

การศึกษาและวิจัยตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่มีซิงค์ออกไซด์
เป็นไดอิเล็กตริก

THE STUDY AND RESEARCH OF ZnO DIELECTRIC MOS CAPACITOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-622-947-8

การศึกษาและวิจัยตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่มีซิงค์ออกไซด์
เป็นไดอิเล็กตริก

THE STUDY AND RESEARCH OF ZnO DIELECTRIC MOS CAPACITOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ พ.ศ.2543 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...38022

วัน, เดือน, ปี 20 พ.ย. 2543

ISBN 974-622-947-8

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดแปลงเนื้อหาและห้องข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY AND RESEARCH OF ZnO DIELECTRIC MOS CAPACITOR



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อค. 2000 มาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ ISBN 974-622-947-8 เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

เอกสาร **SCHOOL OF GRADUATE STUDIES** ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากร **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ให้นำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและวิจัยตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่มี ZnO เป็นไดอิเล็กตริก

THE STUDY AND RESEARCH OF ZnO DIELECTRIC CAPACITOR

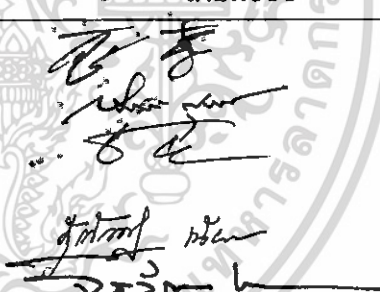
ชื่อนักศึกษา นางสาวอรุณพิชญ์ สุธรรมานันท์

รหัสประจำตัว 41061121

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.จิรวัดน์ ปานกลาง

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|-----------------------------|--|
| รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง |  |
| รศ.ดร.สมเกียรติ ศุกเดช | |
| รศ.สมศักดิ์ เขียวศิริกุล | |
| อาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ | |
| ผศ.จิรวัดน์ ปานกลาง | |

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 9 สิงหาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ วันที่ 10 ... เดือน ... พ.ศ. 2543

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาและวิจัยตัวเก็บประจุ โครงสร้างแบบ MOS ที่มี ซิงค์ออกไซด์เป็นไดอิเล็กตริก |
| นักศึกษา | น.ส.จารุพิชญ์ สุรธรรมานันท์ |
| รหัสประจำตัว | 41061121 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2543 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | ผศ.จิรวัดน์ ปานกลาง |

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเสนอตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ที่ได้รับการพัฒนา โดยการสร้างชั้นไดอิเล็กตริกด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภท MOS ทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นของวงจรโดยที่คุณสมบัติของวงจรยังคงเดิม ตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่สร้างด้วยซิงค์ออกไซด์นี้มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่วไปที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ โดยได้ทำการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS บนแผ่นฐานรองซิลิกอนระนาบ (100) ชนิดเอ็น, ชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ชั้นซิงค์ออกไซด์ถูกสร้างด้วยกระบวนการสปีดเทออร์รี่แบบ อาร์เอฟ ไดโอด และได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในค่านต่าง ๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำ คือ ค่าความจุไฟฟ้า, ค่าแรงดันขีดเริ่ม และค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ โดยการทดลองวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500-1500 อังสตรอม พบว่าความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกจะส่งผลต่อค่าแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์และค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยค่าความจุไฟฟ้าของซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะมีค่าเท่ากับ 139, 68, 46 นาโนฟารัดต่อเซนติเมตร² เมื่อความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เป็น 500-1500 อังสตรอม ตามลำดับ ค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่วัดได้มีค่าประมาณ 337 โวลต์ต่อไมครอน นอกจากนี้ได้ทำการวิจัยถึงผลของรูปร่างต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS พบว่ารูปร่างไม่มีผลต่อคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | The Study and Research of ZnO Dielectric MOS Capacitor |
| Student | Miss Jarupich Surathammanun |
| Student ID. | 41061121 |
| Degree | Master of Engineering |
| Programme | Electrical Engineering |
| Year | 2000 |
| Thesis Advisor | Assist. Prof. Jirawath Parnklang |

ABSTRACT

The new structure of MOS capacitor was presented using high permittivity dielectric, ZnO to enhance the capability of MOS devices. This structure gave improved circuit density with equivalent circuit performances. The MOS capacitor, which fabricated with ZnO operated as the general MOS capacitor with SiO₂ insulator. The capacitors in this investigation were fabricated by RF Diode Sputtering of the dielectric layer and using (100) oriented substrates of silicon, which are n-type, p-type and n-type doped with gold atoms. The electrical characteristics that the basic of semiconductor devices were studied, such as capacitance, threshold voltage and dielectric strength of ZnO. Capacitance-Voltage (C-V) characteristics were measured for various ZnO thickness (500-1500 Å). From the C-V measurement, ZnO thickness affected threshold voltage and ZnO capacitance. Capacitive densities of ZnO were 139, 68, 46 nF/cm² for various ZnO thickness 500 to 1500 Å respectively. Dielectric breakdown strength of ZnO is around 337 V/μm. The dielectric geometry was no affected the capacitance-voltage characteristics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.จิรวัดน์ ปานกลาง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ให้แนวความคิด คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนวิธีการแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาเพื่อเป็นความรู้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ปฏิบัติกรอยู่ ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างและทดสอบอุปกรณ์เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ และให้กำลังใจต่อผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่ได้ให้การสนับสนุนการเรียนมาโดยตลอดจนถึงทุกวันนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จารุพิชญ์ สุรธรรมานันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VI |
| สารบัญรูป | VII |
| สัญลักษณ์..... | XI |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา | 2 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 4 |
| 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา..... | 4 |
| บทที่ 2 ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ โลหะ-ซิงค์ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ..... | 5 |
| 2.1 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์..... | 5 |
| 2.2 ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ในอุดมคติ..... | 7 |
| 2.3 ประจุที่ผิวรอยต่อโคอีเล็กตริกกับสารกึ่งตัวนำ..... | 11 |
| 2.4 ความสัมพันธ์ของประจุและค่าแรงดันที่รอยต่อโคอีเล็กตริกและสารกึ่งตัวนำ..... | 17 |
| 2.5 ประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำ โครงสร้างแบบ MOS..... | 26 |
| 2.6 ประจุในชั้นออกไซด์ของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS..... | 29 |
| 2.7 ตัวเก็บประจุที่มีซิงค์ออกไซด์เป็นโคอีเล็กตริก..... | 34 |
| 2.8 ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อซิงค์ออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำ..... | 36 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง..... | 40 |
| 3.1 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS..... | 40 |
| 3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น (Wafer preparation)..... | 41 |
| 3.1.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)..... | 42 |
| 3.1.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)..... | 44 |
| 3.1.4 กระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์..... | 47 |
| 3.1.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (Metalization)..... | 55 |
| 3.1.6 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่ฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นหรือพี..... | 56 |
| 3.1.7 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่ฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ..... | 57 |
| 3.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS..... | 59 |
| 3.3 การศึกษาค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของ สารกึ่งตัวนำในตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS..... | 71 |
| 3.4 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์..... | 74 |
| 3.5 การศึกษาผลของรูปร่างต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS..... | 75 |
| 3.6 การศึกษาแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์..... | 78 |
| 3.7 การทดลองค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยการควบคุมความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์..... | 81 |
| บทที่ 4 สรุปและบทวิจารณ์..... | 85 |
| เอกสารอ้างอิง | 90 |
| ภาคผนวก ก การเติมอะตอมสารเจือทองคำ | 92 |
| ภาคผนวก ข ความเป็นไปได้ในการพัฒนา ZnO เป็นฉนวนบริเวณช่องทางเดินกระแสของ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS..... | 95 |

เอกสารประวัติผู้เขียน..... 98 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซิงค์ออกไซด์ในรูปของผลึกเดี่ยว..... | 6 |
| 3.1 ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS | 72 |
| 3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ | 73 |
| 3.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์ | 74 |
| 4.1 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่สร้างด้วยสาร ไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์ เปรียบเทียบกับซิลิกอนไดออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ..... | 88 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานและค่าสภาพยอมของสาร ไดอิเล็กทริก..... | 3 |
| 2.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์..... | 6 |
| 2.2 ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS..... | 7 |
| 2.3 แถบพลังงานในกรณีปรากฏการณ์สะสมประจุและประจุที่รอยต่อ..... | 9 |
| 2.4 แถบพลังงานของปรากฏการณ์ปลอดพาหะและประจุที่รอยต่อ..... | 10 |
| 2.5 แถบพลังงานของปรากฏการณ์ผันกลับและประจุที่รอยต่อ..... | 11 |
| 2.6 โครงสร้างแถบพลังงานที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวชนิดพี..... | 12 |
| 2.7 ความหนาแน่นของประจุบริเวณช่วงปลอดพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ขึ้นอยู่กับศักดาที่ บริเวณผิว ϕ_s | 16 |
| 2.8 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MOS ในอุดมคติ (ข) การกระจายประจุเมื่อโครงสร้าง อยู่ในสภาวะผันกลับ (ค) การกระจายของสนามไฟฟ้า (ง) การกระจายของศักดาไฟฟ้า..... | 18 |
| 2.9 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS (ก) แผ่นฐานรอง เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ข) แผ่นฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... | 20 |
| 2.10 การเปลี่ยนแปลงประจุที่ตอบสนองต่อแรงดันสัญญาณ ไฟสลับและแรงดันไฟตรง ของตัวเก็บประจุ MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ก) สภาวะการสะสมประจุ (ข) สภาวะการผลึกประจุ (ค) สภาวะการผันกลับที่ความถี่ต่ำ (ง) สภาวะการผันกลับที่ความถี่สูง..... | 22 |
| 2.11 ประจุภายในชั้นออกไซด์และบริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและชั้นออกไซด์..... | 26 |
| 2.12 วงจรสมมูลซึ่งพิจารณาผลกระทบเนื่องจากระดับพลังงานที่รอยต่อ..... | 28 |
| 2.13 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากประจุที่จับประจุในรอยต่อ..... | 29 |
| 2.14 กราฟค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่เลื่อนไปตามแกนแรงดันเนื่องจากประจุ ที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ $Q_f(n)$ ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ข) ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น..... | 30 |
| 2.15 ผลของประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ (Q_f) ต่อโครงสร้างตัวเก็บประจุ MOS..... | 31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.16 ตัวเก็บประจุ MOS ที่ประกอบด้วยประจุไม่เคลื่อนที่ในออกไซด์และประจุที่จับประจุในออกไซด์ (ก) โครงสร้างแถบพลังงาน (ข) การกระจายของประจุ (ค) สนามไฟฟ้า (ง) ศักย์ไฟฟ้า..... | 33 |
| 2.17 สภาวะของสารไดอิเล็กตริกขณะอยู่ในสนามไฟฟ้า (ก) อิศระจากสนามไฟฟ้า (ข) เริ่มอยู่ในสนามไฟฟ้า E (ค) สภาวะสมดุลภายในสนามไฟฟ้า | 34 |
| 2.18 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน..... | 35 |
| 2.19 กราฟค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อซึ่งเป็นฟังก์ชันกับแรงดัน..... | 39 |
| 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของซิลิกอน ไดออกไซด์กับเวลา (ก) กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (ข) กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก..... | 43 |
| 3.2 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี..... | 45 |
| 3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ..... | 46 |
| 3.4 ระบบเครื่องมือสปีดเตอร์ริง..... | 48 |
| 3.5 ระบบสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ ไดโอด..... | 49 |
| 3.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่สร้างเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิ (ก) 25 องศาเซลเซียส (ข) 50 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส..... | 50 |
| 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์กับเวลาในการสปีดเตอร์ริง..... | 52 |
| 3.8 กราฟ IR Spectroscopy ของซิงค์ออกไซด์ที่สร้างจากการสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ ไดโอด..... | 52 |
| 3.9 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คัลทิเฟแรกชัน (ก) ระยะเวลาการสปีดเตอร์ริง 15 นาที (ข) ระยะเวลาการสปีดเตอร์ริง 30 นาที (ค) ระยะเวลาการสปีดเตอร์ริง 45 นาที..... | 53 |
| 3.10 ระบบการเคลือบโลหะแบบไอระเหย..... | 55 |
| 3.11 ลำดับขั้นตอนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นหรือพี..... | 56 |
| 3.12 ลำดับขั้นตอนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำเอกสารเป็นซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ..... | 58 |
| 3.13 เครื่องมือทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของ Hewlette Packard รุ่น 4061A..... | 59 |
| 3.14 วงจรสมมูลในการวัดค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าในโครงสร้าง MOS..... | 59 |

สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.15 กราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS | 60 |
| 3.16 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 Å | 63 |
| 3.17 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 Å | 63 |
| 3.18 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 Å | 64 |
| 3.19 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1000 Å | 64 |
| 3.20 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1000 Å | 65 |
| 3.21 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1000 Å | 65 |
| 3.22 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 Å | 66 |
| 3.23 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดพี ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 Å | 66 |
| 3.24 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 Å | 67 |
| 3.25 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS (เส้นทึบเป็น พฤติกรรมที่ความถี่ต่ำ และเส้นประเป็นพฤติกรรมที่ความถี่สูง)..... | 69 |
| 3.26 ค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชั้นซิงค์ออกไซด์และซิลิกอน ไดออกไซด์ ที่มีความหนาต่าง ๆ | 73 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.27 ภาพถ่ายด้านบนของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ที่ออกแบบเป็นลวดลายแบบต่าง ๆ (ก) สี่เหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยมขอบมน (ค) หกเหลี่ยม (ง) วงกลม..... | 75 |
| 3.28 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS เมื่อ ตัวเก็บประจุมีลักษณะรูปร่างต่าง ๆ (ก) สี่เหลี่ยม (ข) วงกลม..... | 77 |
| 3.29 กราฟค่าแรงดันพ้งหลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ เมื่อความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ (ก) 500 อังสตรอม (ข) 1000 อังสตรอม (ค) 1500 อังสตรอม..... | 79 |
| 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพ้งหลายกับค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ และ ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์..... | 80 |
| 3.31 ตัวอย่างภาพตัดขวางของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่ถ่ายจากเครื่อง SEM..... | 82 |
| 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ (ก) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $Q_{ss}/q = 2.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (ข) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิกอนชนิดพี $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $Q_{ss}/q = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (ค) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรอง ซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ $7.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ และ $Q_{ss}/q = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$... | 83 |
| ก.1 แผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้รับการเคลือบด้วยอะตอมทองคำ | 92 |
| ก.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือต่าง ๆ ในเนื้อสารซิลิกอน..... | 94 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|-----------|---|---------------------------------|
| A | พื้นที่หน้าตัด | cm^2 |
| C_D | ค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{FB} | ค่าความจุไฟฟ้าของแถบราบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{ZnO} | ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{hf} | ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{ii} | ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานที่รอยต่อต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{lf} | ค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{ox} | ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_p | ค่าความจุไฟฟ้าสมมูลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_s | ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| C_{sFB} | ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำแถบราบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ | pF/cm^2 |
| D_{ii} | ความหนาแน่นของแตรปที่บริเวณรอยต่อ | $\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ |
| E_C | ระดับพลังงานของแถบความนำ | eV |
| E_F | ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ, โลหะ | eV |
| E_g | ช่องว่างแถบพลังงาน | eV |
| E_i | ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ | eV |
| E_v | ระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ | eV |
| E_t | ระดับพลังงานที่บริเวณรอยต่อ | eV |
| G_p | ค่าความนำไฟฟ้าสมมูล | S/cm^2 |
| I_{DS} | กระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแส | A |
| L | ค่าความยาวของช่องทางเดินกระแส | μm |
| L_p | ค่าความยาวเดอบาย | μm |
| N_A^- | ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับไอออน | cm^{-2} |
| N_D^+ | ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ไอออน | cm^{-2} |
| N_{sub} | ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรอง | cm^{-2} |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|-----------|--|-------------------|
| Q_M | ประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนขั้วโลหะ | C/cm ² |
| Q_f | ความหนาแน่นของประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ | C/cm ² |
| Q_{it} | ความหนาแน่นประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อ | C/cm ² |
| Q_m | ความหนาแน่นประจุเคลื่อนที่ | C/cm ² |
| Q_n | ความหนาแน่นประจุอิเล็กตรอนบริเวณย่านผันกลับ | C/cm ² |
| Q_o | ความหนาแน่นประจุชั้นออกไซด์รวมทั้งบริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำและชั้นออกไซด์ | C/cm ² |
| Q_{ot} | ความหนาแน่นประจุที่จับประจุในชั้นออกไซด์ | C/cm ² |
| Q_s | ความหนาแน่นประจุรวมในสารกึ่งตัวนำ | C/cm ² |
| Q_{ss} | ความหนาแน่นประจุที่สถานะผิว | C/cm ² |
| R | ค่าความต้านทานไฟฟ้า | ohm |
| R_{it} | ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานที่รอยต่อ | ohm |
| T | อุณหภูมิสัมบูรณ์ | K |
| T_{ox} | ความหนาแน่นของชั้นออกไซด์ | Å |
| T_{ZnO} | ความหนาแน่นของชั้นซิงค์ออกไซด์ | Å |
| V_{DS} | ค่าแรงดันเดรนซอส | V |
| V_{FB} | ค่าแรงดันพลังงานแถบราบ | V |
| V_{GS} | ค่าแรงดันเกตซอส | V |
| V_{H0} | ค่าแรงดันที่จุดเริ่มสภาวะผันกลับอย่างรุนแรง | V |
| V_{L0} | ค่าแรงดันที่จุดเริ่มสภาวะผันกลับแบบอ่อน | V |
| V_{M0} | ค่าแรงดันที่จุดเริ่มสภาวะผันกลับแบบปานกลาง | V |
| V_T | ค่าแรงดันขีดเริ่ม | V |
| V_i | ค่าแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ | V |
| W | ความกว้างของช่องทางเดินกระแส | µm |
| X_{dm} | ความกว้างของชั้นปลอดพาหะสูงสุด | µm |
| X_{dn} | ความกว้างของชั้นปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | µm |
| X_{dp} | ความกว้างของชั้นปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี | µm |
| k | ค่าคงที่ของโบสมานด์ | J/K |

สัญลักษณ์(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | ความหมาย | หน่วย |
|------------------|---|----------------------------|
| n | ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ | cm^{-3} |
| n_i | ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ | cm^{-3} |
| n_0 | ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสภาวะสมดุลภายในสารกึ่งตัวนำ | cm^{-3} |
| n_s | ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อ | cm^{-3} |
| p | ความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำ | cm^{-3} |
| p_0 | ความหนาแน่นของโฮลในสภาวะสมดุลภายในสารกึ่งตัวนำ | cm^{-3} |
| p_s | ความหนาแน่นของโฮลที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อ | cm^{-3} |
| ϵ_0 | ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ | F/cm |
| ϵ_{ox} | ค่าสภาพยอมของชั้นออกไซด์ | F/cm |
| ϵ_{Si} | ค่าสภาพยอมของซิลิกอน | F/cm |
| ϵ_{ZnO} | ค่าสภาพยอมของซิงค์ออกไซด์ | F/cm |
| μ | ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ | $\text{cm}^2/\text{V-sec}$ |
| ϕ | ศักดาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ | V |
| ϕ_B | ความแตกต่างศักดาระหว่างพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำกับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ | --- |
| ϕ_F | ศักดาที่ตำแหน่งพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ | V |
| ϕ_s | ศักดาที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ | V |
| ρ_{ox} | สภาพความต้านทานไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ | ohm-cm |
| Φ_M | ฟังก์ชันงานของโลหะ | V |
| Φ_{MS} | ความแตกต่างของฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ | V |
| \mathcal{E} | สนามไฟฟ้า | Vcm^{-1} |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เทคโนโลยีการสร้างถึงประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit) ได้มีการวิจัยและพัฒนาโดยตลอด วงจรรวมมีบทบาทและความสำคัญต่องานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาก เนื่องจากวงจรรวมสามารถรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ บนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำและทำงานเป็นวงจรทางไฟฟ้าได้โดยใช้พื้นที่ไม่มาก ตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS (Metal Oxide Semiconductor) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทของผลของสนามไฟฟ้า (Field Effect Device) ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในวงจรเพื่อที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม เนื่องจากตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS มีโครงสร้างและกระบวนการสร้างง่าย และใช้พื้นที่บนแผ่นผลึกซิลิกอนน้อย ซึ่งตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS นี้มักจะถูกนำไปใช้ในวงจรรวมโดยทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุและสิ่งประดิษฐ์ประจุกู่ควบ (Charge coupled device ,CCD) ซึ่งสิ่งประดิษฐ์ประจุกู่ควบสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ นำมาใช้ในอุปกรณ์ถ่ายภาพซึ่งทำหน้าที่แปลงภาพที่อยู่ในลักษณะสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณวิดีโอทางไฟฟ้า ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOIS (Metal Oxide Intrinsic Semiconductor) ที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบ MOS

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS (Metal Oxide Semiconductor) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ชั้นบนสุดเป็นชั้นของโลหะตัวนำ ชั้นที่ 2 คือ ชั้นของออกไซด์ (ไดอิเล็กตริก) และชั้นล่างสุดเป็นฐานรองสารกึ่งตัวนำ ซึ่งชั้นฐานรองของตัวเก็บประจุจะเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น, ชนิดพีหรือสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่เกิดจากการเติมอะตอมของค่าอย่างเหมาะสมลงในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น อะตอมของค่าในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะทำหน้าที่จับประจุพาหะอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ทำให้ค่าพิกัดความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้อะตอมของค่ายังทำให้อิเล็กตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีค่าระดับพลังงานของตัวรับอิเล็กตรอนเสมือน (acceptor like level) อยู่ที่ระดับพลังงาน 0.62 eV เมื่อเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และระดับพลังงานตัวให้อิเล็กตรอนเสมือน (donor like level) อยู่ที่ระดับพลังงาน 0.54 eV เมื่อเทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ซึ่งระดับพลังงานเฟอร์มิดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของค่าอย่างเหมาะสมจะมีพฤติกรรมเสมือนสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ดังนั้นจึงสามารถเรียกตัวเก็บประจุที่ฐานรองสร้างจาก

สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของกำมีโครงสร้างแบบ MOIS (Metal Oxide Intrinsic Semiconductor) [1][2]

ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาโครงสร้างและเทคโนโลยีเกี่ยวกับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit) เพื่อที่จะสามารถเพิ่มความหนาแน่นของอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอนได้มากขึ้น แต่การลดขนาดทางเรขาคณิตของตัวอุปกรณ์ (ลดความหนาของชั้นออกไซด์หรือชั้นไดอิเล็กตริก) รวมทั้งการเติมอะตอมของกำเข้าไปที่ชั้นของฐานรองเพื่อพัฒนาโครงสร้างอาจทำให้อุปกรณ์มีกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้น และส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหาแนวทางในการที่จะพัฒนาเพิ่มค่าความหนาแน่นของอุปกรณ์ในวงจรรวมให้มากขึ้น โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์

