร์ชัน

ย่านการทำงานที่อยู่ระหว่างช่วงดีพลีชันกับช่วงสตรองอินเวอร์ชันจะเป็นย่านการทำงานวิคอินเวอร์ชัน หรือช่วงการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม จากกราฟจะเห็นว่าผลของการสะสมประจุพาหะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าเล็กน้อย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขยายตัวของชั้นดีพลีชันไม่เต็มที่

การทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ขั้วเกตในโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ทำได้โดยการโพรบ (probe) แรงดันไบแอสในการวัดที่ขั้วเกตดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากนั้นทำการเรียกโปรแกรม HFALL¹ เพื่อควบคุมการวัดของระบบ HP 4061A จากนั้นจึงกำหนดค่าความถี่ที่ใช้ในการวัดเท่ากับ 10 kHz, ช่วงแรงดันของการเปลี่ยนแปลง -5 ถึง 5 V, ขนาดพื้นที่ของเกต (cm^2), ความหนาของชั้นออกไซด์ 700 Å, และอุณหภูมิขณะทำการวัด 25 องศาเซลเซียส

ผลการวัดกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของ MOISFET ที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีค่าพิคตกความต้านทานฐานรองเริ่มต้น 5 $\Omega\text{-cm}$ และ 600 $\Omega\text{-cm}$ เป็นดังกราฟในรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ ผลการวัดที่ได้จะมีความแตกต่างไปจากกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ไม่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.21 โดยจะสามารถอธิบายการทำงานโดยแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงที่แรงดันเกตมีค่าสูงกว่าฐานรองจะมีสถานะการทำงานอยู่ในสภาวะสะสมประจุ (accumulation) ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นไปในทำนองเดียวกัน คือมีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากฐานรองเดิมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ภายหลังจากได้รับการเติมอะตอมทองคำแล้วยังคงมีความเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่น้อย ๆ เมื่อได้รับการไบแอสแรงดันที่เป็นบวกให้กับเกตจึงทำให้เกิดการดึงคู่อิเล็กตรอนมาสะสมบริเวณช่องทางเดินกระแสที่ชั้นออกไซด์ การทำงานของช่องทางเดินกระแสในสภาวะนี้มีลักษณะคล้ายกับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าเท่ากับ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์นั่นเอง

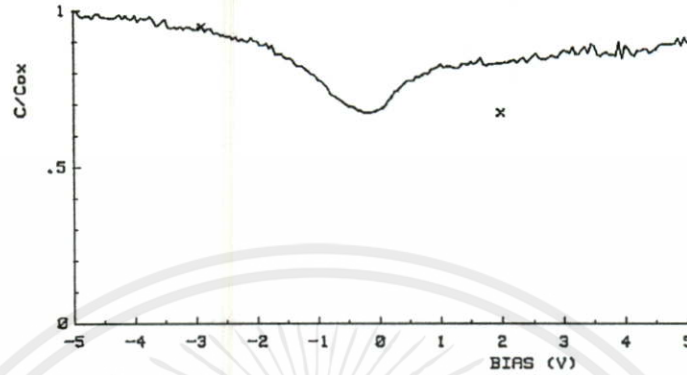
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

¹ HFALL : High Frequency C-V Measurement and Analysis Program for MOS Devices [29]

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= MOIS 5
 FREQ= 10kHz T= 298K
 AREA= 8.00E-05cm2 Dox= 700A
 Cox= 14.13pF Vth= 1.981V
 Cfb= 13.37pF Vfb= -2.9V
 Nsub= 1.5E+18/cm3 Qss/q= 2.0E+12/cm2

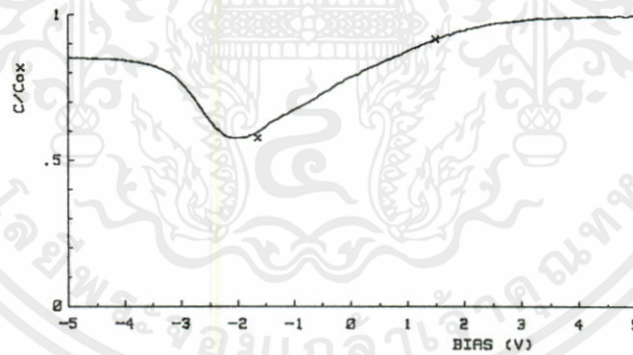


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันเกต-ซอร์ส ในช่วงการวัด ด้วยสัญญาณความถี่สูง ของ NMOIS ที่มีพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก 5 Ω-cm

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= MOIS 600
 FREQ= 10kHz T= 298K
 AREA= 8.00E-05cm2 Dox= 700A
 Cox= 7.51pF Vth= -1.549V
 Cfb= 6.89pF Vfb= 1.5V
 Nsub= 1.7E+17/cm3 Qss/q= 9.8E+11/cm2



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันเกต-ซอร์ส ในช่วงการวัด ด้วยสัญญาณความถี่สูง ของ NMOIS ที่มีพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึก 600 Ω-cm