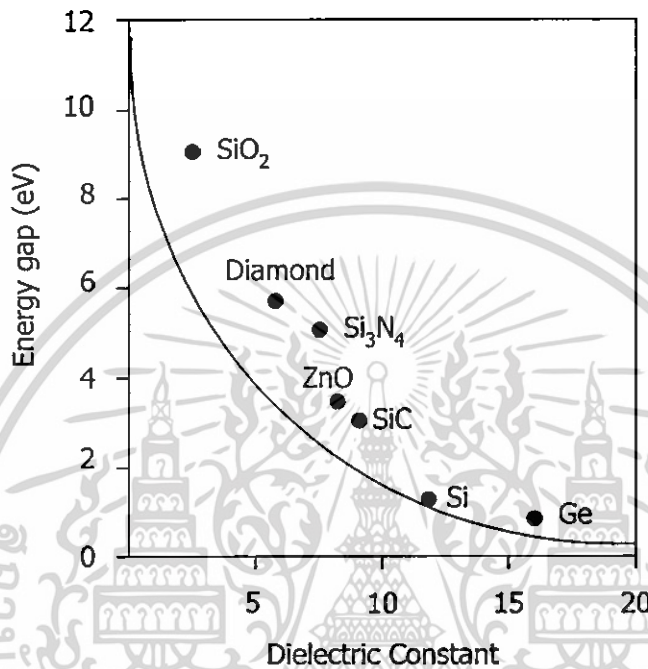
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการทำงานของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ พัฒนาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุให้มีค่ามากขึ้น เพื่อที่จะลดขนาดของตัวอุปกรณ์และทำให้ความหนาแน่นของอุปกรณ์ภายในวงจรรวมมีค่าสูงขึ้นได้โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ ของอุปกรณ์ลดลง เช่น ค่าแรงดันขีดเริ่ม, ค่าแรงดันพังทลาย, ค่าประจุที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อสารกึ่งตัวนำกับชั้นไดอิเล็กตริก และค่าประจุที่บริเวณชั้นออกไซด์ ซึ่งแนวทางในการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS สามารถกระทำได้หลายวิธี คือ ลดความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ และการสร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูงขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS จะขึ้นกับค่าความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกและค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริก ดังนั้นในการที่จะเพิ่มค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุแบบ MOS นั้นสามารถกระทำได้โดยการลดความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก ซึ่งการลดความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกจะส่งผลกระทบต่อแรงดันพังทลาย โดยจะทำให้อุปกรณ์ทนแรงดันพังทลายได้ต่ำลง นอกจากนี้การลดความหนาสามารถกระทำได้เพียงค่าหนึ่งเท่านั้นขึ้นกับข้อจำกัดของเทคโนโลยีในการผลิต สำหรับการเพิ่มค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริก (ϵ_{ox}) โดยการสร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้นไปกว่าเดิมนั้นต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกที่มีผลต่อค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) โดยถ้าค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกมีค่าสูงช่องว่างพลังงานจะมีค่าลดลง ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงความเป็นฉนวนของวัสดุ ดังนั้นการเลือกสารไดอิเล็กตริกมาสร้างเป็นตัวเก็บประจุจึงจำเป็นต้อง

คำนึงถึงค่าช่องว่างพลังงานของสารไดอิเล็กตริกที่มีความต้านทานเพียงพอต่อการนำมาสร้างเป็นชั้นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ในรูปที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมและช่องว่างพลังงานของสารไดอิเล็กตริกต่าง ๆ [3] เปรียบเทียบกับสารซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานและค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริก

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS นั้นการเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับเพิ่มขึ้นของค่าสภาพยอมของสารไดอิเล็กตริกของอุปกรณ์ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาที่สามารถกระทำได้คือดำเนินการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS โดยสร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูง (High permittivity) และเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่วไปที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรที่สร้างขึ้นด้วยอุปกรณ์โครงสร้างดังกล่าวนี้ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงชั้นไดอิเล็กตริกส่งผลให้อุปกรณ์นี้สามารถลดขนาดของรูปทรงทางเรขาคณิตลงได้ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของวงจรที่ทำการออกแบบบนพื้นผิวของซิลิกอน

นั่นโดยที่ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าในการคำนวณค่าไม่ว่าค่าต่าง ๆ ของอุปกรณ์และคุณสมบัติของวงจรที่ใช้อุปกรณ์โครงสร้างนี้ยังคงเดิมทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนองานวิจัย การศึกษาตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ซึ่งสร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูง เปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุทั่วไปที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพื่อศึกษาและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเบื้องต้นของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS เช่น ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นไดอิเล็กตริก, ค่าแรงดันขีดเริ่ม, ค่าแรงดันพังทลาย, ค่าประจุที่สถานะผิวยระหว่างรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับชั้นไดอิเล็กตริก และค่าประจุในชั้นออกไซด์ สารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูงซึ่งใช้สร้างเป็นชั้นไดอิเล็กตริกในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [4][5] โดยทำการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริงแบบ อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริง (RF Diode Sputtering) ฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์จะมีค่าสภาพยอม (Permittibility) ประมาณ 8.5 ซึ่งสูงกว่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีค่าสภาพยอมเพียง 3.9

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาและวิจัยตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS เริ่มต้นเป็นการศึกษาคุณสมบัติและข้อจำกัดของสารไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์ที่นำมาสร้างเป็นชั้นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุเงื่อนไขและกระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธีการ อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริง แล้วทำการเปรียบเทียบตัวเก็บประจุที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น, ชนิดพี และ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ วิเคราะห์ผลของอะตอมทองคำที่มีต่อคุณลักษณะของตัวเก็บประจุ และพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุ เช่น ค่าแรงดันขีดเริ่ม ค่าแรงดันพังทลาย และค่าความจุไฟฟ้าบริเวณชั้นไดอิเล็กตริกของอุปกรณ์โครงสร้าง MOS ซึ่งสร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูง จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ด้วยกระบวนการสร้างที่เหมาะสมกับการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท MOS เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ โลหะ-ซิงค์ออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ

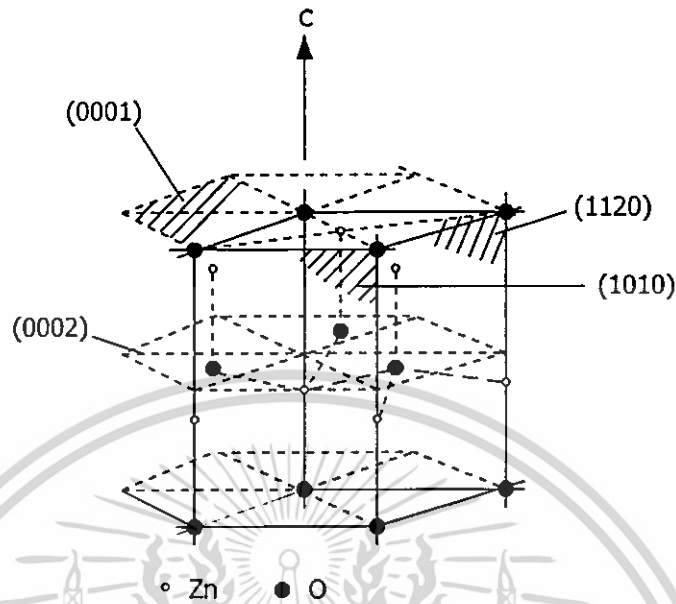
ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS (Metal Zinc Oxide Semiconductor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีประโยชน์ในการศึกษาผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบ IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor) เนื่องจากเสถียรภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับสถานะที่บริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์ ดังนั้น การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผิวหน้า โดยอาศัยตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการวิเคราะห์การทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้าที่มีเกทเป็นฉนวน

2.1 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวางในหลายลักษณะ เช่น ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric), วัสดุพิโซอิเล็กตริก (Piezoelectric), ไพโรอิเล็กตริก (Pyroelectric), สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor), ตัวต้านทาน (Resistor) ซิงค์ออกไซด์ในลักษณะฟิล์มบางได้มีการสร้างเพื่อนำมาใช้งานในอุปกรณ์ประเภทต่าง ๆ ทั้งในอุปกรณ์อัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic transducer), อุปกรณ์สร้างภาพ (Acoustic imaging devices), อุปกรณ์ประมวลสัญญาณไมโครเวฟ เช่น ฟิลเตอร์ (Filter) และอุปกรณ์อะคูสติกเวฟ เซนเซอร์ (acoustic wave sensor)[6]

ซิงค์ออกไซด์ในลักษณะผลึกเดี่ยวจะมีโครงสร้างแบบเวอร์ตไซด์เฮกซะโกนอล (Wurtzite hexagonal) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์แสดงดังตารางที่ 2.1 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

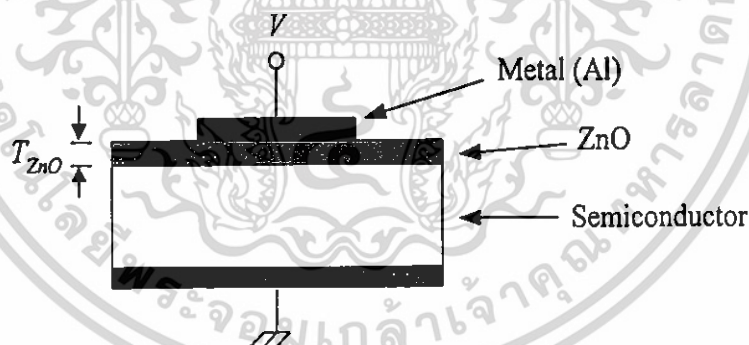
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของซิงค์ออกไซด์ในรูปของผลึกเดี่ยว [7]

| | |
|--|--|
| โครงสร้างผลึก (Crystal system) | 6mm (Wurtzite) |
| Space group | $P6_3 mc$ |
| ค่าคงที่แลตทิส (Lattice constant) | $a = 3.24265 \text{ \AA}, c = 5.1948 \text{ \AA}$ |
| จุดหลอมเหลว (Melting point) | $1975 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| ค่าความแข็ง (Hardness) | 4 Mohs |
| ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) | $8.5 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ |
| ค่าความหนาแน่น (Density) | 5.67 g/cm^3 |
| สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Thermal-expansion coefficient) | $\alpha_{11} = 4.0 \times 10^{-6}, \alpha_{33} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ |
| ดัชนีหักเห (Refractive index) | $n_0 = 1.9985, n_e = 2.0147$ |
| ค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) | 3.7 eV |
| น้ำหนักของโมเลกุล (Molecular weight) [8] | 81.39 |

ซิงค์ออกไซด์สามารถสร้างได้ด้วยหลายวิธีการ เช่น สเปคเตอร์ริง (sputtering), โซลจัน-เจล (SOL-GEL) และกระบวนการ CVD (Chemical vapor deposition) ซึ่งได้มีผู้ทำการวิจัยแล้วว่า สภาพความต้านทาน (resistivity) ของซิงค์ออกไซด์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $10^{-4} - 10^{12}$ โอห์ม-เซนติเมตร ขึ้นกับกระบวนการและเงื่อนไขในการสร้าง [6] เนื่องจากช่วงค่าสภาพต้านทานที่กว้างจึงทำให้ซิงค์ออกไซด์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภท ภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำซิงค์ออกไซด์มาใช้เป็นวัสดุไดโอดเล็กทรอนิกส์ของตัวเก็บประจุ โดยทำการสร้างด้วยวิธีการอาร์เอฟ ไดโอด สเปคเตอร์ริง (RF Diode Sputtering) ในเงื่อนไขที่ให้ค่าความต้านทานสูง

2.2 ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ในอุดมคติ

ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS (Metal Zinc Oxide Semiconductor) มีลักษณะโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 2.2 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนของโลหะตัวนำ (Metal) ซึ่งอยู่ชั้นบนสุด ชั้นที่ 2 คือชั้นไดโอดเล็กทรอนิกส์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งเป็นสาร ไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าสภาพยอมสูง และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นฐานรอง (Substrate) ซึ่งชั้นฐานรองของตัวเก็บประจุอาจเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น, ชนิดพี หรือ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้ทำการแพร่สารเจืออะดอมของกำ โดย T_{ZnO} คือ ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ และ V คือ แรงดันที่จ่ายให้แก่ขั้วโลหะเทียบกับส่วนฐานรอง



รูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS

ตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ที่สร้างชั้นไดโอดเล็กทรอนิกส์ด้วยซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นสาร ไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าสภาพยอมสูง เมื่อได้รับแรงดันที่ขั้วโลหะจะเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ทั่วไปที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ คือ เกิดปรากฏการณ์สะสมประจุ (Accumulation), ปรากฏการณ์ผลัดประจุ (Depletion) และปรากฏการณ์ผันกลับ (Inversion) โดยตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ในอุดมคติจะมีลักษณะปรากฏการณ์ของประจุดังนี้คือ

1) เมื่อไม่ได้จ่ายแรงดันให้แก่โครงสร้างตัวเก็บประจุ ($V=0$) ความแตกต่างของพลังงานระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะ (Φ_m) และ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ Φ_{ms} มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\Phi_{ms} \equiv \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} \pm \phi_B \right) = 0 \quad (2.1)$$

โดยที่ Φ_m คือ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

χ คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor electron affinity)

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap)

จะพบว่าแถบพลังงานจะอยู่ในสภาวะแถบราบ (flat-band condition) เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันให้แก่โครงสร้าง

2) ประจุที่สามารถอยู่ภายในโครงสร้างได้ทุกสภาวะของการจ่ายแรงดัน คือ ประจุที่อยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและประจุซึ่งมีปริมาณเท่ากันแต่มีเครื่องหมายประจุตรงกันข้ามบนผิวหน้าของโลหะที่อยู่ติดกับชั้นไดอิเล็กตริก

3) ประจุพาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นไดอิเล็กตริกได้ภายใต้การจ่ายแรงดันไฟตรง หรืออาจกล่าวได้ว่าสภาพความต้านทานของชั้นไดอิเล็กตริกเป็นอนันต์ (Infinity)

ปรากฏการณ์สะสมประจุ

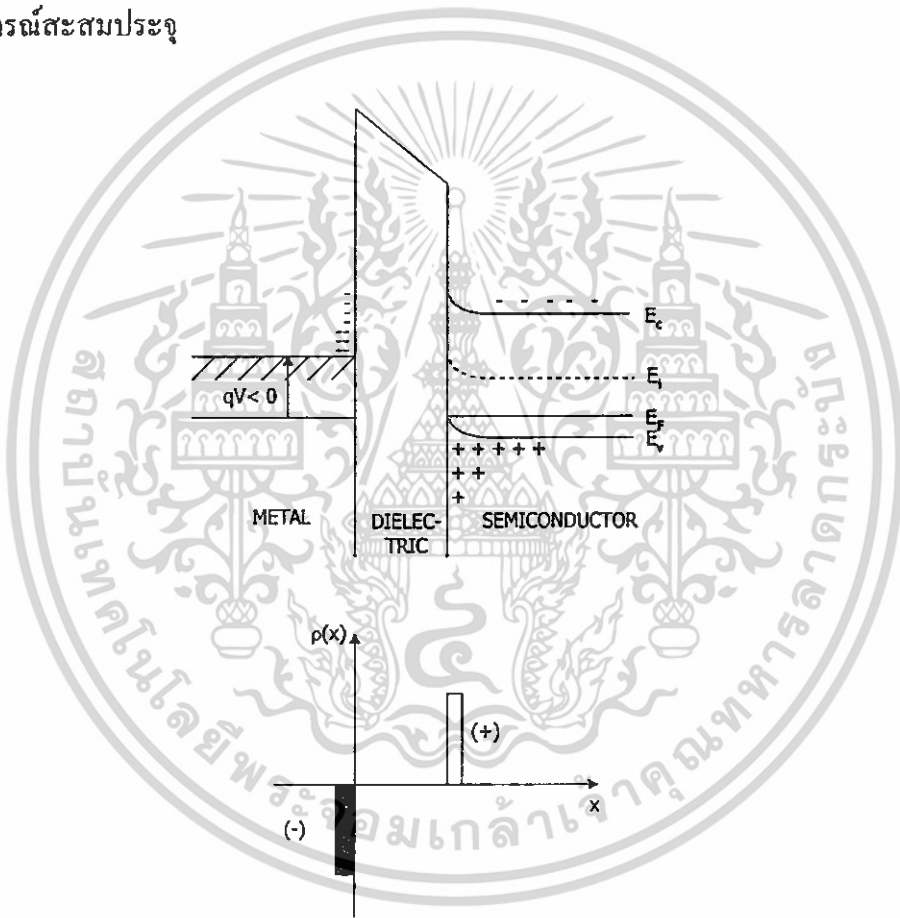
เมื่อตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ถูกไบอัสด้วยแรงดันบวกหรือแรงดันลบ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ พิจารณาเมื่อฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี ขณะที่ทำการจ่ายแรงดันลบให้แก่ขั้วโลหะเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำซิลิกอน จะทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน ซึ่งแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) จะโค้งขึ้นใกล้กับระดับพลังงานเฟอร์มิมากขึ้น ดังรูปที่ 2.3

สำหรับตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้าง MOS ในอุดมคติจะไม่มีกระแสไหลในโครงสร้างเนื่องจากพิจารณาว่าชั้นออกไซด์มีสภาพความต้านทานเป็นอนันต์ กระแสจะถูกกันไว้ด้วยกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะ โดยสภาพความต้านทานไฟฟ้าของออกไซด์ (Oxide Resistivity, ρ_{ox}) ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 10^{18} - 10^{20} โอห์ม-เซนติเมตร ทำให้สามารถคำนวณความต้านทานไฟฟ้าของออกไซด์ ได้โดยใช้สูตรความต้านทานไฟฟ้าตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $R = \frac{\rho_{ox} T_{ox}}{A}$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.2) การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ความหนาของออกไซด์ (Oxide Thickness, T_{ox}) เท่ากับ 1000 อังสตรอม และพื้นที่หน้าตัดของขั้วโลหะ (A) เท่ากับ 10^{-3} เซนติเมตร² จะได้ความต้านทานที่อินพุทของตัวเก็บประจุสูงมากอยู่ในช่วง 10^{16} - 10^{18} โอห์ม

พิจารณาแถบพลังงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS พบว่าระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนจะยังคงมีค่าคงที่ โดยการโค้งงอของแถบพลังงานนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการสะสมของประจุพาหะส่วนใหญ่ (โฮล) ที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีค่าความหนาแน่นมากกว่าพาหะชนิดเดียวกันในชั้นฐานรองซิลิกอน และจำนวนพาหะส่วนน้อยที่รอยต่อจะลดลงเนื่องจากประจุลบที่ขั้วโลหะจะผลักให้อิเล็กตรอนออกไปจากผิวหน้า ซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่าปรากฏการณ์สะสมประจุ

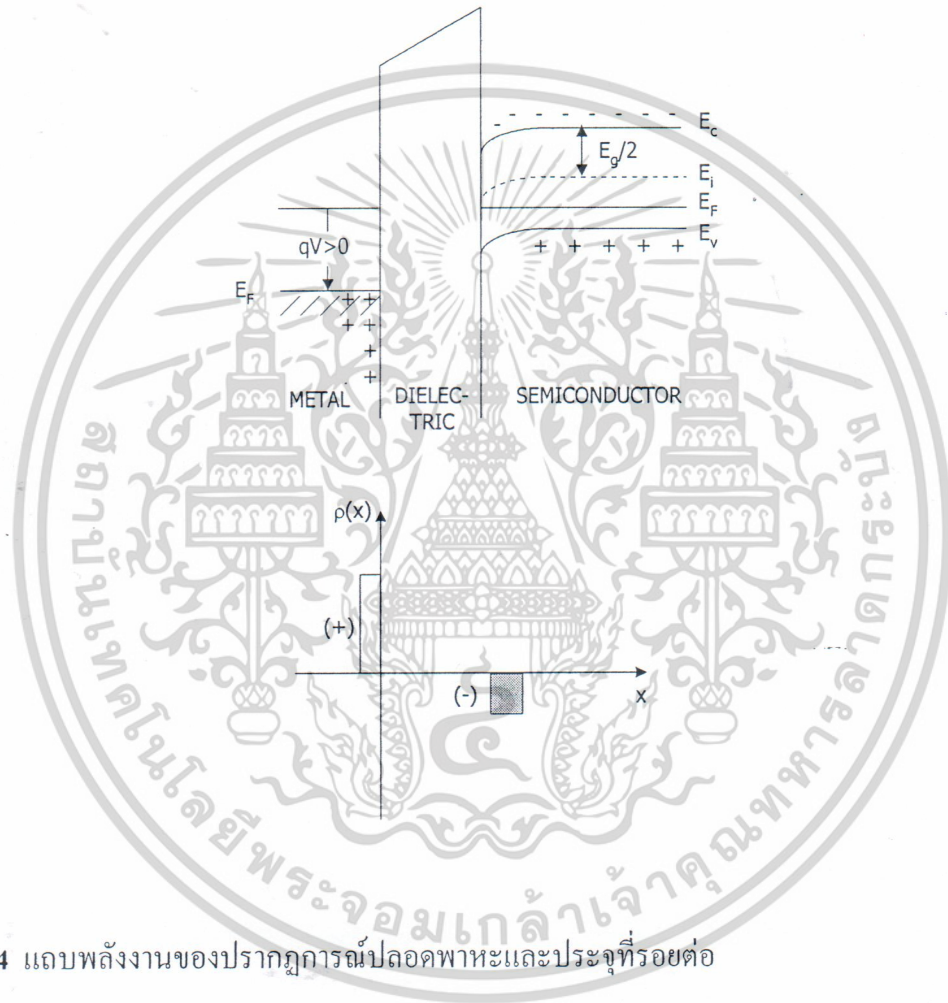


รูปที่ 2.3 แถบพลังงานในกรณีปรากฏการณ์สะสมประจุและประจุที่รอยต่อ

ในรูปที่ 2.3 แสดงตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ภายใต้สภาวะการสะสมประจุและแผนผังแถบพลังงาน ซึ่งจะแสดงการสะสมของโฮลในแถบวาเลนซ์ที่บริเวณผิว ดังนั้นทิศทางการเลื่อนของระดับพลังงานเฟอร์มิโลหะจะเป็นบวก แม้ว่าแรงดันที่จ่ายให้แก่ขั้วโลหะจะเป็นค่าลบ โดยไม่ว่ากรณีโวลตาจิส อีทิงกิงเป็นโวลตาจิส และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ภาพด้านล่างของรูปที่ 2.3 เป็นกราฟของความหนาแน่นประจุ

ปรากฏการณ์ปลอดพาหะ

เมื่อจ่ายแรงดันบวกเพียงเล็กน้อย ($V > 0$) ให้แก่โครงสร้าง แถบพลังงานในเนื้อสารกึ่งตัวนำ จะมีค่าสูงขึ้นและโค้งงอต่ำลงที่บริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.4 โหมดซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนใหญ่จะถูกผลักออกจากบริเวณผิวหน้า จำนวนพาหะส่วนมากที่ผิวจะลดลงทำให้เกิดช่วงปลอดพาหะบริเวณผิวหน้ารอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำกับชั้นไดอิเล็กตริก

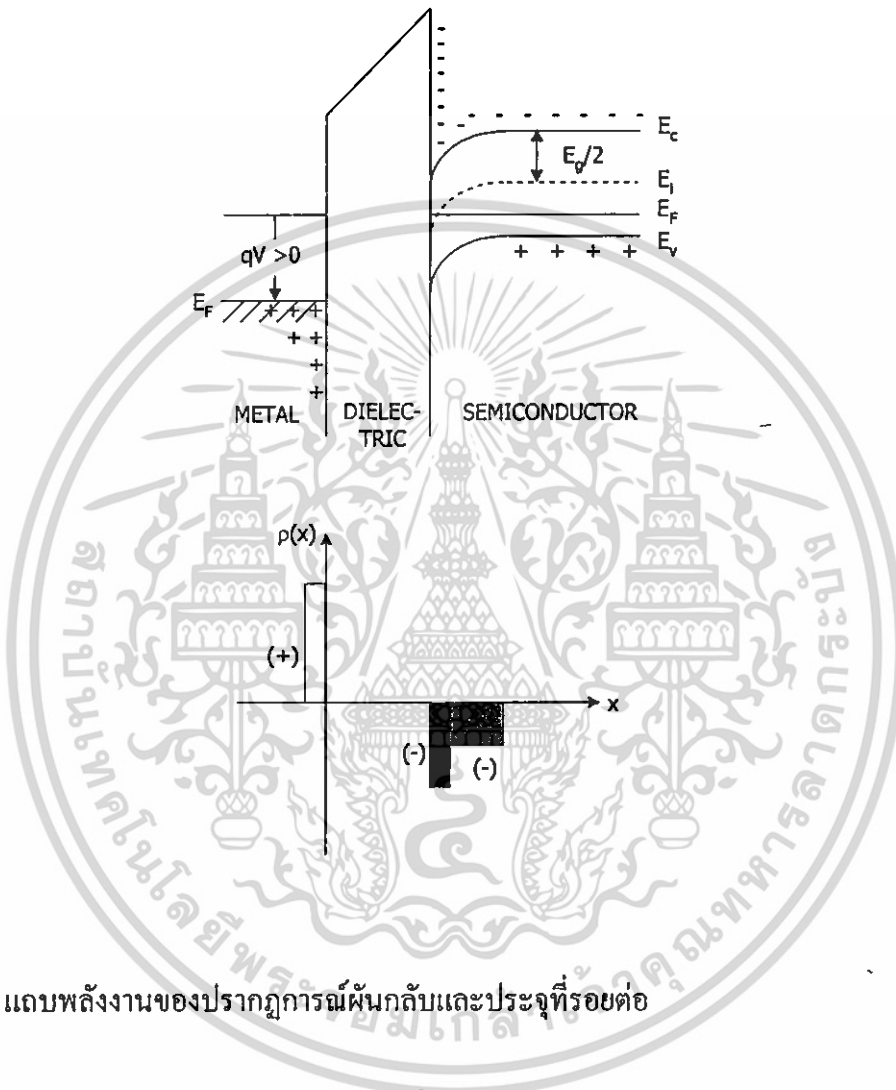


รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของปรากฏการณ์ปลอดพาหะและประจุที่รอยต่อ

ปรากฏการณ์ผกผัน

เมื่อแรงดันที่ป้อนแก่ขั้วโลหะ ($V \gg 0$) ในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้ประจุชนิดเดียวกันกับประจุที่อยู่บริเวณขั้วโลหะ (โฮล) อันเนื่องมาจากแรงดันนั้นถูกผลักออกจากรอยต่อสารกึ่งตัวนำ ซิลิกอนกับชั้น ไดอิเล็กตริก เหนือกว่าประจุชนิดตรงข้าม (อิเล็กตรอน) กับประจุที่ถูกผลักออกไปให้มาอยู่ที่บริเวณผิวของรอยต่อสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นชั้นกลับขึ้น (Inversion layer) ประจุที่ขึ้นมาอยู่บริเวณผิวนี้จะทำให้สารกึ่งตัวนำบริเวณผิวรอยต่อเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไป คือ มีประจุ

อิเล็กตรอนมาสะสมที่บริเวณผิวทำให้บริเวณผิวนั้นมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำชนิดเป็น การโค้งงอของแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นจนแถบพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (E_i) ที่บริเวณผิวอยู่ต่ำกว่าแถบพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ (E_F) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

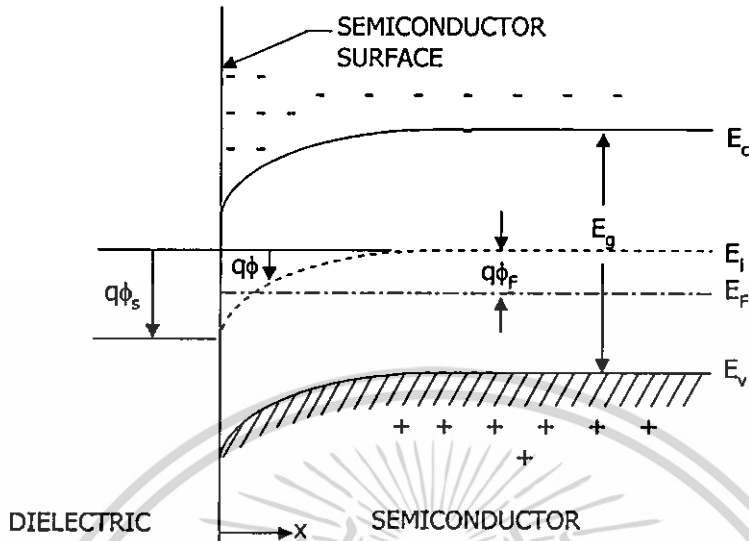


รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของปรากฏการณ์ผันกลับและประจุที่รอยต่อ

2.3 ประจุที่ผิวรอยต่อไดอิเล็กตริกกับสารกึ่งตัวนำ

ภายในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างศักดาที่บริเวณผิวหน้า, ประจุบริเวณปลอดพาหะ (Space-charge) และสนามไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะนำไปอธิบายคุณลักษณะระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน (Capacitance-Voltage Characteristics) ของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแถบพลังงานที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณารูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงรายละเอียดของแถบพลังงานที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ศักดา ϕ มีค่าเท่ากับศูนย์ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และทำการวัดโดยเปรียบเทียบกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (E_F) ที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ $\phi = \phi_s$ โดย ϕ_s คือ ศักดาที่บริเวณผิว ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ขึ้นอยู่กับค่า ϕ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ ดังนี้

$$n = n_0 \exp(q\phi / kT) = n_0 \exp(\beta\phi) \quad (2.3)$$

$$p = p_0 \exp(-q\phi / kT) = p_0 \exp(-\beta\phi) \quad (2.4)$$

โดยที่ ϕ คือ ศักดาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ

n_0 คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

p_0 คือ ค่าความหนาแน่นของโฮลในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

$$\beta = q / kT$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความหนาแน่นที่บริเวณผิวจะมีค่าคงสมการ

$$n_s = n_0 \exp(\beta\phi_s) \quad (2.5 ก)$$

$$p_s = p_0 \exp(-\beta\phi_s) \quad (2.5 ข)$$

จากสมการ (2.5 ก) และ (2.5 ข) ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถเขียนสภาวะของโครงสร้าง เมื่อสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำมีค่าต่าง ๆ ดังนี้

เมื่อ $E < 0$: เกิดปรากฏการณ์การสะสมประจุ ความหนาแน่นของปริมาณพาหะส่วนใหญ่ ที่บริเวณปลอดประจุพาหะ (space charge) จะมีมากกว่าที่บริเวณเนื้อสารกึ่งตัวนำ

เมื่อ $E = 0$: เข้าสู่สภาวะพลังงานแถบราบ

เมื่อ $E > 0$: เกิดปรากฏการณ์ปลอดพาหะ ประจุพาหะส่วนใหญ่จะถูกผลักออกจากบริเวณผิวหน้า ทำให้ปริมาณพาหะส่วนมากที่บริเวณผิวจะลดลง

เมื่อ $E \gg 0$: จำนวนของพาหะส่วนน้อยจะรวมกันที่ผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนน้อยที่บริเวณผิวมีจำนวนเท่ากับหรือมากกว่าความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนมากในเนื้อสารกึ่งตัวนำ เกิดชั้นกลับหรือมีชนิดพาหะตรงข้ามกับของเนื้อสาร ทำให้เข้าสู่ปรากฏการณ์การผันกลับ

โดย E คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ

ศักดา ϕ_s ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางสามารถหาได้โดยใช้สมการพัวร์ซอง 1 มิติ (one-dimensional Poisson equation) จะได้

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s} \quad (2.6)$$

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าสภาพยอมของสารกึ่งตัวนำ (Permittivity of semiconductor)

$\rho(x)$ คือ ค่าความหนาแน่นรวมของประจุบริเวณปลอดพาหะ
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกรายงานนี้ให้คิดเองเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้เป็น [9]

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p - n) \quad (2.7)$$

โดยที่ N_D^+ คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้อิออน (Density of the ionized donors)

N_A^- คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับอิออน (Density of the ionized acceptors)

ความสมดุลของประจุภายในเนื้อของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณห่างจากผิวหน้า $\rho(x) = 0$ และ $\phi = 0$ จะได้ว่า

$$N_D^+ - N_A^- = n - p \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.3) และ (2.4) จะได้ว่า

$$p - n = p_0 \exp(-\beta\phi) - n_0 \exp(\beta\phi) \quad (2.9)$$

ผลจากการใช้สมการพัทธ์ของ (2.6), สมการ (2.7) และสมการ (2.9) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{-q}{\epsilon_s} [p_0 (e^{-\beta\phi} - 1) - n_0 (e^{\beta\phi} - 1)] \quad (2.10)$$

อินทิเกรตสมการ (2.10)

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{-q}{\epsilon_s} \int [p_0 (e^{-\beta\phi} - 1) - n_0 (e^{\beta\phi} - 1)] d\phi \quad (2.11)$$

ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า ($E = -d\phi/dx$) และศักดา ϕ

$$E^2 = \left(\frac{2kT}{q} \right)^2 \left(\frac{qp_0\beta}{2\epsilon_s} \right) \left[(e^{-\beta\phi} + \beta\phi - 1) + \frac{n_0}{p_0} (e^{\beta\phi} - \beta\phi - 1) \right] \quad (2.12)$$

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{p_0q^2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qp_0\beta}} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$F\left(\beta\phi, \frac{n_0}{p_0}\right) = \left[(e^{-\beta\phi} + \beta\phi) - 1 + \frac{n_0}{p_0} (e^{\beta\phi} - \beta\phi - 1) \right]^{1/2} \geq 0 \quad (2.14)$$

โดย L_D คือ ค่าความยาวเดอบาย (Debye Length) ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่า

$$E = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\beta\phi, \frac{n_0}{p_0}\right) \quad (2.15)$$

ในการอธิบายค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิว จะให้ $\phi = \phi_s$

$$E_s = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F\left(\beta\phi_s, \frac{n_0}{p_0}\right) \quad (2.16)$$

โดยอาศัยกฎของเกาส์ (Gauss's Law) ค่าประจุบริเวณ space charge ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่า E_s จะมีค่าดังสมการ

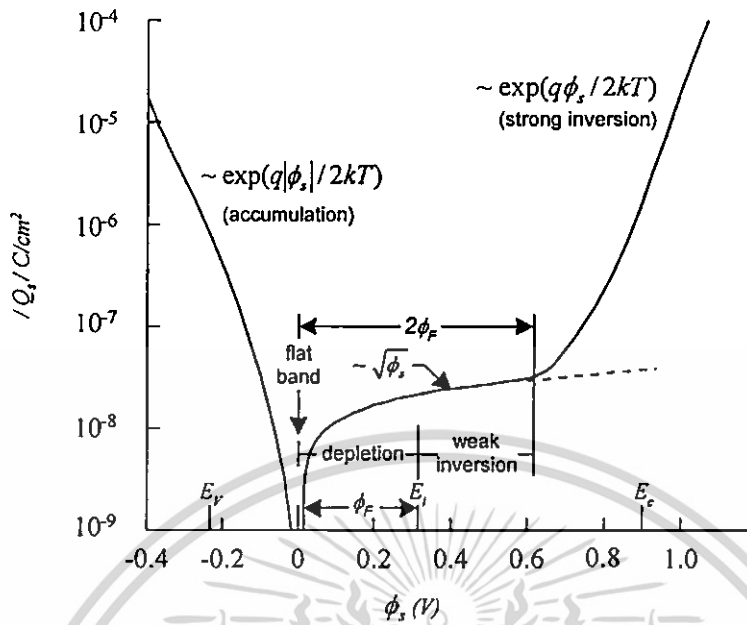
$$Q_s = -\epsilon_s E_s = \mp \frac{\sqrt{2\epsilon_s kT}}{qL_D} F\left(\beta\phi_s, \frac{n_0}{p_0}\right) \quad (2.17)$$

ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของประจุโฮล Δp และความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอน Δn ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อศักดา ϕ ที่บริเวณผิวเปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปยังค่าสุดท้ายคือ ϕ_s สามารถประมาณได้โดยใช้สมการ

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_0 \int_0^{\phi_s} (e^{-\beta\phi} - 1) dx \\ &= \frac{qp_0 L_D}{\sqrt{2kT}} \int_0^{\phi_s} \frac{e^{-\beta\phi} - 1}{F(\beta\phi, n_0/p_0)} d\phi \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \Delta n &= n_0 \int_0^{\phi_s} (e^{\beta\phi} - 1) dx \\ &= \frac{qn_0 L_D}{\sqrt{2kT}} \int_0^{\phi_s} \frac{e^{\beta\phi} - 1}{F(\beta\phi, n_0/p_0)} d\phi \end{aligned} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของประจุบริเวณช่วงปลอดพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ขึ้นอยู่กับศักดาที่บริเวณผิว ϕ_s [9]

ค่าความหนาแน่นของประจุบริเวณปลอดพาหะที่ขึ้นอยู่กับค่าศักดาที่บริเวณผิว ϕ_s แสดงดังรูปที่ 2.7 จากสมการ (2.17) สามารถประมาณค่า Q_s ที่สภาวะต่างๆ ได้ดังนี้

ช่วงการสะสมประจุ : ฟังก์ชัน F ในสมการ (2.14) จะขึ้นอยู่กับพจน์ที่ 1 ดังนี้

$$Q_s \approx \exp(q|\phi_s|/2kT)$$

ช่วงพลังงานแถบราบ : ค่า $\phi_s = 0$ ดังนี้

$$Q_s \approx 0$$

ช่วงปลอดพาหะ : Q_s จะมีค่าเป็นบวก ฟังก์ชัน F จะขึ้นอยู่กับพจน์ที่ 2 ดังนี้

$$Q_s \approx \sqrt{\phi_s}$$

เอกสารนี้เป็นช่วงคืนกลับ : ฟังก์ชัน F จะขึ้นอยู่กับพจน์ที่ 4 ดังนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_s \approx -\exp(q\phi_s/2kT)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะในสารกึ่งตัวนำจะสามารถหาได้จาก

$$C_s = \frac{\partial Q_s}{\partial \phi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{[1 - e^{-\beta\phi_s} + (n_0/p_0)(e^{\beta\phi_s} - 1)]}{F(\beta\phi_s, n_0/p_0)} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.20)$$

ในช่วงแถบราบ ค่า $\phi_s = 0$ ดังนั้นค่า C_s จะมีค่าเป็น

$$C_s(\text{flat - band}) = \frac{\epsilon_s}{L_D} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.21)$$

2.4 ความสัมพันธ์ของประจุและค่าแรงดันที่รอยต่อไดโอดิเล็กทริกและสารกึ่งตัวนำ

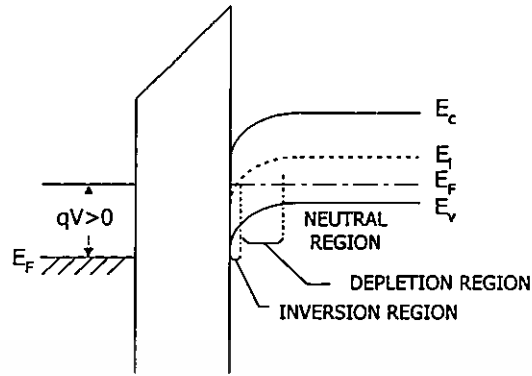
พิจารณารูปที่ 2.8(ก) ซึ่งแสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ในอุดมคติ ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและการกระจายประจุแสดงได้ดังรูปที่ 2.8(ข) ซึ่งสำหรับการสมดุลประจุของระบบจะได้ว่า

$$Q_M = Q_n + qN_A X_d = Q_s \quad (2.22)$$

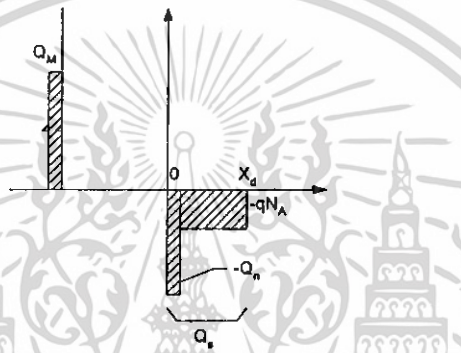
- โดย Q_M คือ ประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนขั้วโลหะ
 Q_n คือ ประจุอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณย่านผิวกลับ
 $qN_A X_d$ คือ อะตอมสารเจือผู้รับ ไอออนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บริเวณชั้นปลอดพาหะที่มีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ X_d
 Q_s คือ ประจรรวมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในสารกึ่งตัวนำ

สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ระยะต่าง ๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการพัวร์ของแสดงได้ดังรูปที่ 2.8(ค) และ 2.8(ง) ตามลำดับ

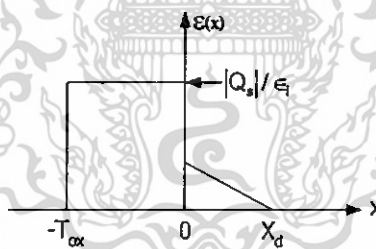
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



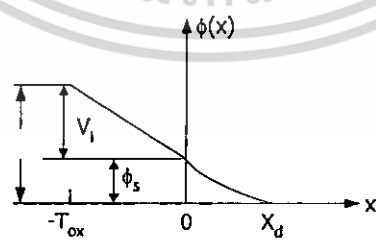
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.8 (ก) แถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MOS ในอุดมคติ (ข) การกระจายประจุเมื่อโครงสร้างอยู่ในสภาวะการผันกลับ (ค) การกระจายของสนามไฟฟ้า (ง) การกระจายของศักดาไฟฟ้า

เมื่อป้อนแรงดันให้แก่โครงสร้าง แรงดันส่วนหนึ่งจะตกคร่อมบริเวณชั้นออกไซด์และอีกส่วนหนึ่งจะตกคร่อมสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ดังนั้นจะได้ว่า

$$V = V_i + \phi_s \quad (2.23)$$

โดย V_i คือ ศักย์ที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์มีค่าเท่ากับ

$$V_i = \mathcal{E}_i T_{ox} = \frac{|Q_s| T_{ox}}{\mathcal{E}_{ox}} \left(\equiv \frac{|Q_s|}{C_{ox}} \right) \quad (2.24)$$

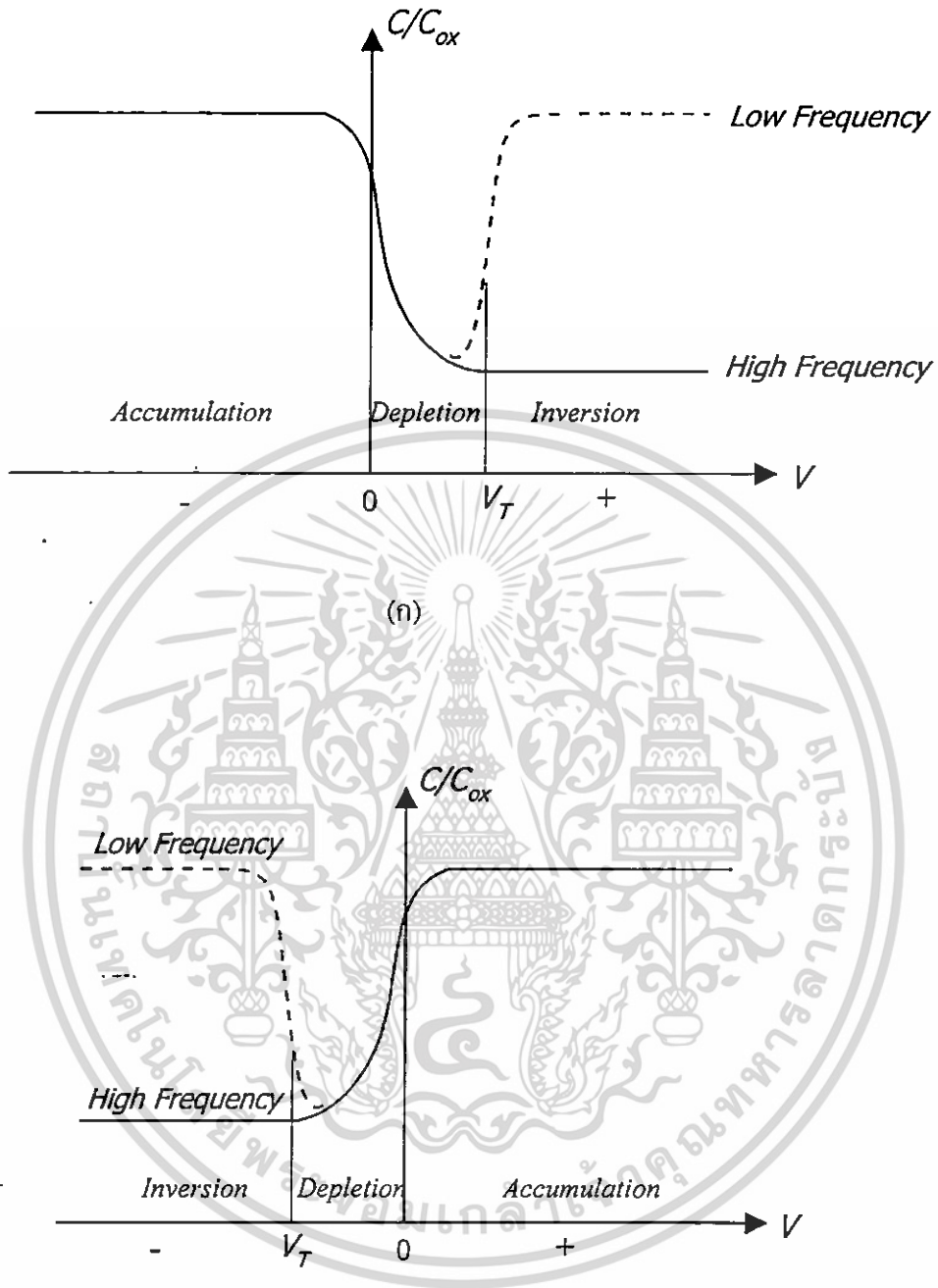
คุณลักษณะที่สำคัญของตัวเก็บประจุ MOS คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน ซึ่งสามารถกระทำการวัดได้โดยการป้อนสัญญาณไฟกระแสสลับขนาดเล็กที่บลงบนแรงดันไฟกระแสตรง การใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นเป็นฐานรองของโครงสร้างตัวเก็บประจุ MOS จะให้รูปกราฟที่แตกต่างกัน และการป้อนสัญญาณความถี่สูงและความถี่ต่ำก็จะให้กราฟที่แตกต่างกัน โดยในรูปที่ 2.9 เป็นลักษณะสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของตัวเก็บประจุ MOS เมื่อฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี

ในการวัดคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS สัญญาณไฟกระแสสลับจะส่งผลกระทบต่อประจุพาหะส่วนมากและประจุพาหะส่วนน้อยในโครงสร้างแตกต่างกัน

ประจุพาหะส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าด้วยเวลาค่าหนึ่ง โดยค่าเวลานี้สามารถหาได้จากอัตราส่วนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่อค่าความนำไฟฟ้า สำหรับสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน หรือ แกลเลียมอาร์เซไนด์ ที่มีพิสัยความต้านทานเท่ากับ 1 โอห์ม-เซนติเมตร ค่าเวลาจะอยู่ในระดับ 10^{-12} วินาที ดังนั้นที่ความถี่ประมาณ 10^6 เฮิร์ต ประจุพาหะส่วนใหญ่จึงสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟสลับได้

สำหรับประจุพาหะส่วนน้อยของตัวเก็บประจุ จะถูกเหนี่ยวนำเกิดเป็นชั้นผันกลับที่บริเวณผิวหน้าของชั้นไดอิเล็กตริกโดยใช้เวลาเป็นส่วนของวินาที ดังนั้นที่ความถี่ 10^6 เฮิร์ตของแรงดันสัญญาณไฟสลับ ประจุพาหะส่วนน้อย ΔQ ที่ชั้นผันกลับจึงไม่สามารถตอบสนองต่อแรงดันสัญญาณไฟสลับได้ทัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.9 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS (ก) แผ่นฐานรอง

เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ข) แผ่นฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติดังแสดงในรูป 2.9 สามารถทำการวัดโดยการป้อนค่าแรงดันไฟตรงเปลี่ยนไปอย่างช้า ๆ สัญญาณไฟสลัปจะทำให้เกิดการชาร์จประจุ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่า

$$C = \frac{dQ_M}{dV} \quad (2.25)$$

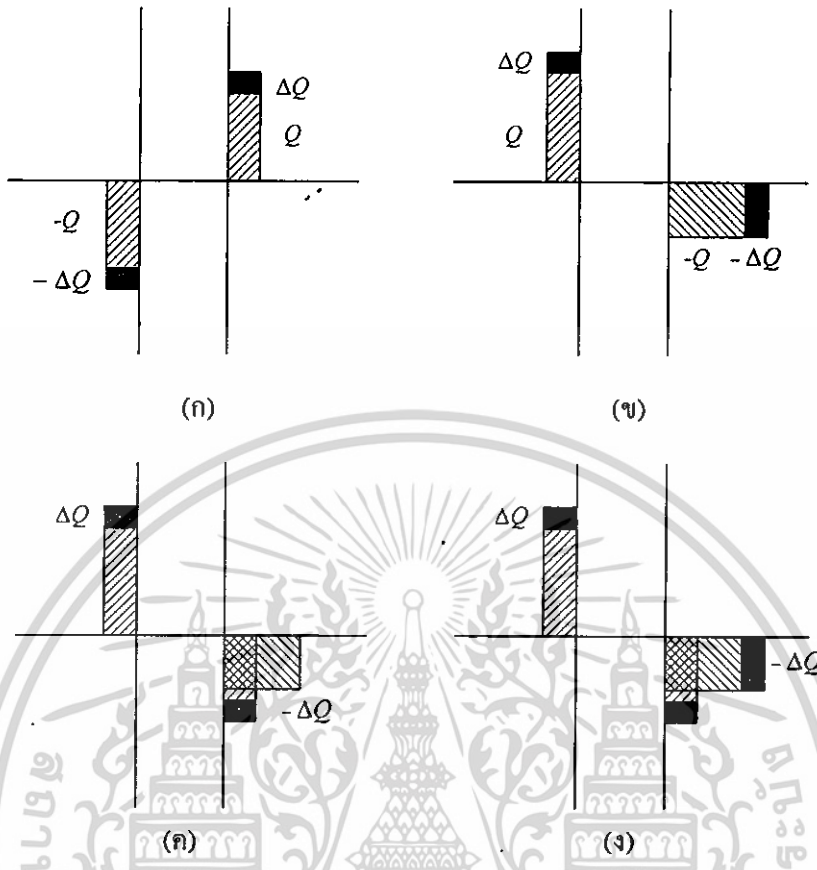
โดย Q_M คือ ค่าความหนาแน่นของประจุบนโลหะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์/ซม.² แรงดัน V จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์และแรงดันที่ตกคร่อมสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ (2.23) และการสมมูลของความหนาแน่นประจุจากสมการ (2.22) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น

$$\begin{aligned} C &= \frac{dQ_M}{d(V_i + d\phi_s)} \\ &= \left\{ \left[\frac{1}{(dQ_M / dV_i)} \right] + \left[\frac{1}{(dQ_M / d\phi_s)} \right] \right\}^{-1} \\ &= \frac{1}{[1/C_{ox} + 1/C_s]} \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดย C_{ox} และ C_s คือค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงประจุภายในสารกึ่งตัวนำที่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลัป เมื่อเข้าสู่สภาวะการสะสมประจุ, สภาวะการผลักประจุและสภาวะการผันกลับ กรณีที่แผ่นฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอนุมินิตี เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟลบให้แก่ขั้วโลหะจนตัวเก็บประจุ MOS เข้าสู่สภาวะการสะสมประจุ คือ โอลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากจะมาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจะเสมือนมีแผ่นประจุบางอยู่ใกล้กับชั้นไดอิเล็กตริก ที่ความถี่สูงระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดประจุ ΔQ ทั้งสองด้านของชั้นไดอิเล็กตริก ดังรูป 2.10 (ก) โดยพาหะส่วนมากจะเป็นประจุเพียงชนิดเดียวที่มีการเคลื่อนที่ และจะมีการตอบสนองได้ดีที่ทุก ๆ ความถี่ ดังนั้นในช่วงการสะสมประจุนี้เส้นกราฟที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำจึงทับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงประจุที่ตอบสนองต่อแรงดันสัญญาณไฟสถับและแรงดันไฟตรงของตัวเก็บประจุ MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ก) สถานะการสะสมประจุ (ข) สถานะการผลัดประจุ (ค) สถานะการผันกลับที่ความถี่ต่ำ (ง) สถานะการผันกลับที่ความถี่สูง

จากสมการ (2.26) ค่าความจุไฟฟ้ารวมจะขึ้นกับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นไดอิเล็กตริกและค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และจากสมการ (2.5) ความหนาแน่นของประจุโฮลที่บริเวณผิวหน้าแปรผันตามค่าเอกซ์โพเนนเชียลของ $\beta\phi_s$ การเปลี่ยนแปลงของ ϕ_s เพียงเล็กน้อยจะทำให้ค่าประจุ Q_s เปลี่ยนแปลงอย่างมาก และส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้า C_s และเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองต่ออนุกรมกัน ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้ารวมขณะเกิดการสะสมประจุจะมีค่าประมาณค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ C_{ox}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา \mathcal{E}_{ox} อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = C_{ox} = \frac{\mathcal{E}_{ox}}{T_{ox}} \quad (2.27)$$

ในขณะที่เปลี่ยนการป้อนแรงดันมาเป็นบวกเพิ่มขึ้น ประจุบวกจะถูกผลักออกจากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดย่านปลอดพาหะบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะกระทำตัวเสมือนสารไดอิเล็กทริกอนุกรมอยู่กับชั้นออกไซด์ ค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าลดน้อยลง ในที่นี้สมมติว่าไม่พิจารณาพาหะข้างน้อยที่บริเวณผิวรอยต่อ (ในเขตปลอดพาหะ) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของประจุที่สะสมจะขึ้นอยู่กับ การขยายตัวหรือการหดตัวของชั้นปลอดพาหะที่ตอบสนองต่อสัญญาณกระแสสลับขนาดเล็ก และขณะนี้ตัวเก็บประจุ MOS จะประกอบด้วย ความจุไฟฟ้าบริเวณชั้นออกไซด์ C_{ox} ต่ออนุกรมกับความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะ C_s

$$C = \frac{C_{ox}C_s}{C_{ox} + C_s} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.28)$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณชั้นออกไซด์จะมีค่าคงที่ แต่ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะจะขึ้นกับศักย์ที่ตกคร่อมชั้นปลอดพาหะ และจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้แก่โครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากความกว้างของชั้นปลอดพาหะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการสร้างชั้นผกกลับขึ้น เมื่อป้อนแรงดันต่อไปอีกจนถึงค่าที่เข้าสู่สภาวะการผกกลับอย่างรุนแรง จะเรียกแรงดันค่านี้ว่าแรงดันขีดเริ่ม V_T (Threshold Voltage) ขณะที่อยู่ในสภาวะการผกกลับอย่างรุนแรง ความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะมีค่าเกือบคงที่แม้ว่าจะป้อนแรงดันค่าต่าง ๆ กัน ในสภาวะเช่นนี้ค่าความจุไฟฟ้าจะแตกต่างกันเมื่อป้อนสัญญาณกระแสสลับความถี่สูงและความถี่ต่ำให้แก่ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ดังนี้

- **ที่ความถี่ต่ำ** อิเล็กตรอนในชั้นผกกลับสามารถตามสัญญาณกระแสสลับได้ทัน ความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์อนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าสูงมาก ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าสัญญาณขนาดเล็กจะกลับมามีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ C_{ox} อีกครั้งเหมือนเมื่อโครงสร้างเข้าสู่สภาวะการสะสมประจุ
- **ที่ความถี่สูง** ปริมาณพาหะในชั้นผกกลับไม่สามารถเปลี่ยนปริมาณได้อย่างรวดเร็วตามความถี่ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวหน้าจะคงที่ตามค่าแรงดันไฟตรงและความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะมีการออสซิลเลต (Oscillate) ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MOS จะมีค่าค้างอยู่ที่ค่าต่ำสุด C_{min}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นเป็นแผ่นฐานรอง เมื่อแรงดันที่ขั้วโลหะ เทียบกับแผ่นฐานรองมีค่าลบเพียงพอที่จะเหนี่ยวนำประจุโฮลมาอยู่ที่บริเวณผิวรอยต่อสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นชั้นผันกลับ ประจุในชั้นปลอดพาหะประกอบด้วยอะตอมผู้ให้อิออนซึ่งเป็นประจุบวก และเมื่อแรงดันที่ขั้วโลหะมีค่าบวกมากขึ้น ประจุพาหะส่วนมากอิเล็กทรอนิกส์จะถูกเหนี่ยวนำมา สะสมที่บริเวณผิวของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ

ชั้นผันกลับที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นเมื่อศักย์ที่ผิวหน้ามีค่าเท่ากับค่าคงที่ ค่าหนึ่ง ϕ_s ซึ่งจะขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ N_A โดยศักย์ที่จะทำให้มีค่าเท่ากับ ระดับพลังงานเฟอร์มิแสดงได้ดังสมการ

$$|\phi_F| = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (2.29)$$

สำหรับฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โครงสร้างจะเข้าสู่สภาวะการผันกลับเมื่อเข้าสู่เงื่อนไขที่

$$\phi_s \approx 2|\phi_F| \quad (2.30)$$

ซึ่งเมื่อเข้าสู่สภาวะการผันกลับอย่างรุนแรง ชั้นปลอดพาหะจะมีความกว้างสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$X_{dm} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A} (2|\phi_F|)} \quad (2.31)$$

พิจารณาค่าแรงดันขีดเริ่มซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้แก่ขั้วโลหะแล้วสามารถเหนี่ยวนำ ประจุที่ต้องการมาอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเกิดเป็นชั้นผันกลับได้ มีค่าเท่ากับ

$$V_T = \frac{Q_s}{C_{ox}} + 2\phi_F \quad (2.32)$$

เนื่องจากขณะที่เข้าสู่สภาวะการผันกลับอย่างรุนแรง $Q_s = qN_A X_d$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ แรงดันขีดเริ่มได้ใหม่เป็น
 เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_T = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A} (2|\phi_F|)}{C_{ox}} + 2|\phi_F| \quad (2.33)$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่สภาวะการผันกลับจะมีค่าต่ำสุดเนื่องจากชั้นปลอดพาหะมีความกว้างสูงสุดดังนั้นจะได้ว่า

$$C_{min} \approx \frac{1}{\frac{T_{ox}}{\mathcal{E}_{ox}} + \frac{X_{dm}}{\mathcal{E}_s}} \quad (2.34)$$

ค่าแรงดันขีดเริ่มในสมการ (2.29) และ (2.30) เป็นค่าแรงดันขีดเริ่มที่พิจารณาเมื่อฐานรองของตัวเก็บประจุ MOS เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีหรือชนิดเอ็นซึ่งจะขึ้นกับค่า ϕ_F โดยค่า ϕ_F คือ ค่าความแตกต่างของพลังงานระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิที่มีอิเล็กตรอนหรือโฮลอยู่กับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ ดังนั้นในการเหนี่ยวนำประจุให้เกิดชั้นผันกลับเป็นประจุชนิดตรงกันข้ามกับประจุพาหะส่วนมากในฐานรองจำเป็นต้องใช้พลังงานเท่ากับ $2|\phi_F|$ ตัวอย่างเช่น ถ้าฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ค่าพลังงาน $2|\phi_F|$ คือ พลังงานที่ใช้ในการผลักประจุโฮลในฐานรอง $1|\phi_F|$ และเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงประจุอิเล็กตรอนในฐานรองอีก $1|\phi_F|$ ดังนั้นพลังงานรวมจึงมีค่า $2|\phi_F|$ ในกรณีที่พิจารณาว่าฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของค่าอย่างเหมาะสมจะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ที่ระดับ 0.62 eV เทียบกับระดับพลังงานวาเลนซ์อิเล็กตรอนของซิลิกอน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ ดังนั้นในการเหนี่ยวนำประจุให้เกิดชั้นผันกลับเป็นประจุชนิดตรงกันข้ามที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนจึงใช้พลังงานเพียง $|\phi_F|$ [10]

ดังนั้นค่าแรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของค่าจะมีค่าเป็น

$$V_T = \frac{\sqrt{2\mathcal{E}_s q N_A |\phi_F|}}{C_{ox}} + |\phi_F| \quad (2.35)$$

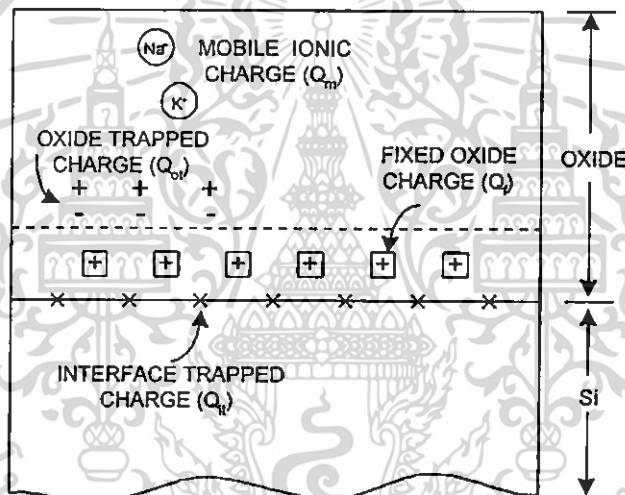
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS

การศึกษาตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS จะพบว่า ค่าประจุภายในชั้นออกไซด์และบริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและชั้นออกไซด์จะส่งผลต่อความเสถียรและความสมดุลความร้อน (Thermal equilibrium) ของโครงสร้าง โดยประจุเหล่านี้ประกอบไปด้วย

- 1) ประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อ (Interface trapped charge) Q_{it}
- 2) ประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในออกไซด์ (Fixed oxide charge) Q_f
- 3) ประจุที่จับประจุในออกไซด์ (Oxide trapped charge) Q_{ot}
- 4) ประจุเคลื่อนที่ (Mobile ionic charge) Q_m

ซึ่งตำแหน่งของประจุเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ประจุภายในชั้นออกไซด์และบริเวณผิวรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและชั้นออกไซด์

ประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อ Q_{it} เป็นประจุที่อยู่บริเวณผิวหน้ารอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและชั้นไดออกไซด์ทริก โดยเทรป (trap) จะมีระดับพลังงานอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามของซิลิกอน ประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อนี้เกิดเนื่องจากคุณสมบัติของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและชั้นไดออกไซด์ทริก และจะขึ้นกับพันธะทางเคมีของอะตอมที่บริเวณรอยต่อนอกจากนี้ความหนาแน่นของเทรปที่รอยต่อ (จำนวนของเทรปที่รอยต่อ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ยังขึ้นอยู่กับทิศทางและระนาบของผลึกด้วย โดยผลึกที่มีระนาบ (100) หนาแน่นกว่าระนาบอื่น การคำนวณว่าเทรปที่รอยต่อ จะน้อยกว่าผลึกที่มีระนาบ (111) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานที่รอยต่อ (interface trap) เกิดจากการออกซิเดชันที่ไม่สมบูรณ์บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและออกไซด์ ซึ่งทำให้แขนของอะตอมซิลิกอนบางส่วนขาด (dangling bond) และจากการศึกษาพบว่าระดับพลังงานที่รอยต่อที่เกิดขึ้นสามารถเป็นได้ทั้งระดับพลังงานผู้ให้เสมือน (donor like level) หรือระดับพลังงานผู้รับเสมือน (acceptor like level) โดยระดับพลังงานที่รอยต่อจะถูกพิจารณาว่าเป็นระดับพลังงานผู้ให้เสมือนเมื่อมีประจุเป็นกลางหรือบวกโดยการให้อิเล็กตรอน และระดับพลังงานผู้รับเสมือนจะเป็นกลางหรือลบโดยการรับอิเล็กตรอน ฟังก์ชันการกระจายของระดับพลังงานผู้ให้เสมือนที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการ (2.33) [9]

$$F_{SD}(E_t) = \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \right] = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right)} \quad (2.36)$$

และฟังก์ชันการกระจายระดับพลังงานผู้รับที่รอยต่อ

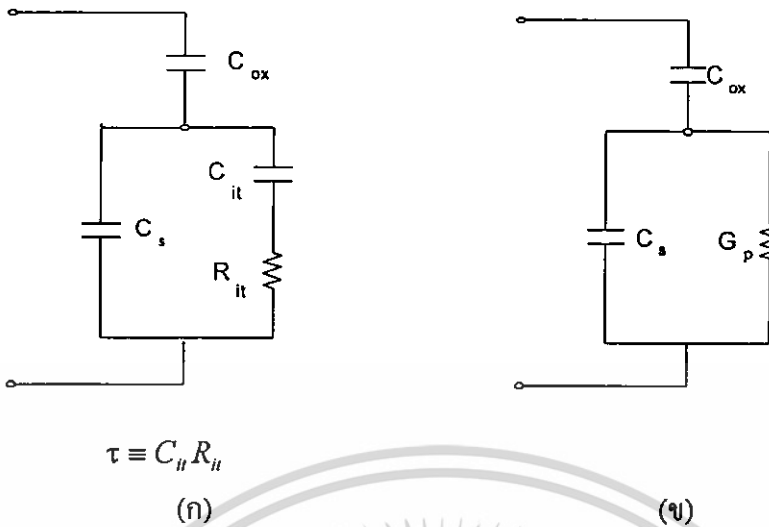
$$F_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.37)$$

โดย E_t คือ ระดับพลังงานที่รอยต่อ

g คือ ground-state degeneracy ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 2 สำหรับระดับพลังงานผู้ให้และมีค่าเท่ากับ 4 สำหรับระดับพลังงานผู้รับ

เมื่อป้อนแรงดันให้แก่โครงสร้าง ระดับพลังงานที่รอยต่อจะมีการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงกับแถบพลังงานวาเลนซ์และแถบพลังงานความนำ ในขณะที่ระดับพลังงานเฟอร์มิจะยังคงอยู่ที่ระดับเดิม การเปลี่ยนแปลงของประจุในระดับพลังงานที่รอยต่อจะเกิดขึ้นเมื่อระดับพลังงานนั้นตัดกับระดับพลังงานเฟอร์มิ วงจรสมมูลพื้นฐานที่รวมผลเนื่องจากระดับพลังงานที่รอยต่อแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ภายในรูป C_{it} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ และ C_D คือ ค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณชั้นปลอดพาหะ C_n และ R_n คือ ความจุไฟฟ้าและความต้านทานที่เกิดขึ้นเนื่องจากระดับพลังงานที่รอยต่อและเป็นฟังก์ชันกับศักย์ที่ผิวหน้า C_p, R_p คือ ค่าช่วงอายุของระดับพลังงานที่รอยต่อ ซึ่งจะใช้อธิบายพฤติกรรมทางความถี่ของระดับพลังงานที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