ในช่วงที่แรงดันเกตมีค่าเป็นลบ ศักย์ไฟฟ้าลบที่เกตจะผลักอิเล็กตรอน และดึงคู่อิเล็กตรอนไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งในกรณีของฐานรองที่ไม่ได้รับการเติมอะตอมของค่า อิเล็กตรอน (majority carrier) จะมีความหนาแน่นมากกว่าโฮล (minority carrier) มาก เมื่อประจุทั้งสองเคลื่อนที่สวนทางกันจะทำให้เกิดการรวมตัวกันจนหมดไม่เหลือโฮลสะสมที่ช่องทางเดินกระแส ทำให้ความจุที่วัดได้เป็นความจุไฟฟ้าเมื่อชั้นดีพลีชันขยายตัวกว้างที่สุด แต่สำหรับกรณีของฐานรองที่ได้รับการเติมอะตอมของค่า อิเล็กตรอนและโฮลจะมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน (intrinsic-like semiconductor) ดังนั้น

เมื่อชั่วเกณฑ์ศักย์ต่ำกว่าฐานรองจะทำการดึงคูคโฮลให้เคลื่อนที่ไปสะสมที่ช่องทางเดินกระแส ถึงแม้ว่าการเคลื่อนที่สวนกันของประจุพาหะทั้งสองจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลมากกว่าในกรณีที่ไม่ได้รับการเติมอะตอมของค่าก็ตาม แต่การที่มีโฮลเป็นจำนวนใกล้เคียงกับอิเล็กตรอนจะมีโอกาสมากที่แนวการเคลื่อนที่ของประจุพาหะทั้งสองจะไม่พบกัน ดังนั้นจึงมีโฮลหลุดรอดจากการรวมตัวไปสะสมที่บริเวณช่องทางเดินกระแส ทำให้ความจุที่วัดได้ในกรณีแรงดันเกณฑ์ค่าต่ำกว่าฐานรองก็คือ ค่าความจุของออกไซด์เช่นเดียวกัน เพียงแต่ผลที่เกิดขึ้นเป็นการสะสมของโฮล (ประจุชนิดตรงข้ามกับการไบแอสให้ศักย์ไฟฟ้าที่เกณฑ์ค่าสูงกว่าฐานรอง)

ซึ่งจะเห็นว่าการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างขึ้นจากฐานรองสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินลิกที่ได้รับการเติมอะตอมของค่า นั้น จะสามารถทำหน้าที่เป็นเกตได้ทั้ง NMOIS และ PMOIS โดยในระหว่างการใช้งานจะต้องไบแอสแรงดันให้เกตอย่างเหมาะสม ซึ่งในกรณีของ NMOIS จะต้องไบแอสแรงดันที่เป็นบวกเมื่อเทียบกับฐานรองเพื่อสร้างช่องทางเดินกระแสจากอิเล็กตรอน ส่วน PMOIS จะต้องไบแอสแรงดันที่เป็นลบเมื่อเทียบกับฐานรองเพื่อสร้างช่องทางเดินกระแสจากโฮล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและบทวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิด MOIS โดยเปรียบเทียบการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ได้สร้างขึ้นบนแผ่นซิลิคอนผลึกเดี่ยวชนิดเอ็น ที่มีระนาบ <100> มีค่าพิคัดความต้านทานของฐานรองแตกต่างกัน 2 ค่า ได้แก่ $5 \Omega\text{-cm}$ และ $600 \Omega\text{-cm}$ โดยมีกระบวนการสร้างด้วยเทคโนโลยีความร้อน (Thermal process technology) ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การสร้างทรานซิสเตอร์แบบ MOIS สามารถสร้างโดยเริ่มต้นด้วยการแพร่แพร่สารเจือชนิดเอ็น (ฟอสฟอรัส) และสารเจือชนิดพี (โบรอน) เพื่อสร้างขั้วซอร์ส และเดรนของทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น และชนิดพี ตามลำดับ ให้มีค่าปริมาณของอะตอมสารเจือที่ผิวประมาณ 10^{15} อะตอม จากนั้นทำการสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ที่บริเวณช่องทางเดินกระแสให้มีความหนาประมาณ 700 \AA และทำการเติมสารเจือทองคำเข้าไปในเนื้อฐานรองทรานซิสเตอร์โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ แล้วทำการขั้วลิกทองคำที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 90 นาที ในบรรยากาศของไนโตรเจนบริสุทธิ์ และขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการสร้างขั้วไฟฟ้าด้วยโลหะอลูมิเนียม

จากนั้นทำการนำทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ไปวัดคุณสมบัติกระแสแรงดัน โดยใช้เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำรุ่น HP 4061A จากข้อมูลที่ได้สามารถระบุค่าแรงดันขั้วเริ่มต้นของทรานซิสเตอร์ ซึ่งใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับกำหนดขอบเขตการไบแอสแรงดันในย่านการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่มต้นได้โดย ค่าแรงดันขั้วเริ่มต้นที่วัดด้วยวิธีประมาณกราฟเส้นตรงหาจุดตัดแกนจะเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าแรงดันสูงสุดในย่านการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่มต้น จากข้อมูลอ้างอิงค่าแรงดันขั้วเริ่มต้นที่วัดได้จะสามารถทำการไบแอสทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ให้ทำงานอยู่ในขอบเขตย่านก่อนแรงดันขั้วเริ่มต้นได้โดยไบแอสแรงดันเกตให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันขั้วเริ่มต้นเล็กน้อย