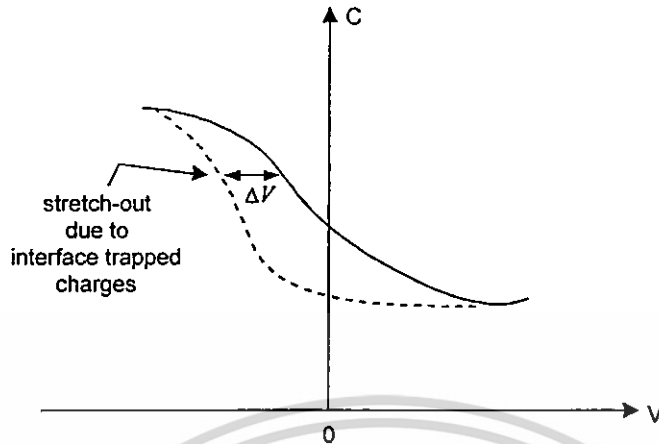
รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลซึ่งพิจารณาผลกระทบเนื่องจากระดับพลังงานที่รอยต่อ

$$C_p = C_s + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.38)$$

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.39)$$

พิจารณาว่าระดับพลังงานที่จับประจุบริเวณรอยต่อเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับฐานรองของผลึก ดังนั้นอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจากระดับพลังงานที่ผิวเข้าไปยังภายในผลึก และกลับออกมาอีกครั้งเมื่อได้รับพลังงาน ถ้าโครงสร้างเกิดศักย์ที่บริเวณผิว ϕ_s ประจุจะเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากระดับพลังงานที่บริเวณผิวจนกระทั่งระดับพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิว่างและระดับพลังงานที่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนประจุอย่างรวดเร็วในระดับเวลาที่ต่ำกว่า 10^{-1} วินาที ระดับพลังงานนั้นจะเรียกว่า ระดับพลังงานผิวหน้าที่เร็ว (fast surface state) ในขณะที่ ถ้าการแลกเปลี่ยนอยู่ในระดับเวลา วินาที, นาฬิกา หรือนานกว่านั้น ระดับพลังงานนั้นจะเรียกว่าเป็น ระดับพลังงานผิวหน้าที่ช้า (slow surface state) [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากประจุที่จับประจุในรอยต่อ

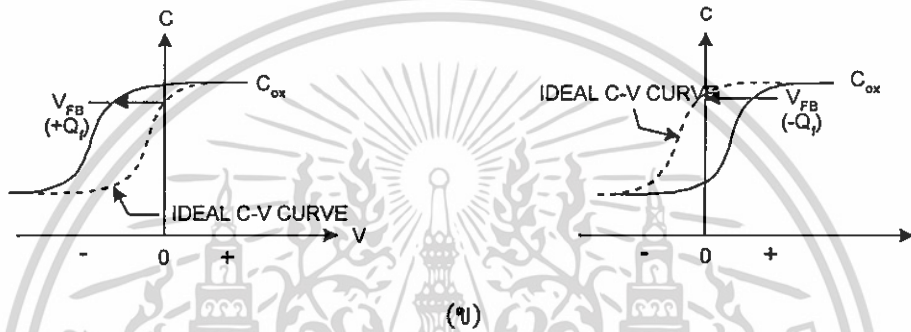
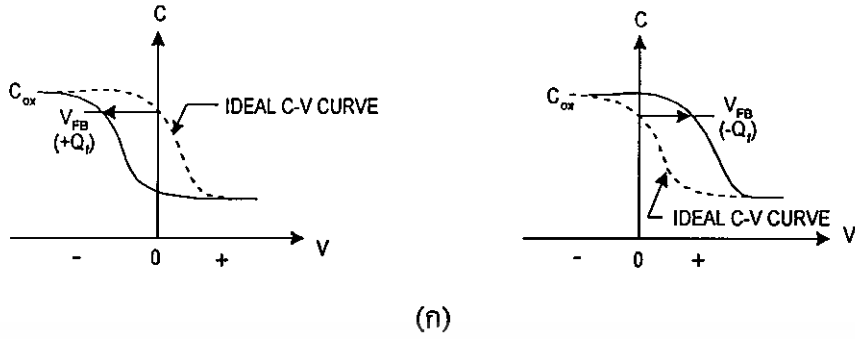
ความหนาแน่นของประจุที่จับประจุในรอยต่อนี้เพียงเล็กน้อยก็ส่งผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์และคุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถทำการลดปริมาณประจุที่รอยต่อนี้ได้โดยการแอนนิล (anneal) แผ่นผลึกในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส

2.6 ประจุในชั้นออกไซด์ของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้าง MOS

นอกจากประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อ (Q_{it}) จะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS แล้ว ประจุในชั้นออกไซด์ซึ่งประกอบด้วย ประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ (Q_f), ประจุเคลื่อนที่ (Q_m) และประจุที่จับประจุในชั้นออกไซด์ (Q_{ot})

ประจุ Q_f เป็นประจุที่ไม่เคลื่อนที่ อยู่ห่างจากรอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและออกไซด์ในระยะไม่เกิน 30 อังสตรอม มีค่าคงที่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของศักย์ที่พื้นผิวกว้างมาก ความหนาแน่นของประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ Q_f ไม่ขึ้นกับความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก และไม่ขึ้นกับชนิดของสารเจือรวมทั้งความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยทั่วไป ประจุ Q_f เป็นประจุบวก ความหนาแน่นของประจุขึ้นกับเงื่อนไขการสร้างชั้นออกไซด์ การแอนนิลและทิศทางของผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

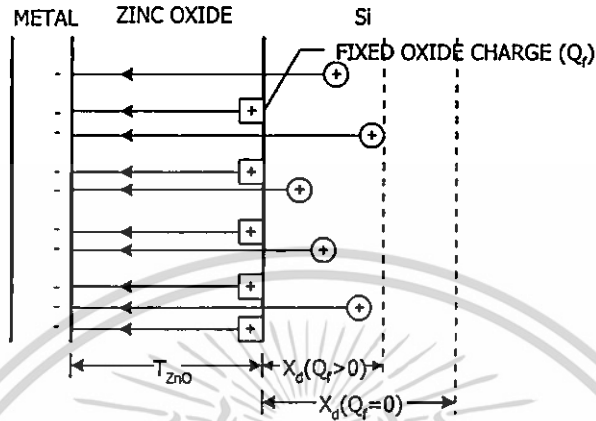


รูปที่ 2.14 กราฟค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่เลื่อนไปตามแกนแรงดันเนื่องจากประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ Q_f (ก) ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ข) ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

รูปที่ 2.14 แสดงการเลื่อนไปตามแนวแกนแรงดันของกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุเมื่อมีประจุบวกหรือประจุลบ Q_f ที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งการเลื่อนไปของแรงดันนี้จะเปรียบเทียบกับกราฟในอุดมคติที่ $Q_f = 0$ สำหรับฐานรองที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี ประจุ Q_f ที่เป็นบวกจะส่งผลให้กราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเลื่อนไปทางแรงดันเกทที่เป็นลบมากขึ้นเมื่อเทียบกับกราฟในอุดมคติ ขณะที่ประจุลบ Q_f จะทำให้กราฟเลื่อนไปทางบวกของแรงดัน

แรงดันที่เลื่อนไปของกราฟระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเนื่องจากประจุ Q_f สามารถอธิบายโดยอาศัยรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงภาคตัดขวางของตัวเก็บประจุ MOS ที่มีประจุบวก Q_f อยู่ในโครงสร้างและถูกไบอัสด้วยแรงดันลบ จากการสมดุลประจุของโครงสร้าง ประจุลบบนขั้วโลหะเกตจะถูกลดเซชจากประจุที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามในชั้นไดอิเล็กตริกและสารกึ่งตัวนำชนิดพี สำหรับกรณีอุดมคติ $Q_f = 0$ ประจุที่เซชคือ อะตอมผู้ให้อิออนในสารกึ่งตัวนำ แต่ในทางปฏิบัติประจุในชั้นออกไซด์ไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นประจุเซชจะประกอบด้วยประจุ Q_f และ

อะตอมสารเจือผู้ให้ไอออน รูปที่ 2.15 ยังแสดงถึงเส้นสนามไฟฟ้าจากประจุ Q_f ไปยังประจุบนเกตโลหะ และสนามไฟฟ้าจากอะตอมสารเจือผู้ให้ไอออนไปยังขั้วโลหะ



รูปที่ 2.15 ผลของประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในชั้นออกไซด์ (Q_f) ต่อโครงสร้างตัวเก็บประจุ MOS

เนื่องจากขณะที่ $Q_f \neq 0$ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะน้อยกว่าในขณะที่ $Q_f = 0$ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าจึงมีค่ามากกว่ากรณีอุดมคติ สำหรับทุกค่าของแรงดันเกตในช่วงปลอดพาหะและช่วงผันกลับ ซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนของกราฟ C-V ไปทางด้านลบของแรงดันเกตมากขึ้นเมื่อประจุ Q_f เป็นบวก สำหรับประจุลบ Q_f กราฟจะเลื่อนไปในทิศทางตรงกันข้าม โดยขนาดของการเลื่อนไปนี้หาได้จาก

$$\Delta V_f = \frac{Q_f}{C_{ox}} \quad (2.40)$$

ประจุที่เคลื่อนที่ Q_m เกิดจากไอออนของสารอัลคาไล (Alkali) โดยเฉพาะไอออนของโซเดียม (Na^+) (ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการ) เข้ามาในชั้นออกไซด์ โดยอาจมีสาเหตุจากการทำความสะอาดในขั้นตอนไม่ดีเพียงพอหรือเกิดจากการใช้เตาที่ผลิตจากวัสดุที่ประกอบด้วยโซเดียม ไอออนของโซเดียมเป็นประจุบวกและมีค่าความคล่องตัวสูงในชั้นออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นในขณะที่ป้อนแรงดันไฟตรงให้กับตัวเก็บประจุจึงเป็นการเลื่อนประจุเหล่านี้ตามเวลา ทำให้การโค้งงอของแถบพลังงานมีการเปลี่ยนแปลง ประจุเคลื่อนที่นี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้แรงดันแถบราบเลื่อนไปและส่งผลกระทบต่อความเสถียรภาพของอุปกรณ์ โดยการเลื่อนไปของแรงดันแถบราบเนื่องจากประจุเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้จากกฎของเกาส์

$$\Delta V_m = \frac{Q_m}{C_{ox}} = \frac{1}{C_{ox}} \left[\frac{1}{T_{ox}} \int_0^{T_{ox}} x \rho(x) dx \right] \quad (2.41)$$

ประจุที่จับประจุในออกไซด์ Q_{ot} เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการเลื่อนแรงดันของกราฟคุณสมบัติระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน ประจุ Q_{ot} เกิดจากความไม่สมบูรณ์ภายในชั้นออกไซด์ โดยปรกติแพร่ภายในออกไซด์จะเป็นกลางทางไฟฟ้าและสามารถจับประจุได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ ซึ่งประจุเหล่านี้ภายใต้สภาวะปรกติจะอยู่กับที่และสามารถทำให้ลดลงได้โดยการแอนนیلที่อุณหภูมิต่ำ ๆ รูปที่ 2.16 แสดงแถบพลังงาน, การกระจายของประจุ, สนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีประจุไม่เคลื่อนที่ในออกไซด์และประจุจับประจุในออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.16 กับรูปที่ 2.8 พบว่าในการที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ผิวค่าเดียวกัน ϕ_s แรงดันที่ป้อนให้แก่โครงสร้างมีค่าลดลง การเลื่อนไปของกราฟค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันเนื่องจากประจุที่จับประจุในออกไซด์มีค่า

$$\Delta V_{ot} = \frac{Q_{ot}}{C_{ox}} = \frac{1}{C_{ox}} \left[\frac{1}{T_{ox}} \int_0^{T_{ox}} x \rho_{ot}(x) dx \right] \quad (2.42)$$

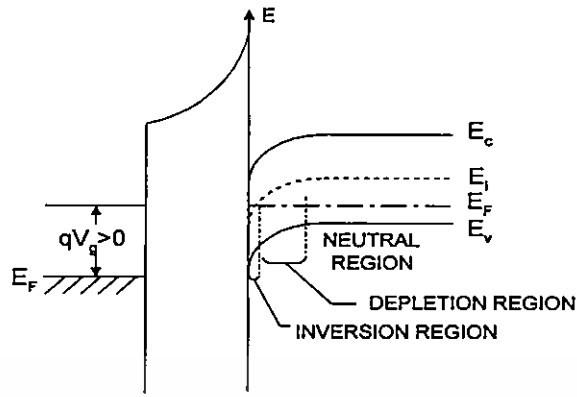
ดังนั้นการเลื่อนไปเนื่องจากประจุในออกไซด์ทั้งหมดจะมีค่าเป็น

$$\Delta V = \Delta V_f + \Delta V_m + \Delta V_{ot} = \frac{Q_o}{C_{ox}} \quad (2.43)$$

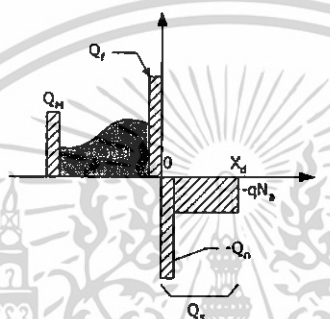
โดย $Q_o \equiv (Q_f + Q_m + Q_{ot})$

คือ ผลรวมของประจุออกไซด์ทั้งหมดที่บริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำและออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

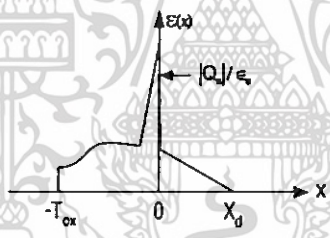
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



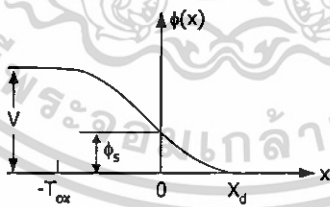
(ก)



(ข)



(ค)



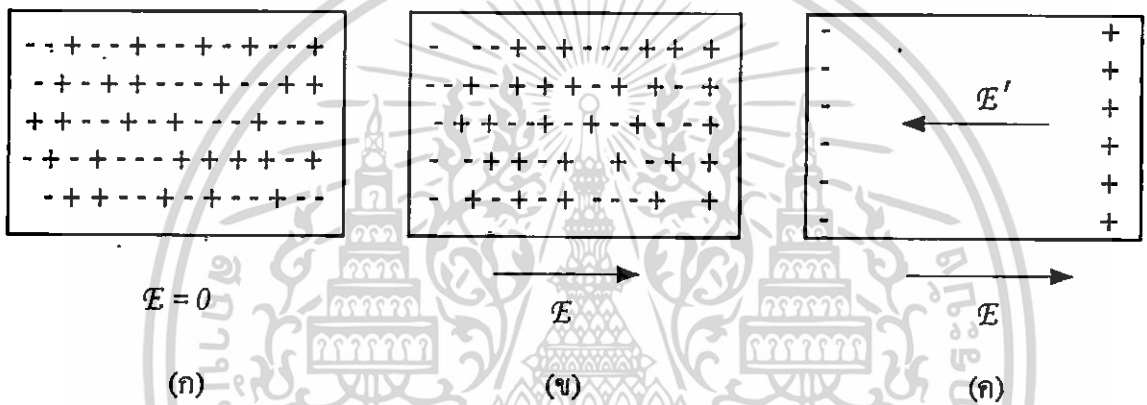
(ง)

รูปที่ 2.16 ตัวเก็บประจุ MOS ที่ประกอบด้วยประจุไม่เคลื่อนที่ในออกไซด์และประจุที่จับประจุในออกไซด์ (ก) โครงสร้างแถบพลังงาน (ข) การกระจายของประจุ (ค) สนามไฟฟ้า

(ง) ศักย์ไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ตัวเก็บประจุที่มีขั้วออกไซด์เป็นไดอิเล็กตริก

สำหรับตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างเป็นโลหะ-ขั้วออกไซด์-สารกึ่งตัวนำ เมื่อพิจารณาสารกึ่งตัวนำเป็นตัวนำหรือแผ่นโลหะและขั้วออกไซด์เป็นสารไดอิเล็กตริก พบว่าลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุจะเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน (Parallel plate capacitor) โดยสารไดอิเล็กตริกที่คั่นกลางตัวนำเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) ซึ่งการจับกลุ่มเรียงตัวของไดโพลจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในสารไดอิเล็กตริกที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 สภาวะของสารไดอิเล็กตริกขณะอยู่ในสนามไฟฟ้า (ก) อีตระจากสนามไฟฟ้า (ข) เริ่มอยู่ในสนามไฟฟ้า E (ค) สภาวะสมดุลภายในสนามไฟฟ้า E

ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างจะมีค่าเท่ากับปริมาณประจุไฟฟ้ารวมต่อความต่างศักย์ของขั้วโลหะทั้งสองดังสมการ

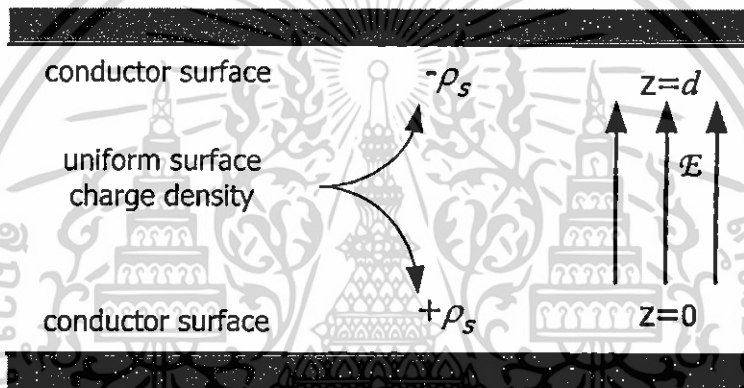
$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.44}$$

ซึ่งสามารถหาค่าประจุ Q ได้โดยการอินทิเกรตพื้นผิวของแผ่นตัวนำ และ V หาได้จากการอินทิเกรตจากผิวหน้าที่ประกอบไปด้วยประจุลบไปยังผิวหน้าที่ประกอบไปด้วยประจุบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{\oint \epsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}}{-\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}} \quad (2.45)$$

ค่าความจุไฟฟ้าในสมการ (2.45) จะมีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นกับแรงดันและประจุรวม ถ้าความหนาแน่นของประจุมิค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับแฟกเตอร์ N จากกฎของเกาส์พบว่าความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density) หรือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) จะเพิ่มขึ้นเท่ากับแฟกเตอร์ N ด้วยทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.18 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนาน

เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุที่มีระนาบของแผ่นโลหะห่างกันเป็นระยะ d และมีประจุที่บริเวณผิวหน้าแต่ละด้านของตัวนำเท่ากับ $\pm \rho_s$ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จะเกิดสนามไฟฟ้า

$$\mathcal{E} = \frac{\rho_s}{\epsilon} \quad (2.46)$$

ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 V &= -\int_d^0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \\
 &= -\int_d^0 \frac{\rho_s}{\epsilon} dz = \frac{\rho_s}{\epsilon} d
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

ถ้าแผ่นตัวนำแต่ละแผ่นมีพื้นที่เท่ากับ A จากสมการ (2.44) ถึงสมการ (2.47) จะสามารถหาค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นขนานได้เป็น

$$\begin{aligned}
 Q &= \rho_s A \\
 V &= \frac{\rho_s}{\epsilon} d \\
 C &= \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon A}{d}
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

จากสมการ (2.48) พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานจะเป็นฟังก์ชันของขนาดของตัวเก็บประจุและค่าสภาพยอม (Permittivity) ของสารไดอิเล็กตริก

2.8 ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อซิงค์ออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำ

ในกรณีที่พิจารณาว่าซิงค์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [11] เมื่อซิงค์ออกไซด์ต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, พี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของค่า บริเวณรอยต่อจะเกิดช่วงปลอดพาหะซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าสูง ดังนั้นจึงมีค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อเรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (Depletion layer capacitance) เกิดขึ้น ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อนี้จะมีผลต่อการทำงานและเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส

พิจารณาเมื่อซิงค์ออกไซด์ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี ในสภาวะสมดุลความร้อน การแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดพีเกิดมีไอออนลบของอะตอมสารเจือผู้รับเกิดขึ้น ทำนองเดียวกันทางด้านเอ็นของซิงค์ออกไซด์ก็เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้เกิดขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่ากับผลคูณของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้กับค่าประจุอิเล็กตรอนในแต่ละส่วน โดยค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่ากับ

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (2.49)$$

โดยค่าประจุที่สะสมอยู่บริเวณทั้งสองด้านของรอยต่อ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่นั้น ประจุบวกสุทธิทางด้านเอ็นจะเท่ากับประจุลบสุทธิทางด้านพีดังสมการ

$$Q = qN_D X_{dn} = qN_A X_{dp} \quad (2.50)$$

โดย X_{dn} คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

X_{dp} คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ในกรณีที่รอยต่อเป็นรอยต่อแบบสมมาตร ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะขยายเข้าไปทางด้านพี (X_{dp}) เท่ากับที่ขยายเข้าไปทางด้านเอ็น (X_{dn}) แต่ในกรณีที่เป็นรอยต่อแบบไม่สมมาตร บริเวณปลอดพาหะและแรงดันจะปรากฏมีค่ามากที่ด้านซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือน้อยกว่า ในที่นี้พิจารณาว่าสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีมีความหนาแน่นมากกว่าด้านซึ่งก้ออกไซด์ ดังนั้น $X_{dp} < X_{dn}$ และถ้าให้ V_o คือศักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $X_d = X_{dn} + X_{dp}$ ซึ่งมีสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ [12]

$$V_o = \frac{-qN_D (X_{dp} + X_{dn})^2}{2\epsilon} + \frac{qX_{dp} (N_A + N_D)(X_{dn} + X_{dp})}{\epsilon} - \frac{qX_{dp}^2 (N_A + N_D)}{2\epsilon} \quad (2.51)$$

จากสมการ (2.50) และสมการ (2.51) จะได้ว่าขณะอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อน

$$X_{dp} = \left[\frac{2\epsilon V_o N_D}{qN_A (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.52 ก)$$

$$X_{dn} = \left[\frac{2\epsilon V_o N_A}{qN_D (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.52 ข)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสามารถแสดงได้เป็น

$$X_d = X_{dn} + X_{dp} = \left[\frac{2\varepsilon V_o (N_A + N_D)}{qN_A N_D} \right]^{1/2} \quad (2.53)$$

ดังนั้นสมการ (2.50) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Q = \left[\frac{2\varepsilon q V N_A N_D}{N_A N_D} \right]^{1/2} \quad (2.54)$$

แทนค่าประจุไฟฟ้า Q ลงในสมการ (2.49) ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่าเท่ากับ

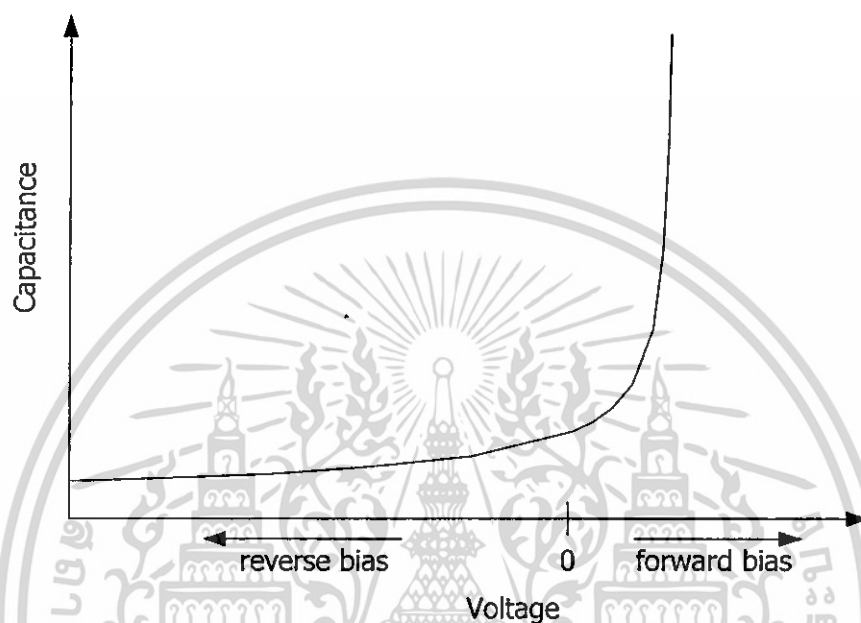
$$\begin{aligned} C &= \frac{d}{dV} \left[\frac{2\varepsilon q N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2} \cdot V^{1/2} \\ &= \left[\frac{\varepsilon q N_A N_D}{2(N_A + N_D)} \right] \cdot \frac{1}{V^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.55)$$

จากสมการ (2.53) สามารถเขียนสมการ (2.55) ใหม่ได้เป็น

$$C = \frac{\varepsilon}{X_{dn} + X_{dp}} \quad (2.56)$$

ดังนั้นที่บริเวณรอยต่อจึงคืออกไซด์ซึ่งพิจารณาว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่นแยกจากกันเป็นระยะ $X_{dn} + X_{dp}$ โดยมีไดอิเล็กทริกเป็นตัวกลางที่มีค่าสภาพยอม (Permittivity) ε ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงค่า $X_{dn} + X_{dp}$ จะมีค่าน้อยลงทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามักเพิ่มมากขึ้น และขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าของ $X_{dn} + X_{dp}$ จะมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลง ซึ่ง

สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อซึ่งเป็นฟังก์ชันกับแรงดัน

สำหรับกรณีที่ซิงค์ออกไซด์ต่อยูกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำนั้นจะให้ผลในลักษณะเดียวกัน คือ ค่าความจุไฟฟ้าจะขึ้นกับระยะห่างของบริเวณปลอดพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ แต่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะขยายเข้าไปที่บริเวณด้านโคของรอยต่อมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ซึ่งสุดท้ายสามารถหาค่าความจุไฟฟ้าได้จากการใช้สมการ (2.49) โดยที่ประจุมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงคุณลักษณะของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS พร้อมทั้งอธิบายและเสนอแนวโน้มนวัตกรรมทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทดลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าในด้านต่าง ๆ ของอุปกรณ์ โดยพบว่าการพัฒนาค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS สามารถกระทำได้โดยการใช้สารโคอีเล็กทริกที่มีค่าสภาพยอมสูง ซึ่งการเลือกวัสดุที่มีค่าสภาพยอมสูงเป็นชั้นโคอีเล็กทริกต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของค่าสภาพยอมของสารโคอีเล็กทริกที่มีผลต่อค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) โดยถ้าค่าสภาพยอมของสารโคอีเล็กทริกมีค่าสูง ช่องว่างพลังงานจะมีค่าลดน้อยลง ดังที่ได้กล่าวใน บทที่ 1 ดังนั้นการเลือกวัสดุมาสร้างเป็นชั้นโคอีเล็กทริกของตัวเก็บประจุจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าช่องว่างพลังงานของสารโคอีเล็กทริกว่ามีสภาพความต้านทานเพียงพอ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกซิงค์ออกไซด์มาสร้างเป็นชั้นโคอีเล็กทริกของตัวเก็บประจุ สารโคอีเล็กทริกซิงค์ออกไซด์นี้ไม่สามารถสร้างด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อนเช่นเดียวกับซิลิกอนไดออกไซด์ได้ จึงต้องหากระบวนการสร้างที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริงแบบต่าง ๆ เช่น ดีซี ไดโอด (DC Diode Sputtering), แบบ ดีซี ไตรโอด (DC Triode Sputtering), แบบ อาร์เอฟ ไดโอด (RF Diode Sputtering) และ แบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอน (RF Magnetron Sputtering) เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ที่มีความต้านทานสูงสามารถนำไปสร้างเป็นชั้นโคอีเล็กทริกของอุปกรณ์ได้ โดยในบทนี้นำเสนอกระบวนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS และการทดลองหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

3.1 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS

การสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำแบบแนวระนาบ (Planar technology) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งกระบวนการสร้างเริ่มจากการเตรียมแผ่นฐานรอง ไปจนถึงการสร้างเป็นอุปกรณ์ที่สมบูรณ์ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้น (Wafer preparation)

ในการเตรียมแผ่นฐานรองเบื้องต้นมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติที่มีต่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการเลือกแผ่นฐานรองจึงต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแผ่นฐานรองด้วย เช่น ความเข้มข้นของแผ่นฐานรอง, ระบายของผลึก, ค่าพิคัดความต้านทาน ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แผ่นฐานรองซึ่งเป็นแผ่นผลึกเดี่ยวสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ระบายของผลึก คือ (100)

ภายหลังจากเลือกแผ่นผลึกฐานรองที่เหมาะสมแล้ว ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเพื่อเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกพร้อมทั้งออกไซด์ที่เกิดบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนออกซึ่งขั้นตอนการทำทำความสะอาดผิวหน้ามีดังนี้ คือ

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water, DI) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- สกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 5%) เป็นเวลา 2 นาที เพื่อกำจัดซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนที่เกิดขึ้นจากการเก็บบรรจุผลึกซิลิกอน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เพื่อล้างกรดไฮโดรฟลูออริกออก
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวที่เกิดจากกระบวนการผลิตแผ่นผลึกซิลิกอน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์เพื่อล้างกรดไนตริก
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างไตรคลอโรเอธิลีนด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 5%) 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนตามกระบวนการขั้นตอนแล้ว จะได้แผ่นผลึกที่สะอาดพร้อมที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในขั้นตอนต่อไป

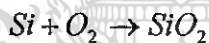
3.1.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการนี้เป็นการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อไปปกคลุมที่ผิวของซิลิกอน โดยมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์จะถูกสร้างปกคลุมผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นหน้าากปกป้องกันบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ซึ่งจะสร้างเป็นชั้นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS เกิดขึ้น ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation process) โดยการให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน (O_2) หรือบรรยากาศที่มีไอน้ำ (H_2O) ที่อุณหภูมิในช่วง 800-1200 องศาเซลเซียส ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก (Wet oxidation) และกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation) ปฏิกริยาทางเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นดังนี้

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งจะให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาแน่นของโครงสร้างสูง แต่จะใช้เวลาในการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์นานกว่ากระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก ซึ่งมีอัตราการเกิดซิลิกอนไดออกไซด์ได้เร็ว แต่ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำและมีรูพรุนมาก ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ (T_{ox}), ระยะเวลาในการเกิดออกไซด์ (t) และอุณหภูมิ (T) ของกระบวนการออกซิเดชันทางความร้อน สามารถหาได้จากการคำนวณอัตราที่สารเจือซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing species คือ O_2 หรือ H_2O) เคลื่อนที่ในบรรยากาศภายในเตาและแพร่ซึมผ่านชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่กำลังปลูกอยู่เพื่อทำปฏิกิริยากับซิลิกอนที่ผิวหน้ารอยต่อระหว่างซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ โดยอัตราการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ขึ้นกับเวลามีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$T_{ox} = \frac{X}{2} \left[\left(1 + \frac{t + \tau_0}{X^2 / 4Y} \right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

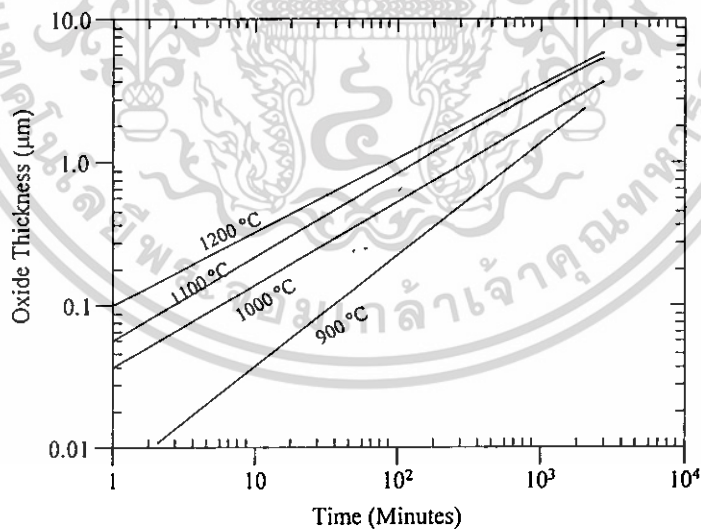
โดยในขณะที่อุณหภูมิต่ำและความหนาของชั้นซัลไฟคอนไดออกไซด์ไม่มาก การสร้างชั้นซัลไฟคอนไดออกไซด์จะถูกควบคุมโดยปฏิกิริยา (ซึ่งเรียกว่า reaction controlled) ในกรณีนี้ความหนาของชั้นซัลไฟคอนไดออกไซด์ T_{ox} จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นตามเวลา t ดังสมการ

$$T_{ox} \approx \frac{Y}{X}(t + \tau_0) \quad (3.2)$$

เมื่อ $Y\tau_0/X$ เป็นความหนาเริ่มต้นของออกไซด์ก่อนสร้างฟิล์ม ค่า X และ Y เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก หลังจากการสร้างซัลไฟคอนไดออกไซด์ชั่วระยะเวลาหนึ่ง อัตราการเกิดของชั้นซัลไฟคอนไดออกไซด์จะถูกจำกัดโดยกระบวนการแพร่ซึม (เรียกว่า diffusion-controlled) ดังนั้นความหนาของแผ่นฟิล์มที่ปลูกจะช้าลงแปรผันตามรากที่สองของเวลา t ดังสมการ

$$T_{ox} \approx \sqrt{Yt} \quad (3.3)$$

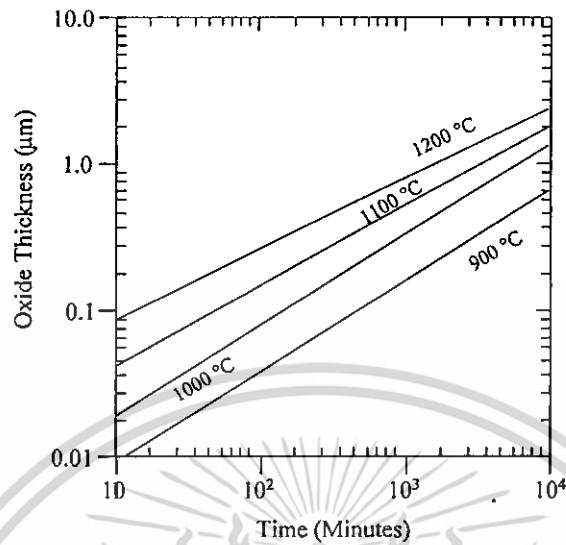
โดยอัตราการเกิดชั้นซัลไฟคอนไดออกไซด์ของกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งและแบบเปียกที่ขึ้นกับเวลาแสดงได้ดังรูปที่ 3.1(ก) และ 3.1(ข) ตามลำดับ [13]



(ก)

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของซัลไฟคอนไดออกไซด์กับเวลา

(ก) กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (ข) กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก



รูปที่ 3.1 (ต่อ)

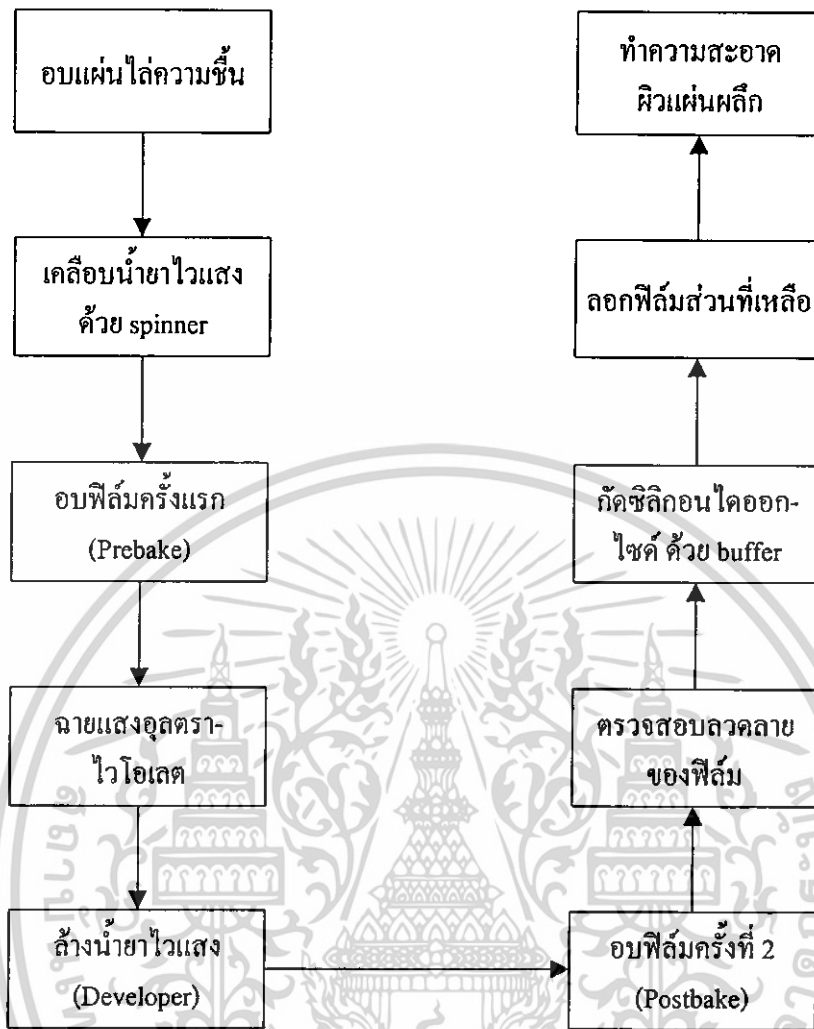
3.1.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพแบบจากระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นสลัก เพื่อเปิดช่องซิกคอนไดออกไซด์หรือกำหนดพื้นที่บริเวณที่ต้องการ โดยใช้น้ำยาไวแสงเข้าช่วย น้ำยาไวแสงที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) เช่น OMR, DTFR, Way Coat เป็นต้น น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติ คือ เมื่อผ่านการฉายแสง บริเวณที่โดนแสงจะทำปฏิกิริยาเกิดการแข็งตัว ส่วนบริเวณที่ไม่โดนแสงจะถูกล้างออกได้ด้วยน้ำยาล้าง
2. น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) เช่น AZ-1350, AZ-1350J, AZ-4700, AZ-5014 เป็นต้น น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับน้ำยาไวแสงชนิดลบ กล่าวคือบริเวณที่โดนแสงสามารถลอกออกได้ด้วยน้ำยาล้าง ส่วนพื้นที่ที่ไม่โดนแสงจะยังคงอยู่เหมือนเดิม

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

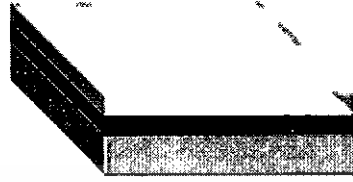
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







รูปที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

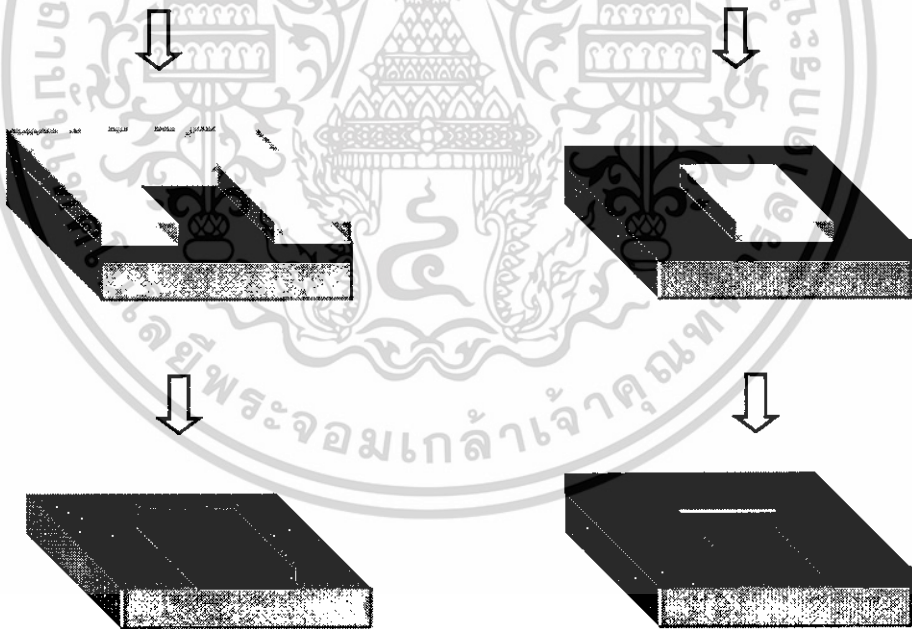
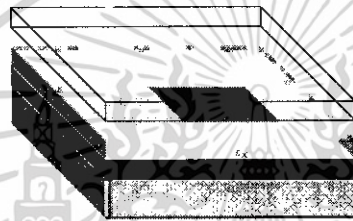
ขั้นตอนแรกของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี คือ การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนโดยใช้เทคนิคสปิน (Spin coating) เพื่อให้ น้ำยาไวแสงเคลือบสม่ำเสมอบนผิวหน้าแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ แล้วนำแผ่นไปอบเพื่อให้ น้ำยาไวแสงแห้ง จากนั้นจึงฉายด้วยแสงอุตรา-ไวโอเลต แสงอุตราไวโอเลตจะทำให้โครงสร้างของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลง โดยโมเลกุลของน้ำยาไวแสงชนิดลบจะเกิดพันธะเกาะเกี่ยวกัน (permilized) ในบริเวณที่ถูกฉาย สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดบวก พันธะของโมเลกุลจะแตกเมื่อถูกแสง ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จะถูกกัดออกโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ไฮโดรฟลูออริก (Buffered Hydrofluoric) โดยสารละลายนี้จะไม่กัดส่วนที่มีน้ำยาไวแสงเคลือบอยู่ แล้วจึงล้างน้ำยาไวแสงออกให้หมด สุดท้ายจะได้ความคลายของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหน้ากากสำหรับกระบวนการสร้างในลำดับถัดไป

เคลือบน้ำยาไวแสง
ด้วย Spinner



-  Silicon
-  Photoresist
-  ZnO
-  Mask on Glass

Mask Alignment



รูปที่ 3.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีที่ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 กระบวนการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

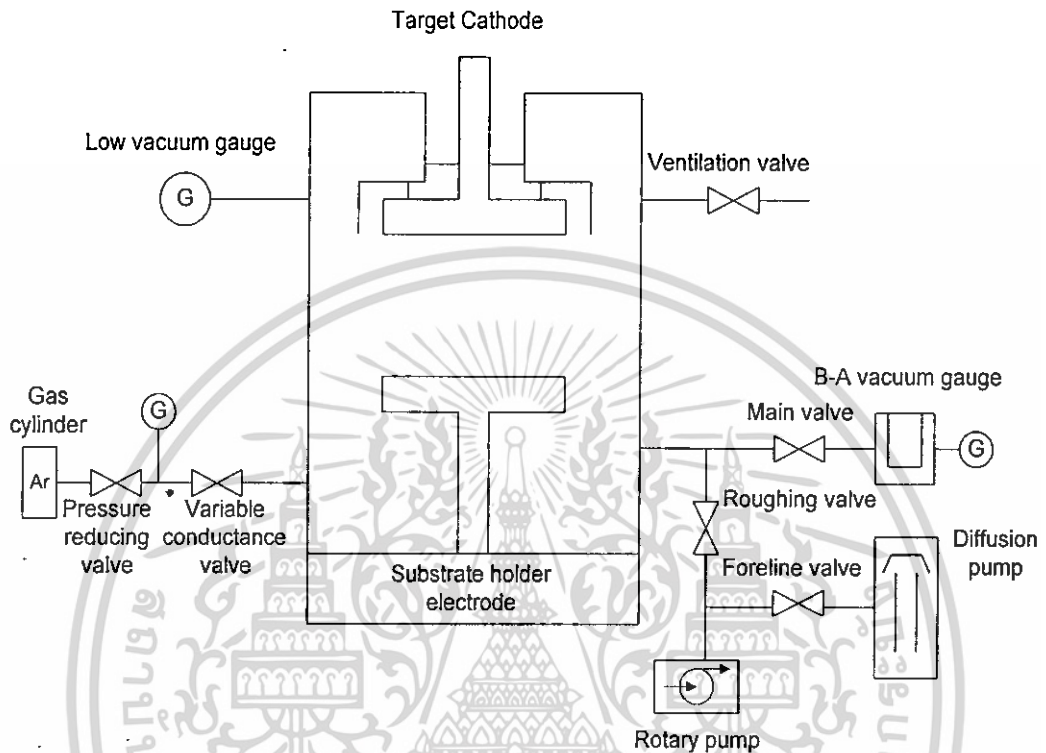
ภายในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการสปีดเตอร์ริงซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อุณหภูมิที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรืออนุภาคที่มีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในการสปีดเตอร์ริง คือ

1. มีสารเคลือบเป็นเป้า (target) ให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนแผ่นรองรับ

2. มีอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ โดยปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงระหว่าง 10 ถึง 100 อิเล็กตรอน โวลต์ เพื่อใช้ในการสปีดเตอร์ริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงใช้วิธีเร่งประจุภายใต้สนามไฟฟ้าแทน ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ย่อยต่อการผลิตและเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ และไม่สามารถทำให้กระบวนการสปีดเตอร์ริงเกิดขึ้นได้ ดังนั้นการชนระหว่างสองอนุภาคที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุดเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงเลือกการเร่งไอออนบวกของก๊าซอาร์กอนในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้อัตราการปลดปล่อยอนุภาคของสารเคลือบสูงเพียงพอกับความ ต้องการ

3. อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จ (Glow Discharge)