ข้อมูลจากการทดลองแสดงให้เห็นย่านปฏิบัติการก่อนแรงดันขั้วเริ่มต้น โดย PMOIS จะมีค่าสัมบูรณ์แรงดันย่านการทำงานที่สูงกว่าค่าสัมบูรณ์ของแรงดันขั้วเริ่มต้นใน NMOIS ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการที่แผ่นฐานรองเดิมเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น แม้จะได้รับการเติมอะตอมทองคำ ซึ่งเป็นผลทำให้ระดับเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงในทิศเข้าสู่กึ่งกลางแถบหวงห้ามก็ตาม ระดับเฟอร์มิรวมยังคงทำให้ผลึกฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อยู่ จึงทำให้ NMOIS ใช้ค่าสัมบูรณ์แรงดันเกต-ซอร์สไบแอสต่ำกว่าค่า PMOIS เพื่อให้ทำงานได้ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่มต้น แต่การที่ฐานรองยังคงมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก็ส่งผลให้ NMOIS ในสภาวะทำงานก่อนแรงดันขั้วเริ่มต้นไม่สามารถรับแรงดันเดรน-ซอร์สไบแอสค่าสูง ๆ ได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากรอยต่อระหว่างขั้วเดรนและซอร์สกับ

ฐานรองเป็นรอยต่อแบบ N⁺-N จึงทำให้ความสามารถในการปิดกั้นกระแสย้อนกลับทำได้ไม่ดัดนัก เมื่อได้รับการไบแอสแรงดันย้อนกลับค่าสูง ๆ ซึ่งเป็นข้อควรระวังประการหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์แบบ MOIS สำหรับกรณีของ NMOIS ที่มีพิคกความต้านทานของแผ่นผลึก 600 Ω-cm จะไบแอสแรงดัน V_{DS} ได้สูงสุดประมาณ 1 V ส่วน NMOIS ที่มีพิคกความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรอง 5 Ω-cm จะไบแอสแรงดัน V_{DS} ได้ที่สูงสุดประมาณ 2 V ซึ่งผลที่เกิดกับ NMOIS นี้จะไม่ปรากฏใน PMOIS ถึงแม้ว่าจะทำการไบแอสแรงดัน V_{DS} สูงถึง -5 V ก็ตาม

ผลกระทบของอะตอมทองคำที่มีต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS นั้นจะปรากฏอยู่ในค่า ϕ_{MS} และ γ ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากแรงดันเกต-ซอร์สไบแอสในย่านปฏิบัติการของทรานซิสเตอร์แบบ PMOIS ที่ใช้ทดลองทั้งหมดมีความกว้างของช่วงปฏิบัติการใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาในสมการขอบเขตย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มจะพบว่า ตัวแปรในสมการที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของฐานรองนั้นมีอยู่ 3 ตัวแปรด้วยกันคือ V_{FB} , ϕ_f และ γ แต่ข้อมูลที่ได้จากการวัดแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลสำคัญกับย่านปฏิบัติการของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่ม คือ V_{FB} และ γ โดยที่ ϕ_f จะมีอิทธิพลน้อยกว่ามาก จากการวิเคราะห์ในส่วนของผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมอะตอมทองคำจะทำให้ย่านการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS มีแรงดันไบแอสที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการเดียวกัน

ในส่วนของระดับกระแสเดรนของทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มจะมีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง PMOIS และ NMOIS โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 5×10^{-7} A ถึง 9×10^{-6} A โดยประมาณ ซึ่งแสดงว่าความแตกต่างของชนิดประจุพาหะในฐานรองส่งผลกระทบต่อปริมาณกระแสในย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มน้อยมาก แต่จากผลการทดลองวัดค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มพบว่า คุณสมบัติของฐานรองภายในโครงสร้างของทรานซิสเตอร์จะส่งผลกระทบต่อค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่ม (S) ซึ่ง PMOIS จะมีค่าประมาณ 0.59 V/dec. และ 0.67 V/dec. เมื่อแผ่นผลึกฐานรองมีค่าพิคกความต้านทานเท่ากับ 5 Ω-cm และ 600 Ω-cm ตามลำดับ ส่วน NMOIS จะมีค่าประมาณ 1.08 V/dec. และ 0.79 V/dec. เมื่อแผ่นผลึกฐานรองมีค่าพิคกความต้านทานเท่ากับ 5 Ω-cm และ 600 Ω-cm ตามลำดับ การที่ PMOIS มีค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มต่ำกว่า NMOIS นี้ เป็นผลสืบเนื่องจาก PMOIS มีความกว้างของชั้นดีฟิชั่นใต้ช่องทางเดินกระแสกว้างกว่า NMOIS ซึ่งค่าที่ได้บ่งบอกถึงคุณสมบัติการตอบสนองของทรานซิสเตอร์กับสัญญาณแรงดันอินพุท โดย PMOIS จะสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันเกตอินพุทได้ดีกว่า NMOIS แต่เมื่อพิจารณาค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มของ MOIS ที่สร้างจากผลึกฐานรองที่มีพิคกความต้านทานของแผ่นผลึกเริ่มต้นแตกต่างกันจะพบว่า การสร้างทรานซิสเตอร์โดยใช้แผ่นผลึกฐานรองที่มีพิคกความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้นค่าสูงจะทำให้ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันซิดเริ่มของ