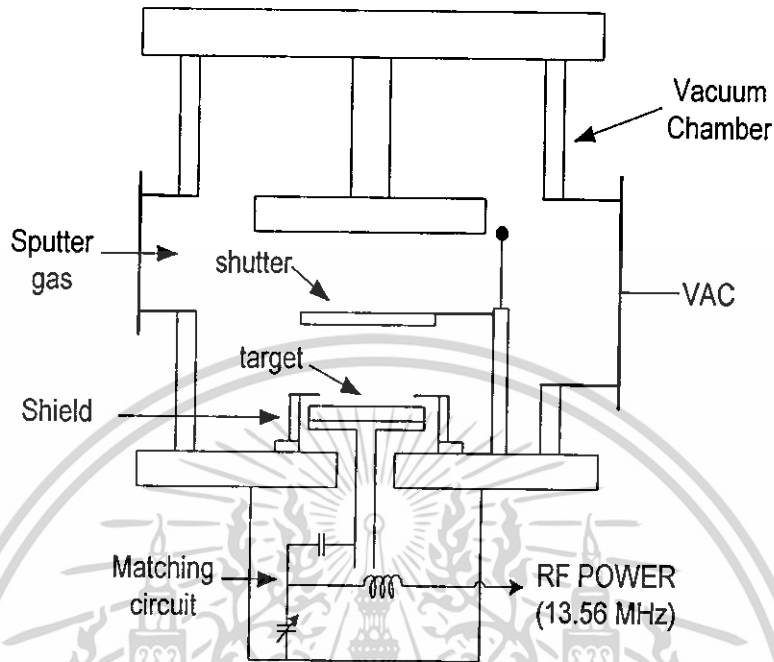
สปีดเตอร์ริงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางอีกวิธีหนึ่งซึ่งอาจเป็นโลหะ สารกึ่งตัวนำ หรือฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสปีดเตอร์ริง (แบบดีซี) แสดงดังรูปที่ 3.4 ในระบบนี้แผ่นฐานรองจะวางอยู่บนแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองในขณะที่เคลือบชั้นฟิล์ม และขั้วแคโทดจะมีเป้า (target) ซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบหรือฝากลงบนแผ่นฐานรองที่วางอยู่ เมื่อทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์จนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการ จากนั้นทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนด-แคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อยที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการ จากนั้นก๊าซอาร์กอนจะแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่ป้อนให้ ไอออนเหล่านี้จึงเคลื่อนจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดและปะทะกับเนื้อวัสดุที่เป็นเป้า ทำให้อะตอมของวัสดุดังกล่าวหลุดจากผิวหน้ามาเคลือบลงบนแผ่นฐานรอง



รูปที่ 3.4 ระบบเครื่องมือสปีดเตอร์ริง

ในกรณีที่เป่าสารเคลือบเป็นสารไดโอดอิเล็กทริก หรือ ฉนวนไฟฟ้า ไม่สามารถใช้การสปีดเตอร์ริงแบบดี.ซี. เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนสารไดโอดอิเล็กทริกในระบบ ดี.ซี. จะสะสมศักย์ไฟฟ้าบวกที่ผิวหน้าของฉนวนจนมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนด และทำให้กระบวนการสปีดเตอร์ริงสิ้นสุดลง จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานความถี่คลื่นวิทยุแทนแรงดันไฟกระแสตรง ซึ่งการสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟนี้จะพาอิเล็กตรอนเข้าสู่ผิวไดโอดอิเล็กทริกทำให้ผิวหน้าเป็นกลางหรือเป็นลบ พร้อมทั้งจะเกิดกระบวนการสปีดเตอร์ริงในช่วงไซเคิลต่อไป กระบวนการสปีดเตอร์ริงแบบนี้เรียกว่า “ระบบสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ ไดโอด สปีดเตอร์ริง (RF Diode Sputtering)”[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ระบบสปัตเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ ไดโอด

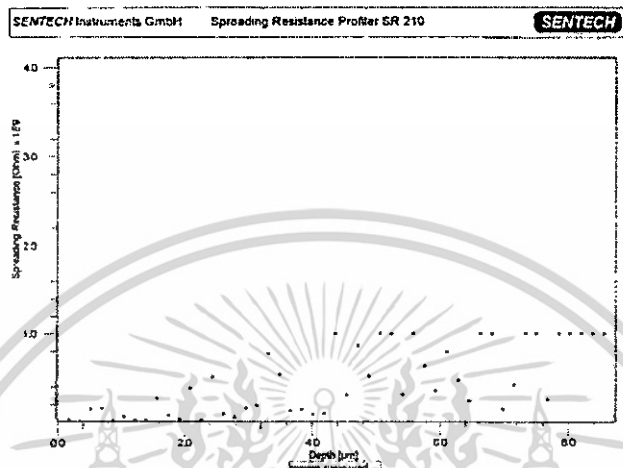
เงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์โดยใช้ระบบ อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริง มีดังนี้

1. ระบบสปัตเตอร์แบบแหล่งจ่ายพลังงานความถี่คลื่นวิทยุ 13.56 เมกกะเฮิร์ต
2. ระยะห่างระหว่างคาโรดและอาโนด 35 มิลลิเมตร
3. เนื้อวัสดุที่เป็นเป้าเคลือบสารคือ ผงซิงค์ออกไซด์อัด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร
4. บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน
5. ความดันภายในแคมเบอร์ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ (mbar)
6. กำลังคลื่นวิทยุ 100 วัตต์
7. อุณหภูมิของฐานรอง (อาโนด) 25-100 องศาเซลเซียส

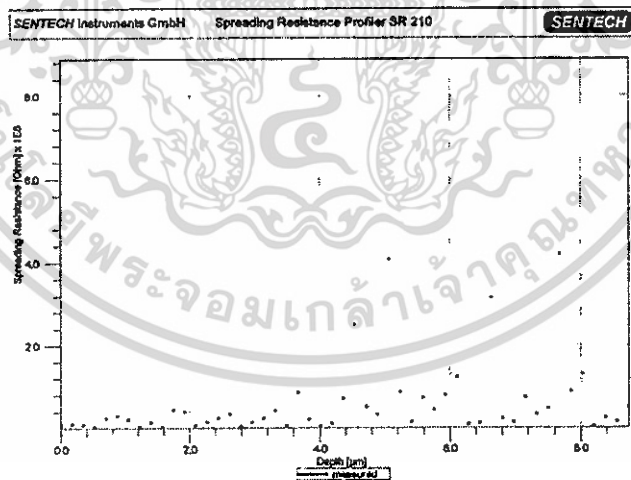
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ในการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการอาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริงใน วิทยาลัยเทคนิคบึงฉลือ จังหวัดฉะเชิงเทรา วิทยาณิพนธ์ฉบับนี้ เราได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของฐานรองเป็น 25, 50 และ 100 องศาเซลเซียส เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ได้มีค่าความต้านทานสูงสุดเหมาะสมต่อ

การนำมาสร้างเป็นชั้นไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุ โดยได้นำฟิล์มบางที่สร้างได้เมื่อมีอุณหภูมิฐานรองต่างกันมาวัดค่าความต้านทานด้วยวิธี Spreading resistance จากเครื่อง SENTECH รุ่น SR210 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.6(ก) – 3.6(ค) ตามลำดับ



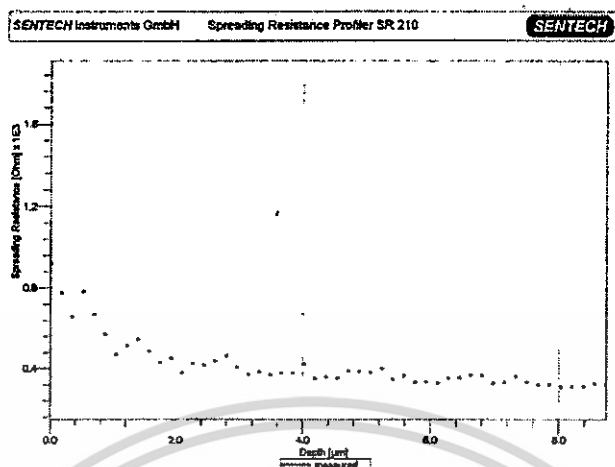
(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่สร้างเมื่อฐานรองมีอุณหภูมิ

(ก) 25 องศาเซลเซียส (ข) 50 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส



(ก)

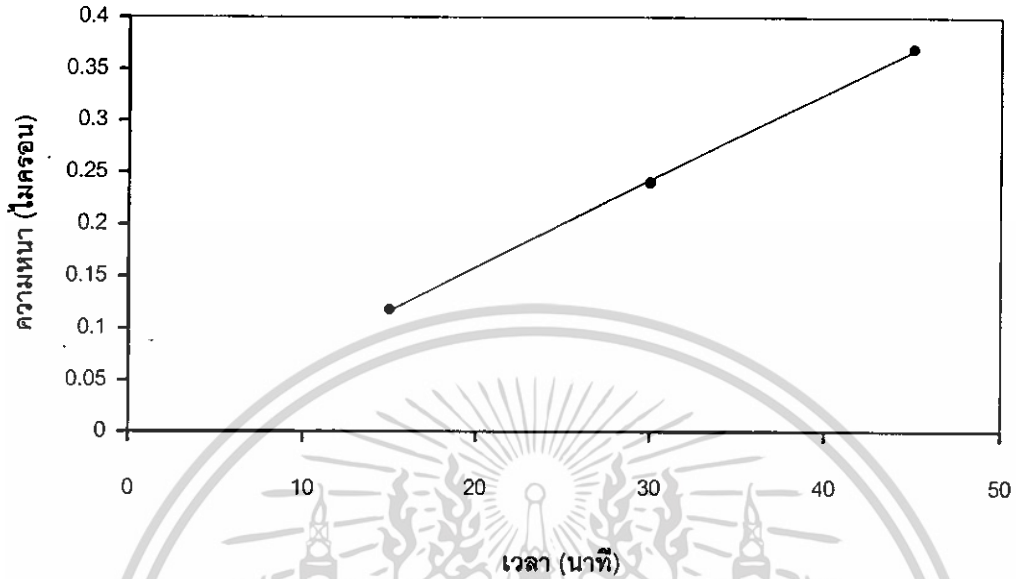
รูปที่ 3.6 (ต่อ)

เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ พบว่าค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของฐานรอง (ฮาโนค) คือ ถ้าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีค่าสูง เมื่อใช้อุณหภูมิของฐานรองต่ำและจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฐานรอง โดยค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่อุณหภูมิของฐานรอง 25 องศาเซลเซียสมีค่าอยู่ในช่วง $10^8 - 10^9$ โอห์ม ที่อุณหภูมิของฐานรอง 50 องศาเซลเซียสค่าความต้านทานมีค่า $5 \times 10^7 - 4 \times 10^8$ โอห์ม และที่อุณหภูมิของฐานรอง 100 องศาเซลเซียสค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีค่า 400-800 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.6(ก) – 3.6(ค) โดยแกนตั้งของกราฟเป็นค่าความต้านทานของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่วัดได้และแกนนอนเป็นตำแหน่งของโพรบที่วัดค่าความต้านทานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการอาร์เอฟ ไดโอดสปัตเตอร์ริงตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยมีอุณหภูมิของฐานรองเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าความต้านทานฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่วัดได้เมื่ออุณหภูมิของฐานรองเท่ากับ 25 องศาเซลเซียสมีค่าสูงเหมาะต่อการนำมาใช้งานเป็นชั้นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

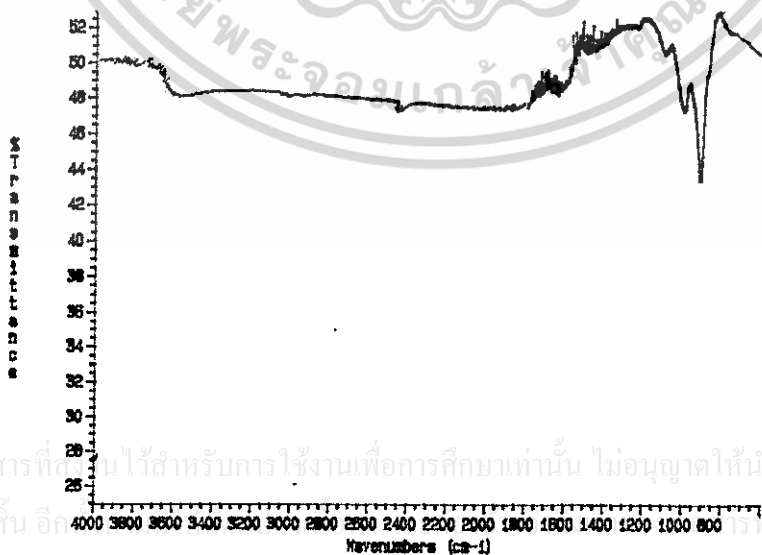
จากการสปีดเตอร์ริงฟิล์มบางพบว่าความหนาของการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะขึ้นอยู่กับเวลาในการสปีดเตอร์ ซึ่งอัตราการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แสดงได้ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์กับเวลาในการสปีดเตอร์ริง

จากความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 3.7 พบว่าอัตราการสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ตามเงื่อนไขที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นมีค่าประมาณ 80 อังสตรอมต่อนาที ($\text{\AA}/\text{min}$)

เมื่อนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไปทำการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเครื่อง อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 3.8

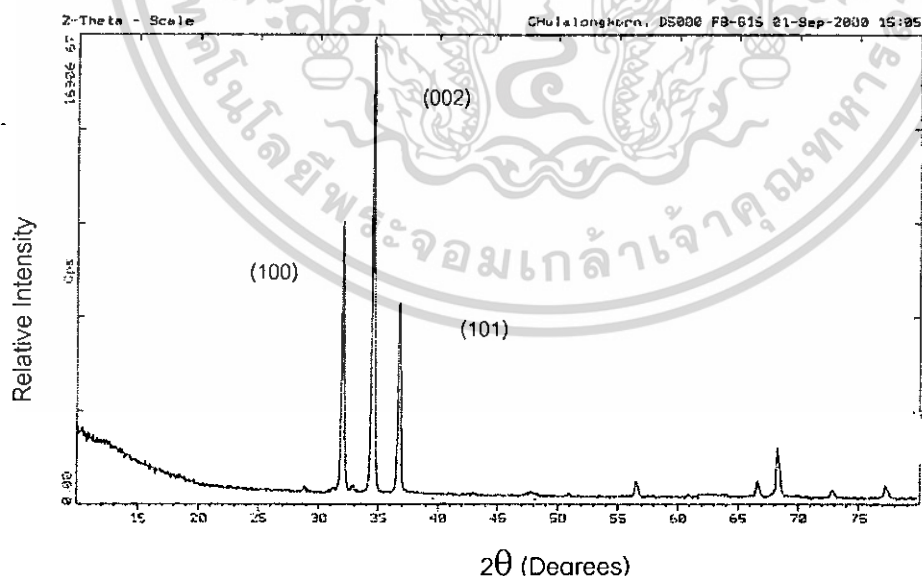


รูปที่ 3.8 กราฟ IR Spectroscopy ของซิงค์ออกไซด์ที่สร้างจากการสปีดเตอร์ริงแบบอาร์เอฟไดโอด

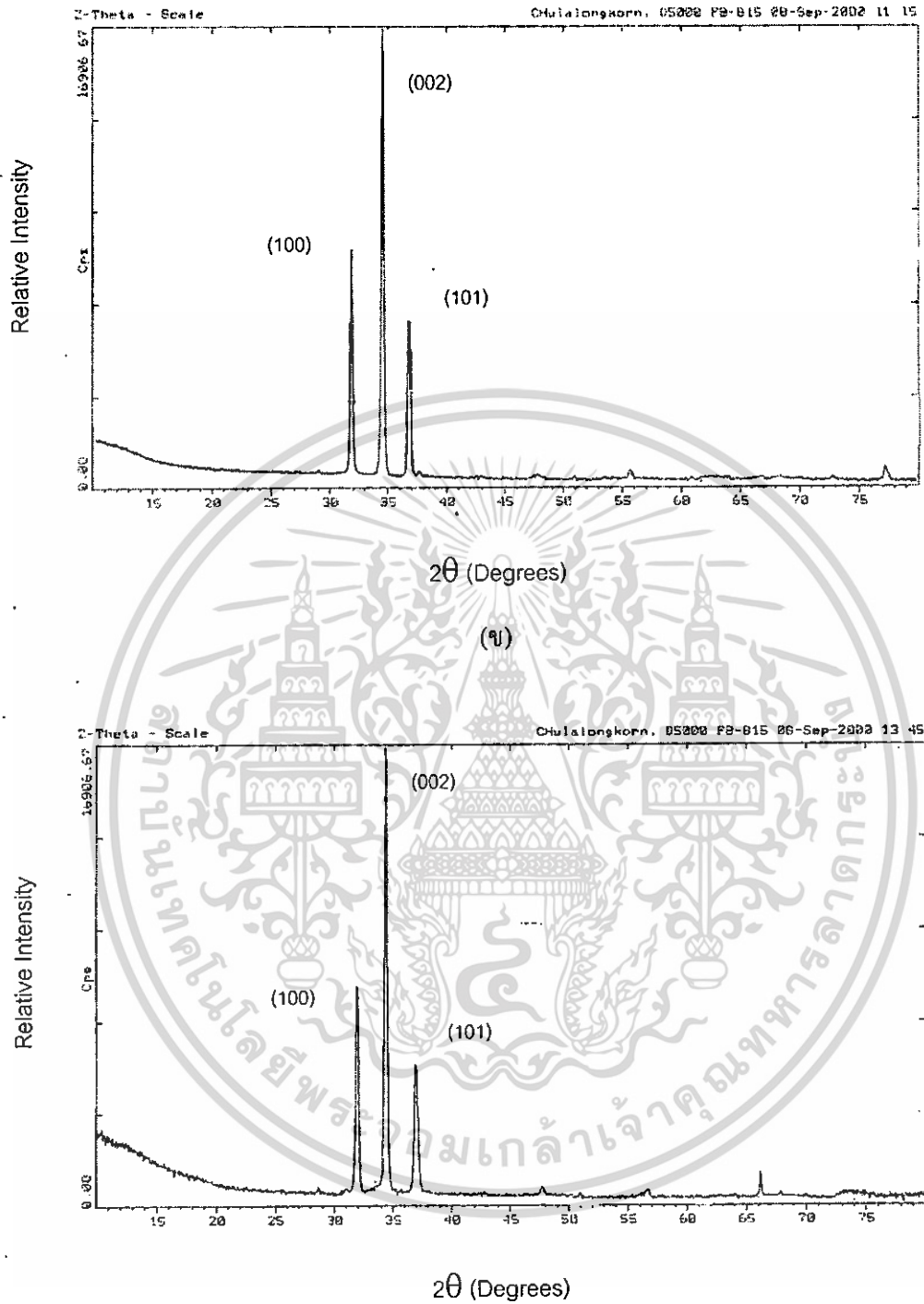
จากกราฟที่ได้พบว่า มีจุดต่ำสุดของการทรานสมิต (Transmittance) ที่เวฟนัมเบอร์ (Wavenumbers) 900 cm^{-1} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเวฟนัมเบอร์ของซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าอยู่ในช่วง $800\text{--}970\text{ cm}^{-1}$ [14][15] ดังนั้นฟิล์มบางที่สร้างด้วยวิธีสปีดเตอร์ริงแบบ อาร์เอฟ ไดโอด ตามเงื่อนไขที่กำหนดจะให้ฟิล์มบางที่เป็นซิงค์ออกไซด์

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผิวหน้าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่ามีความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่ง 2θ หลายตำแหน่ง โดยมีลักษณะกราฟของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างด้วยระยะเวลาสปีดเตอร์ริง 15, 30 และ 45 นาทีดังแสดงในรูปที่ 3.9(ก) ถึง 3.9(ค) ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่สร้างได้ภายในเงื่อนไขในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะให้ฟิล์มแบบผลึกหลายรูปหรือโพลีคริสตอล (Polycrystalline) ซึ่งจะมีสภาพความต้านทานสูงกว่าฟิล์มแบบผลึกเดี่ยว (single crystal) โดยมีระนาบ (002), (100) และ (101) ในองค์ประกอบของผลึกแบบโพลีคริสตอลซิงค์ออกไซด์ [6] และมีขนาดความเข้มของยอดสัญญาณที่ต่างกัน คือ เมื่อสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะมีระนาบ (002) ในองค์ประกอบของผลึกแบบโพลีคริสตอลซิงค์ออกไซด์มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันระนาบ (100) และ (101) ในองค์ประกอบของผลึกจะมีลดน้อยลง

- มุม 31.96° ตรงกับระนาบ (100)
- มุม 34.68° ตรงกับระนาบ (002)
- มุม 36.48° ตรงกับระนาบ (101)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (ก) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่า **รูปที่ 3.9** ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง ZnO ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (ก) ระยะเวลาการสปีดเตอร์ริง 15 นาที (ข) ระยะเวลาการสปีดเตอร์ริง 30 นาที (ค) ระยะเวลาการสปีดเตอร์ริง 45 นาที



(ค)

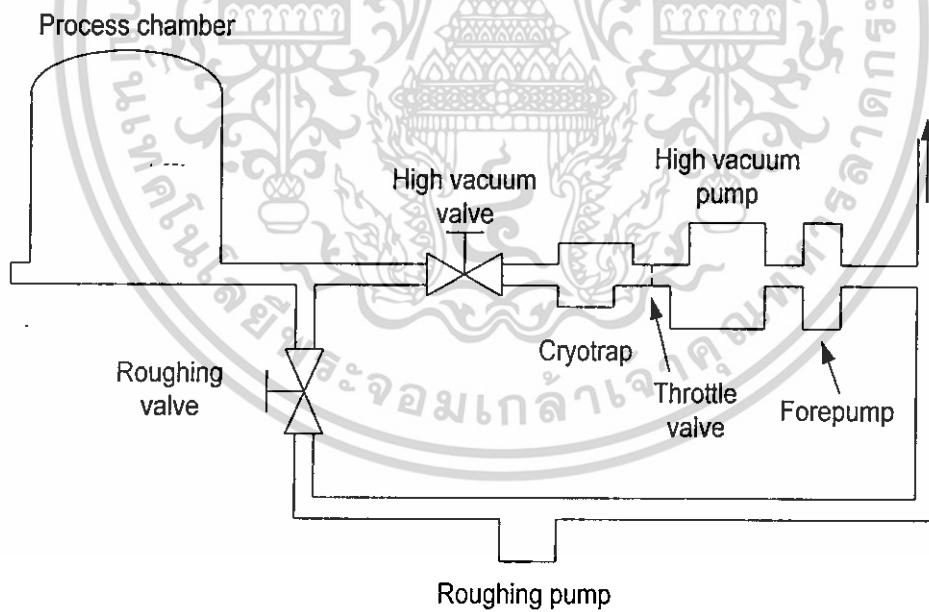
รูปที่ 3.9 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (Metalization)