PMOIS และ NMOIS ใกล้เคียงกันมากขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพัฒนาเป็นวงจร CMOIS ที่ทำงานในย่านก่อนแรงดันขีดเริ่มต่อไป

อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบในขณะที่ทำการศึกษาคือ การควบคุมกระบวนการแพร่ของอะตอมของคาร์บอนในฐานรองที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากมีองค์ประกอบสำคัญหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ของอะตอมของคาร์บอน เช่น อุณหภูมิ และ ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการสร้างจะสามารถควบคุมตัวแปรอุณหภูมิการแพร่ได้เพียงอย่างเดียว ทำให้ผลการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันมาก ทั้งในส่วนของคุณลักษณะแตรน ค่าแรงดันไฟฟ้าในย่านปฏิบัติการ และ ค่าความชันย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งมีสาเหตุเนื่องมาจาก ทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS ใช้ Au ช่วยในการชดเชยเพื่อสร้างรอยต่อ ถ้าความหนาแน่นของทองคำมีค่าน้อยจะทำให้คุณสมบัติรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างฐานรองกับซิลิโคน และ แตรน ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ผลที่ได้เกิดความผิดพลาดไปจากที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาวิธีการแพร่อะตอมของคาร์บอนให้มีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่าวิธีการที่ใช้แพร่ด้วยอุณหภูมิในอนาคตต่อไป

สำหรับส่วนของการนำไปประยุกต์ใช้งาน ช่วงสับเทรตโซลมีกระแสเอาต์พุตต่ำจึงไม่เหมาะที่จะใช้ขับอุปกรณ์กำลัง แต่ด้วยข้อดีที่มีกระแสรั่วไหล (Leakage current) ต่ำกว่าช่วงการทำงานเหนือแรงดันขีดเริ่มมาก การทำงานในช่วงนี้จึงมีสถานะ normally off ที่ดี เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อย (Low-power applications) เช่น วงจรหน่วยความจำแบบ memory-cell capacitors เพราะจะช่วยเพิ่มเวลาในการคายประจุไฟฟ้า หรืออาจจะนำไปใช้กับระบบที่ใช้แบตเตอรี่ (Battery) เป็นส่วนจ่ายกำลัง ซึ่งจะช่วยให้ใช้งานแบตเตอรี่ได้นานขึ้น การทำงานในย่านนี้ยังมีบทบาทสำคัญกับเทคโนโลยีที่ต้องการเชื่อมระบบอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับระบบประสาทของสิ่งมีชีวิต เพราะว่าการทำงานของระบบประสาทเป็นการเคลื่อนที่ของสารประกอบไอออนที่มีกระแสและแรงดันต่ำมาก การตรวจจับสัญญาณรูปแบบนี้จึงเหมาะที่จะใช้ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS ที่ทำงานในช่วงก่อนแรงดันขีดเริ่มเป็นส่วนตรวจจับสัญญาณเนื่องจากเป็นทรานซิสเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงมาก (เท่ากับอิมพีแดนซ์ของออกไซด์) นอกจากนั้นการทำงานย่านนี้ยังสามารถตรวจจับสัญญาณขนาดเล็กที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มได้ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้อยู่ในขั้นตอนของการศึกษา และพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สัจจา ส่งศิริ. “การศึกษา วิจัย และพัฒนาเฟดที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS.” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2532.
- [2] จิรวัดน์ ปานกลาง. “การศึกษา วิจัย และพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรวมขนาดเล็ก.” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [3] สุกกัลย์ วัฒนการุณ. “การศึกษา และวิจัยทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ CMOIS ที่มีช่องทางเดินรูปวี” วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [4] Titiroongruang, W. “MOIS Research.” [Online]. Available : <http://www.kmitl.ac.th/~ktwisut/mois.htm>. 1999.
- [5] Sze, S.M. **Semiconductor Devices : Physics and Technology**. Singapore : John Wiley & Sons, Inc. 1985.
- [6] Taur, Y. and Ning, T.H. **Fundamentals of Modern VLSI Devices**. New York : Cambridge University Press. 1998.
- [7] Grove, A. S. **Physics and Technology of Semiconductor Devices**. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1967.
- [8] Muller, R.S. and Kamins, T.I. **Device Electronics for Integrated Circuits**. 2nd Ed. Singapore: John Wiley & Sons, Inc. 1981.
- [9] Sah, C.T. **Fundamentals of Solid-State Electronics**. Reprinted. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1995.
- [10] Pao, H.C. and Sah, C.T. “Effect of Diffusion Current on Characteristics of Metal-Oxide (Insulator)-Semiconductor Transistors.” *Solid State Electronics*, vol.9, 1966, pp.927-937.
- [11] Baccarani, G.; Rudan, M. and Spadini, G. “Analytical i.g.f.e.t model including drift and diffusion currents.” *Solid-State and Electron Devices*, vol.2, no.2, March,1978, pp.62-68.
- [12] Nicollian, E.H. and Brews, J.R. **MOS(Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology**. Singapore : John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [13] Yang, E.S. **Microelectronic Devices**. New York : McGraw-Hill, Inc.,1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์สงวนเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Tsividis, Y.P. **Operation and Modeling of The MOS Transistor**. 2nd Ed. Singapore : McGraw-Hill, Inc.,1999. *
- [15] Tsividis, Y. "Moderate Inversion in MOS Devices." *Solid State Electronics*, vol. 25, no. 11, 1982 , pp. 1099-1104. also see "Erratum" : *Solid State Electronics*, vol. 26, no. 8, 1983, p. 823.
- [16] Tsividis, Y. and Masetti, G. "Problems in Precision Modeling of the MOS Transistor for Analog Applications." *IEEE Transaction on Computer-Aided Design*, vol. CAD-3, no. 1, January, 1984, pp. 72-79.
- [17] Schroder, D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [18] Wolf, S. **Silicon Processing for The VLSI Era Volume 3: The Submicron MOSFET**. California : Lattice Press. 1995.
- [19] Pearson, G. L. and Bardeen, J. "Electrical Properties of Pure Silicon and Silicon Alloys Containing Boron and Phosphorus." *Physical Review*, vol. 75, no. 5, March 1, 1949, pp. 865-883.
- [20] Sze, S.M. **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd Ed. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1981.
- [21] Milnes,A.G. **Deep Impurities in Semiconductors**. New York: John Wiley & Sons,Inc.1973.
- [22] Ghandhi, S. K. **VLSI Fabrication Principles : Silicon and Gallium Arsenide**. 2nd Ed. New York : John Wiley & Sons,Inc.1994.
- [23] Puksec, J. D. and Gradisnik, V. "Influence of Shallow Impurity on Steady-State Probability Function of Multilevel Deep Impurity." *Electrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000. 10th Mediterranean*, vol. 1 , 2000 , pp. 185-188.
- [24] Mayer, J.W. and Lau, S.S. **Electronic Materials Science: For Integrated Circuits in Si and GaAs**. New York: Macmillan Publishing Company. 1990.
- [25] Wolf, H.F. **Semiconductor**. New York: Wiley-Interscience a division of John Wiley & Sons, Inc. 1971.
- [26] Valdinoci, M.; Colalongo, L.; Pellegrini, A. and Rudan, M. "Analysis of Conductivity Degradation in Gold/Platinum-Doped Silicon." *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. 43, no. 12, December, 1996, pp. 2269-2275.
- [27] Bube, R.H. **Photoconductivity of Solids**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1960.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] Warner, R.M. and Grung, B.L. **Semiconductor-Device Electronics**. International Ed. Florida: Saunders College Publishing. 1991.
- [29] Technical staffs, **Operation and Service Manual Model 4140B pA Meter/DC Voltage Source**. Tokyo: Yokogawa-Hewlett-Packard, ltd. 1980.
- [30] Parnklang, J.; Jindajitawat, P. and Titiroongruang, W. "Subthreshold Operation of Moiss Devices : Boundary of Operation." 2000 Tencon Proceeding, vol. III, September 24-27, 2000, pp. III-25 to III-28.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติสำคัญของวัสดุ

ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ (Physical Constants)

Quantity	Symbol	Value
Angstrom unit	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-8} \text{ cm}$
Avogadro constant	N_{AVO}	$6.02204 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Bohr radius	a_B	0.5291 Å
Boltzmann constant	k	$8.627 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
Elementary charge	q	$1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$
Electron rest mass	m_o	$0.91095 \times 10^{-30} \text{ kg}$
Electron volt	eV	$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$ $= 23.053 \text{ kcal/mol}$
Gas constant	R	$1.98719 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Permeability in vacuum	μ_o	$1.25663 \times 10^{-8} \text{ H/cm} (4\pi \times 10^{-9})$
Permittivity in vacuum	ϵ_o	$8.85418 \times 10^{-14} \text{ F/cm} (1/\mu_o \cdot c^2)$
Planck constant	h	$6.62617 \times 10^{-34} \text{ J-s}$
Reduced Planck constant	\hbar	$1.05458 \times 10^{-34} \text{ J-s} (h/2\pi)$
Proton rest mass	M_p	$1.67264 \times 10^{-24} \text{ kg}$
Speed of light in vacuum	c	$2.99792 \times 10^{10} \text{ cm/s}$
Standard atmosphere		$1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
Thermal voltage at 300K	kT/q	0.0259 V
Wavelength of 1-eV quantum	λ	1.23977 μm

ก.2 คุณสมบัติสำคัญของ Ge, Si, และ GaAs ที่อุณหภูมิ 300 K

	Ge	Si	GaAs
Atomic or molecular weight	72.60	28.09	144.63
Atoms or molecules / cm^3	4.42×10^{22}	5.00×10^{22}	2.21×10^{22}
Crystal structure	Diamond, 8 atoms/unit cell	Diamond, 8 atoms/unit cell	Zinc-blende, 8 atoms/unit cell

คุณสมบัติสำคัญของ Ge, Si, และ GaAs ที่อุณหภูมิ 300 K (ต่อ)

	<i>Ge</i>	<i>Si</i>	<i>GaAs</i>
Lattice constant (Å)	5.66	5.43	5.65
Density, ρ (g/cm ³)	5.32	2.33	5.32
Energy gap (eV)	0.67	1.11	1.40
Effective density of states			
Conduction band, N_c (cm ⁻³)	1.04×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}
Valance band, N_v (cm ⁻³)	6.0×10^{18}	1.04×10^{19}	7.0×10^{18}
Intrinsic resistivity, (Ω -cm)	47	2.3×10^5	10^8
Electron affinity, χ (V)	4.0	4.05	4.07
Intrinsic carrier Concentration, n_i (cm ⁻³)	2.4×10^{13}	1.45×10^{10}	$\sim 9 \times 10^6$
Lattice (intrinsic) Moblilities (cm ² /V sec)			
Electrons	3900	1350	8600
Holes	1900	480	250
Dielectric constant	16.3	11.7	12
Breakdown field (V/ μ)	~ 8	~ 30	~ 35
Melting point (°C)	937	1415	1238
Vapor pressure (Torr)	10^{-7} at 880 °C 10^{-9} at 750 °C	10^{-5} at 1250 °C 10^{-7} at 1050 °C	1 at 1050 °C 100 at 1220 °C
Specific heat, C_p (Joule/g °C)	0.31	0.7	0.35
Thermal conductivity, k_{th} (watt/cm °C)	0.6	1.5	0.81
Thermal diffusivity, $\kappa = \frac{k_{th}}{\rho C_p} \left(\frac{cm^2}{sec} \right)$	0.36	0.9	0.44
Linear coefficient of Thermal expansion $\frac{\Delta L}{L \Delta T} \left(\frac{1}{^\circ C} \right)$	5.8×10^{-6}	2.5×10^{-6}	5.9×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 คุณสมบัติสำคัญของ SiO₂ ที่อุณหภูมิ 300 K

	SiO ₂
Atomic or molecular weight	60.08
Atoms or molecules / cm ³	2.3×10^{22}
Crystal structure	Amorphous; tetrahedra. 50% covalent, 50% ionic bonding
Density, ρ (g/cm ³)	2.27
Energy gap (eV)	~8
DC resistivity (Ω -cm) at 25 °C	10^{14} - 10^{16}
Dielectric constant	3.9
Breakdown field (V/ μ)	~600
Melting point (°C)	~1700
Vapor pressure (Torr)	10^{-3} at 1450°C 10^{-1} at 1700°C
Specific heat, C_p (Joule/g °C)	1.0
Reflective index	1.46
Infrared absorption band (μ m)	9.3
Dielectric strength (V/cm)	10^7
Thermal conductivity, k_h (watt/cm °C)	0.014
Thermal diffusivity, $\kappa = \frac{k_h}{\rho C_p} \left(\frac{cm^2}{sec} \right)$	0.006
Linear coefficient of Thermal expansion $\frac{\Delta L}{L \Delta T} \left(\frac{1}{°C} \right)$	0.5×10^{-6}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แนวทางจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในช่วงทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่ม

จากผลการทดลองวัดคุณสมบัติการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในบทที่ 4 ได้แสดงให้เห็นว่าการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบนี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS แต่เนื่องจากฐานรองของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS เป็นสารกึ่งตัวนำแบบเสมือนอินทรินสิก (Intrinsic-like semiconductor) ในขณะที่ทรานซิสเตอร์แบบ MOS มีฐานรองที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิก (Extrinsic semiconductors) ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้อธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS จึงมีความแตกต่างจากทรานซิสเตอร์แบบ MOS ในคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับฐานรองสารกึ่งตัวนำ แบบจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่ใช้ในโปรแกรม Spice นั้น จะใช้การประมาณค่าความหนาแน่นประจุพาหะข้างมากในฐานรองเท่ากับค่าความหนาแน่นของสารเจือในฐานรอง (NSUB, Substrate doping density) ซึ่งการประมาณเช่นนี้มีความสมเหตุสมผลกับฐานรองที่เป็นเอ็กทรินสิก แต่ในกรณีของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS แล้ว จะไม่สามารถประมาณเช่นนั้นได้ เนื่องจากมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำเสมือนอินทรินสิก ดังนั้นการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประจุพาหะในทรานซิสเตอร์ MOIS จะต้องใช้สมการ (3.23) เต็มรูปแบบ ซึ่งจะสามารถแยกพิจารณาการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS และ PMOIS ออกจากกันได้ดังต่อไปนี้

ทรานซิสเตอร์แบบ MOS ที่มีช่องทางเดินกระแสเอ็น จะต้องสร้างบนฐานรองสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินสิกชนิดพี ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าชนิดตรงข้ามกับบริเวณช่องทางเดินกระแส ดังนั้นเมื่อพิจารณาเทียบกับทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่มีช่องทางเดินกระแสเอ็นจะพบว่ามี ความแตกต่างกัน เนื่องจากทรานซิสเตอร์แบบ MOIS มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกันกับบริเวณช่องทางเดินกระแสเพียงแต่มีระดับเฟอร์มิอยู่ใกล้กับกึ่งกลางของแถบหวงห้าม ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากระดับพลังงานต่าง ๆ ของอะตอมสารเจือทองคำ ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองของทรานซิสเตอร์แบบ NMOS มาเป็นทรานซิสเตอร์แบบ NMOIS จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงสมการที่ใช้คำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฐานรองสารกึ่งตัวนำใหม่ ซึ่งไม่สามารถป้อนค่าให้กับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับฐานรองโดยตรงได้ เนื่องจากการป้อนค่าพารามิเตอร์ของฐานรองลงในแบบจำลองของ MOSFET โปรแกรม Spice จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณโดยคิดว่าเป็นฐานรองที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าชนิดตรงข้ามกับช่องทางเดินกระแส

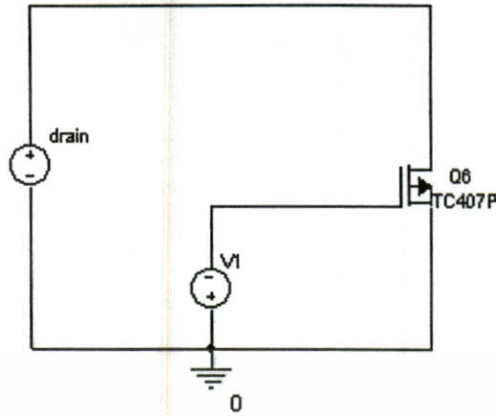
สำหรับทรานซิสเตอร์แบบ MOS และ ทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่มีช่องทางเดินกระแสไฟฟ้า จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเช่นเดียวกัน โดยเป็นชนิดตรงข้ามกับช่องทางเดินกระแส เพียงแต่มีระดับเฟอร์มิแตกต่างกันซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอะตอมทองคำ ดังนั้นการจำลองการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่มีช่องทางเดินกระแสไฟฟ้า จึงสามารถกระทำได้โดยทำการป้อนพารามิเตอร์ของฐานรองที่แตกต่างลงในแบบจำลองของทรานซิสเตอร์แบบ MOS ได้โดยตรง ผลการจำลองกราฟคุณสมบัติ I_D-V_{DS} ของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ที่มีช่องทางเดินกระแสไฟฟ้า แสดงในรูปแบบที่ ข.2 (ก) และ ข.3 (ก) โดยทำการป้อนค่าให้กับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของฐานรองลงในแบบจำลอง PSpice : Level 3 ของ PMOS ใน เบอร์ 4007¹ จากบริษัท Motorola ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านั้นได้แก่

<i>Parameter</i>	<i>Description</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
L	Channel length	meter	40×10^{-6}
W	Channel width	meter	40×10^{-6}
GAMMA	Bulk threshold parameter	Volt ^{1/2}	0.0010 @ 600 Ω.cm 0.0069 @ 5 Ω.cm
KP	Transconductance coefficient	Amp/Volt	7.395×10^{-6}
KAPPA	Saturation field factor	-	180 @ 600 Ω.cm 40 @ 5 Ω.cm
NSUB	Substrate doping density	1/cm ³	7.3272×10^9 @ 600 Ω.cm 3.4999×10^{11} @ 5 Ω.cm
TOX	Oxide thickness	meter	700×10^{-10}
U0	Surface mobility	cm ² /Volt.sec	60
VTO	Zero-bias threshold voltage	Volt	-4.3 @ 600 Ω.cm -3.2 @ 5 Ω.cm

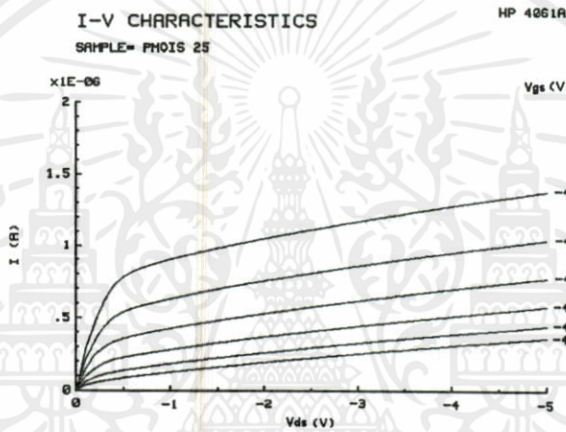
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

¹ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลอง PSpice : Level 3 ของ PMOS ใน เบอร์ MC14007 จากบริษัท Motorola ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทาง Motorola และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

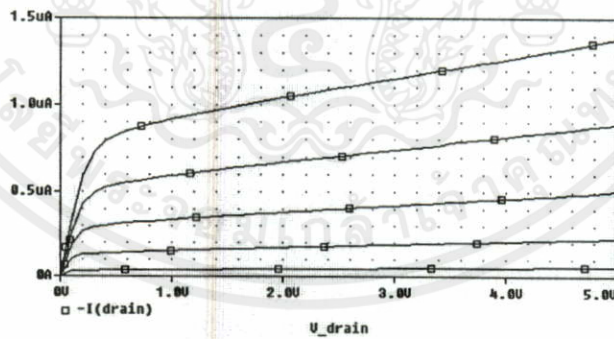
```
.model TC407P PMOS(LEVEL=3,LD=0.2U,VTO=-1.2,KP=1.73E-5,GAMMA=1.0,TOX=1.0E-7,
+ TPG=0,NSUB=5E15,L=8U,W=190U,WD=1.4U,CGSO=4.14E-10,CGDO=4.14E-10,
+ CGBO=1.61E-10,TT=100n)
```



รูปที่ ข.1 รูปวงจรมหะจําลองการทํางานของทรานซิสเตอร์ PMOIS



(ก) จากการวัดคุณสมบัติการทํางานของอุปกรณ์จริง



(ข) จากการจําลองด้วย PSpice ในโปรแกรม Orcad Release 9

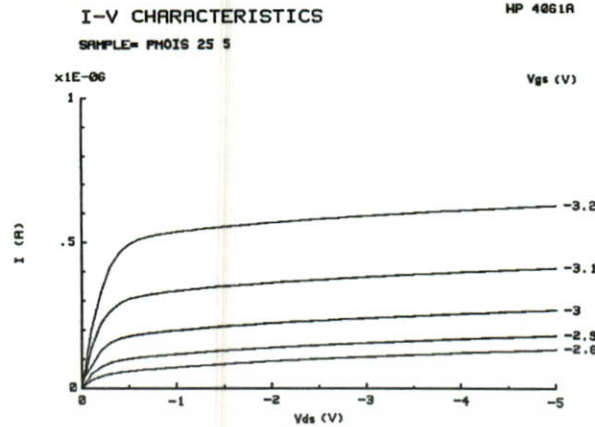
รูปที่ ข.2 กราฟคุณลักษณะ I_D-V_{DS} ของ PMOIS ที่มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$

ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกตไบเอส (V_G) จาก -4 ถึง -4.5 V, และ step 0.1V

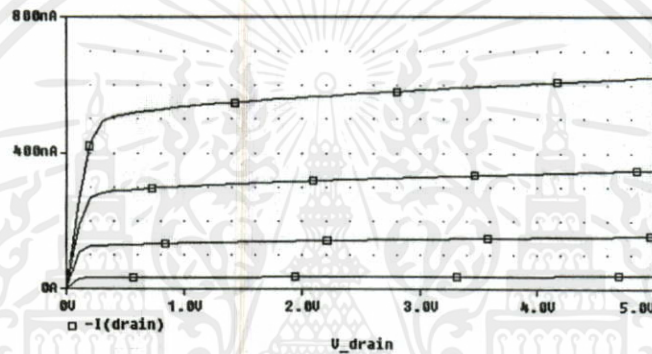
ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันเดรน-ซอร์สไบเอส (V_{DS}) จาก 0 ถึง -5 V, และ step 0.1V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) จากการวัดคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์จริง



(ข) จากการจำลองด้วย PSpice ในโปรแกรม Orcad Release 9

รูปที่ ข.3 กราฟคุณลักษณะ I_D-V_{DS} ของ PMOIS ที่มี $W = 40 \mu\text{m}$ และ $L = 40 \mu\text{m}$

ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกตไบเอส (V_G) จาก -2.8 ถึง -3.2 V, และ step 0.1 V

ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันเดรน-ซอร์สไบเอส (V_{DS}) จาก 0 ถึง -5 V, และ step 0.1 V

พิกัดความต้านทานของแผ่นสลิก ($5 \Omega\cdot\text{cm}$)

จากทฤษฎีที่พิจารณาโดยอาศัยการประมาณแบบ Gradual-channel approximation ได้แสดงให้เห็นว่า กระแสเดรนของทรานซิสเตอร์แบบ MOIS ในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มภายใต้สภาวะอิ่มตัว จะไม่ขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{DS} แต่ผลที่ได้จากการทดลองวัดคุณสมบัติจากอุปกรณ์จริง แสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟกระแสเดรนในย่านการทำงานก่อนแรงดันขีดเริ่มภายใต้สภาวะอิ่มตัวจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ V_{DS} มีค่าสูงขึ้น ทำให้เส้นกราฟมีความชันเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้อาจจะโดยอาจจะได้รับผลกระทบเนื่องมาจากกระแสรั่วไหลในรอยต่อ P-N ภายในโครงสร้างของอุปกรณ์ที่บริเวณรอยต่อซอร์ส-ฐานรอง และเดรน-ฐานรอง ซึ่งค่าของกระแสรั่วไหลนี้เป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างอุปกรณ์โดยตรง ดังนั้นการปรับปรุงผลการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ให้ใกล้เคียงกับผลการทดลองสามารถทำได้โดยป้อนค่าในทางปฏิบัติของอุปกรณ์ลงในพารามิเตอร์ KAPPA (empirical fitting parameter)

ประวัติผู้เขียน

นายภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีเมื่อ พ.ศ. 2540 โดยได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) จาก คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาโทเมื่อ พ.ศ. 2542 ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเดียวกัน ขณะเป็นนักศึกษาปริญญาโท ได้ทำการศึกษาหัวข้อวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ ขณะทำการศึกษาคือ “Subthreshold Operation of MOIS Devices : Boundary of Operation,” IEEE TENCON 2000 Proceedings : Intelligent System and Technologies for the New Millennium, vol. III, pp. 25-28.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้