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะบนสารกึ่งตัวนำ สามารถสร้างได้โดยการเคลือบฟิล์มบาง (Thin-film depositon) ของโลหะที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เช่น อะลูมิเนียม (Al) ให้มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำไปกัดเป็นลวดลายตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี จากนั้นจึงนำมาซินเตอร์ริง (Sintering) ในบรรยากาศไนโตรเจน เพื่อให้บริเวณรอยสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) มีความต้านทานต่ำ

การเคลือบโลหะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการเคลือบไอระเหยแบบขดลวด (Filament Evaporate) ซึ่งระบบเครื่องมือเคลือบไอระเหยแสดงดังรูปที่ 3.10 แผ่นผลึกที่ต้องการเคลือบโลหะจะวางอยู่ในแชมเบอร์ที่เป็นสุญญากาศ โดยมีเครื่องสูบบแบบโรตารี (Rotary pump) ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากแชมเบอร์จนได้ความดันมีค่าประมาณ 10^{-3} Torr จากนั้นเครื่องสูบบแบบดิฟฟิวชัน (Diffusion pump) จะทำการดึงความดันให้ต่ำลงอีกจนอยู่ในระดับ 10^{-5} - 10^{-7} Torr โลหะที่ต้องการทำการเคลือบจะถูกวางอยู่บนไส้ขดลวด (ปรกติมักเป็นทังสเตน) ซึ่งแผ่นผลึกที่ต้องการเคลือบโลหะจะวางอยู่ในแชมเบอร์ หลังจากดึงความดันลงจนถึงระดับ $< 10^{-5}$ Torr แล้ว จะจ่ายกระแสไหลผ่านขดลวดเพื่อให้โลหะที่แขวนอยู่ร้อนจนหลอมละลายและระเหยเคลือบบนแผ่นผลึก



รูปที่ 3.10 ระบบการเคลือบโลหะแบบไอระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นหรือพี

- ขั้นที่ 1 เลือกแผ่นฐานรองซิลิกอนผลึกรูปเดี่ยว (Single crystal) ขนาดพิถีความต้านทานที่เหมาะสม ระบายของผลึกคือ (100) ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกรดไนตริกเพื่อกำจัดโลหะที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกออก จากนั้นทำการละลายไขมันต่าง ๆ ด้วยน้ำยาไตรคลอโรเอธิลีนและทำการล้างน้ำยาไตรคลอโรเอธิลีนด้วยน้ำยาอะซิโตนและน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออน
- ขั้นที่ 2 ทำการสร้างชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อปกคลุมผิวของแผ่นผลึกทั้งหมดให้ได้ค่าความหนาของชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการออกซิเดชัน
- ขั้นที่ 3 เปิดชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ออกด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างชั้นไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนออกไซด์ด้วยกระบวนการอาร์เอฟ ไดโอด สปีดเตอร์ริง ตามเงื่อนไขหัวข้อ 3.1.4
- ขั้นที่ 4 เคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ แล้วทำการซินเตอร์ริง ในบรรยากาศไนโตรเจนเพื่อให้บริเวณรอยสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

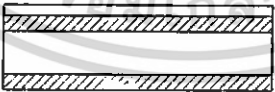
แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น



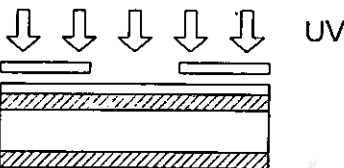
สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์



เคลือบน้ำยาไวแสง

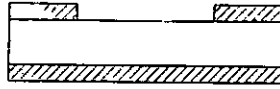


โฟโตลิโทกราฟี

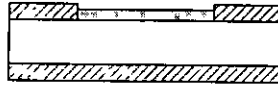


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ารูปที่ 3.11 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำ
ซิลิกอนชนิดเอ็นหรือพี

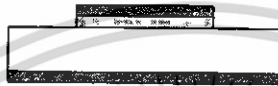
เปิดช่องซิกอนไดออกไซด์



สร้าง ZnO ด้วยกระบวนการสปีดเตอร์ริง



เคลือบโลหะอลูมิเนียม



รูปที่ 3.11 (ต่อ)

3.1.7 กระบวนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ

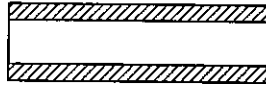
- ขั้นที่ 1 เลือกแผ่นฐานรองซิลิกอนผลึกรูปเดี่ยว (Single crystal) ขนาดพิถีความต้านทานที่เหมาะสม ระบายของผลึกคือ (100) ทำความสะอาดผิวหน้าด้วยกรดไนตริกเพื่อกำจัดโลหะที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกออก จากนั้นทำการละลายไขมันต่าง ๆ ด้วยน้ำยาไตรคลอโรเอธิลีนและทำการล้างน้ำยาไตรคลอโรเอธิลีนด้วยน้ำยาอะซิโตนและน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีไอออน
- ขั้นที่ 2 ทำการสร้างชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อปกคลุมผิวของแผ่นผลึกทั้งหมดให้ได้ค่าความหนาของชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการออกซิเดชัน
- ขั้นที่ 3 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ด้านตรงกันข้ามกับผิวหน้า แล้วทำการเคลือบโลหะทองคำด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ จากนั้นทำการขั้วลึงทองคำที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 90 นาที
- ขั้นที่ 4 ทำการเปิดชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อทำการสร้างชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการอาร์เอฟ ไดโอด สปีดเตอร์ริง ตามเงื่อนไขในหัวข้อ 3.1.4
- ขั้นที่ 5 เคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ แล้วทำการซินเตอร์ริงในบรรยากาศไนโตรเจนเพื่อให้บริเวณรอยสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น



สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์



เคลือบโลหะทองคำ



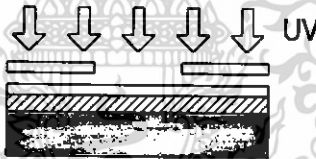
จับลึกลง



เคลือบน้ำยาไวแสง



โฟโตลิโทกราฟี



เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์



สร้าง ZnO ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง



เคลือบโลหะอลูมิเนียม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกหนึ่งขั้นทำให้ค้นพบตัวเองและต้องทำเองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ที่ฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำ

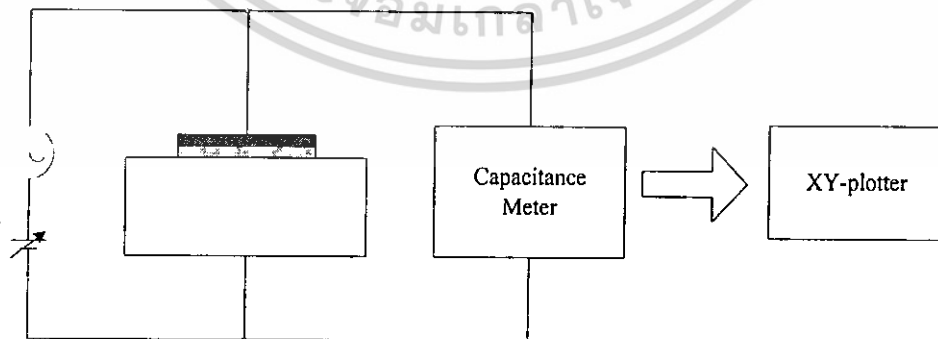
ซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ

3.2 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS

วิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการประเมินคุณสมบัติที่ผิวรอยต่อของโครงสร้างตัวเก็บประจุ MOS คือ การวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V Characteristics) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำของ Hewlett Packard รุ่น HP 4061A Semiconductor/Component Test System แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งมีวงจรสมมูลการวัดดังรูปที่ 3.14 โดยการทดสอบจะทำการกำหนดให้เครื่องจ่ายแรงดันค่าต่าง ๆ แก่ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS แล้วบันทึกค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันค่าต่าง ๆ

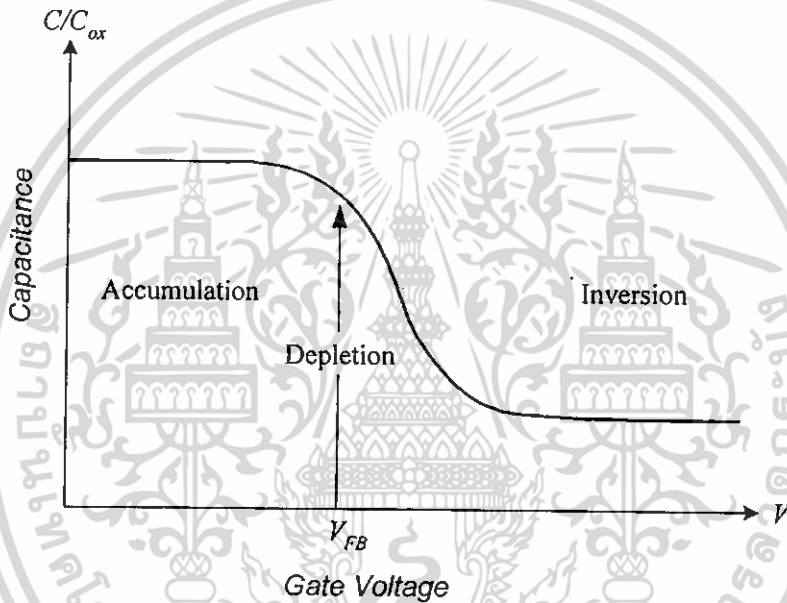


รูปที่ 3.13 เครื่องมือทดสอบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของ Hewlett Packard รุ่น 4061A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลในการวัดค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าในโครงสร้าง MOS

รูปกราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน จะมีรูปร่างดังกราฟในรูปที่ 3.15 ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดในกราฟเทียบได้กับแรงดันที่ทำให้เกิดการสะสมที่ผิวหน้า (Surface Accumulation) ซึ่งอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นไดอิเล็กตริกกับสารกึ่งตัวนำ และสิ่งที่วัดได้คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นไดอิเล็กตริก สำหรับค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุดมีผลมาจากกรณีเกิดการผันกลับ และมีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นไดอิเล็กตริกต่ออนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นปลอดพาหะเมื่อแรงดันการผันกลับที่ผิวหน้าเป็น $2\phi_F/q$ (เท่ากับ ϕ_F/q เมื่อฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของคาร์บอนอย่างเหมาะสม)



รูปที่ 3.15 กราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS

เมื่อเครื่องทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าแล้วจะแสดงผลค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ต่อค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์ (C_{ox}) และคำนวณค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ คือ

(ก) ค่าความหนาแน่นของประจุบริเวณฐานรอง (N_{sub})

$$N_{sub} = \frac{4\phi_F}{q\epsilon_0\epsilon_{Si}} \left(\frac{C_{smin}}{A} \right)^2 \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
โดย ϕ_F คือ ค่าพลังงานเฟอร์มิของแผ่นฐานรองมีค่า

$$\phi_F = \pm \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{sub}}{n_i}$$

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (1.602×10^{-19} Coulombs)

ϵ_{Si} คือ ค่าสภาพยอมของซิลิกอน ($11.7 \epsilon_0$)

C_{smin} คือ ค่าความจุไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำต่ำสุด มีค่า

$$C_{smin} = \frac{C_{min} \cdot C_{ox}}{C_{ox} - C_{min}}$$

A คือ ค่าพื้นที่ของตัวเก็บประจุ

k คือ ค่าคงที่ของ โบสมานต์ (1.38×10^{-23} J/K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

n_i คือ ค่าความหนาแน่นประจุของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ มีค่า

$$n_i = 3.9 \times 10^{16} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{1.21q}{2kT}\right)$$

(ข) ค่าความจุไฟฟ้าของแถบราบ (Flat Band Capacitance, C_{FB})

$$C_{FB} = \frac{C_{ox} \cdot C_{sFB}}{C_{ox} + C_{sFB}} \quad (3.5)$$

โดยที่ C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์

C_{sFB} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของช่วงปลอดพาหะขณะแถบราบ มีค่า

$$C_{sFB} = \frac{\sqrt{2A\epsilon_{Si}}}{L_D}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาดังกล่าวอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ L_D คือ ค่าความยาวเดอบายด์ (Debye Length)

(ค) ค่าแรงดันพลังงานแถบราบ (Flat Band Voltage, V_{FB})

ค่าแรงดันพลังงานแถบราบ คือ ค่าแรงดันที่จ่ายให้แก่ตัวเก็บประจุแล้วให้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าแถบราบ (C_{FB})

(ง) ค่าประจุที่ผิว (Surface charge, Q_{ss})

$$\frac{Q_{ss}}{q} = \frac{C_{ox}}{A \cdot q} (\Phi_m - \Phi_s - V_{FB}) \quad (3.6)$$

โดยที่ Φ_m คือ ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ

Φ_s คือ ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

(จ) ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold Voltage, V_T)

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F - \frac{A \cdot Q_b}{C_{ox}} \quad (3.7)$$

โดยที่ Q_b คือ ค่าประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ มีค่า

$$Q_b = \pm \frac{N_{sub} \cdot q \cdot \epsilon_{Si}}{C_s \text{ min}}$$

ค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดจะแสดงบนกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน ซึ่งจะทำการวัดตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างบนฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนระนาบ <100> ชนิดเอ็น, ชนิดพี และสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ โดยมีความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 500 Å, 1000 Å และ 1500 Å ตามลำดับ ตัวอย่างผลการทดลองค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ได้จากกระบวนการสร้างตามเงื่อนไข ข้างต้นที่ความถี่ 10 kHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.16 ถึง 3.24

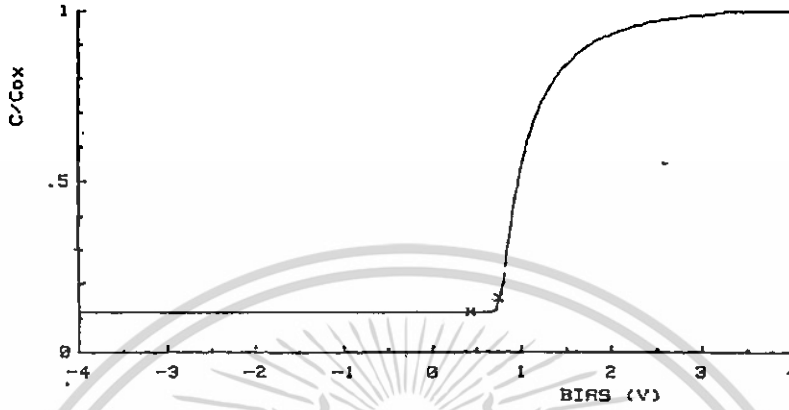
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF N-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.60E-04cm2 Dox= 500Å
 Cox= 22.50pF Vth= .4079V
 Cfb= 2.56pF Vfb= .72V
 Nsub= 5.0E+15/cm3 Qss/q= 2.0E+11/cm2



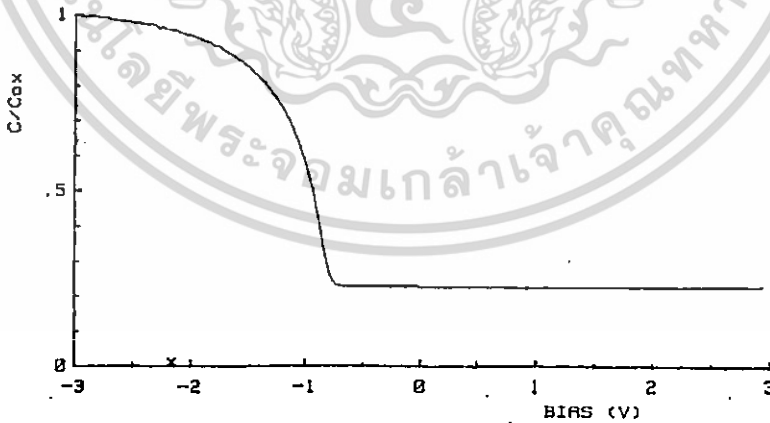
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 Å

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF P-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.60E-04cm2 Dox= 500Å
 Cox= 21.60pF Vth= -0.76V
 Cfb= 3.99pF Vfb= -0.56V
 Nsub= 3.0E+16/cm3 Qss/q= 1.2E+10/cm2



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น

สารกึ่งตัวนำชนิดพี, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 Å

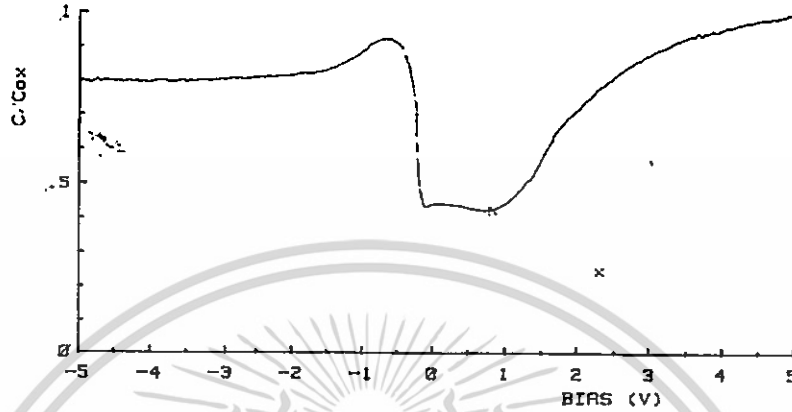
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF I-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.60E-04cm² Dox= 500Å
 Cox= 22.62pF Vth= .868V
 Cfb= 6.40pF Vfb= 2.3V
 Nsub= 2.0E+11/cm³ Qss/qf= 8.1E+10/cm²



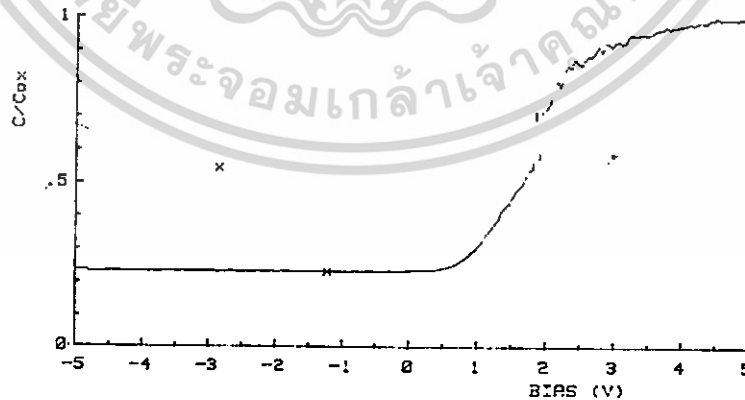
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมของคาร์บอน, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 Å

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF N-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.60E-04cm² Dox= 1000Å
 Cox= 10.58pF Vth= -1.223V
 Cfb= 3.15pF Vfb= -2.85V
 Nsub= 3.0E+15/cm³ Qss/qf= 3.0E+11/cm²



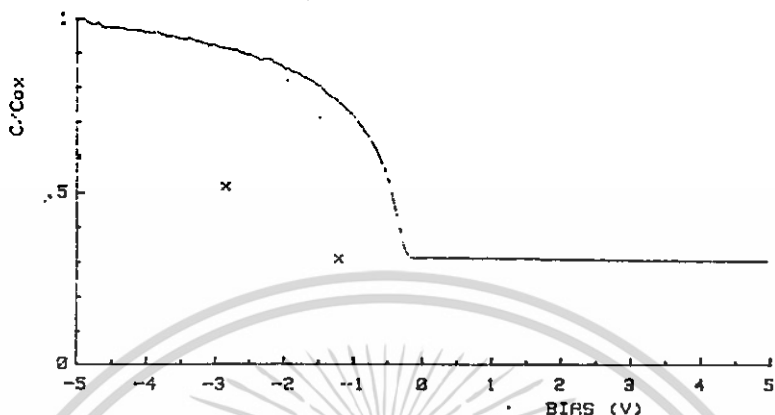
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ารูปที่ 3.19 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1000 Å

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF P-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.60E-04cm² Dox= 1000Å
 Cox= 10.86pF Vth= -1.223V
 Cfb= 3.15pF Vfb= -2.85V
 Nsub= 1.5E+16/cm³ Qss/q= 3.8E+11/cm²



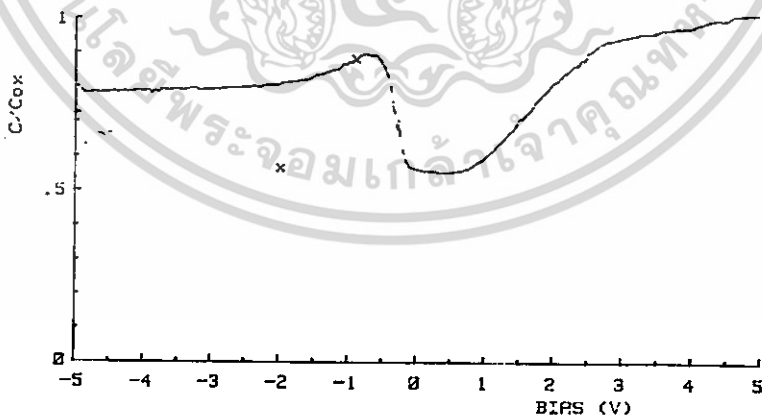
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1000 Å

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF I-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.60E-04cm² Dox= 1000Å
 Cox= 11.45pF Vth= -1.962V
 Cfb= 6.42pF Vfb= -.85V
 Nsub= 6.8E+18/cm³ Qss/q= 1.4E+10/cm²



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และวิศวกรรมไฟฟ้าของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ผู้จัดทำมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

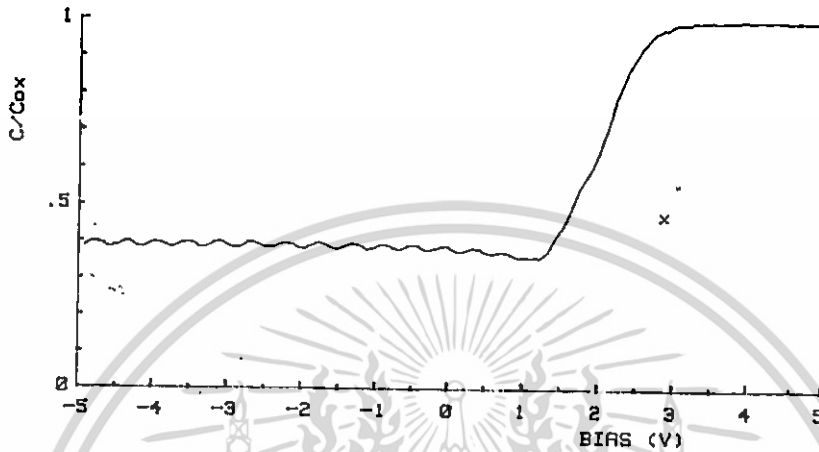
1000 Å

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF N-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 4.80E-04cm² Dox= 1500Å
 Cox= 21.81pF Vth= 2.922V
 Cfb= 7.4dpF Vfb= 1.15V
 Nsub= 3.0E+15/cm³ Qss/q= 2.3E+10/cm²



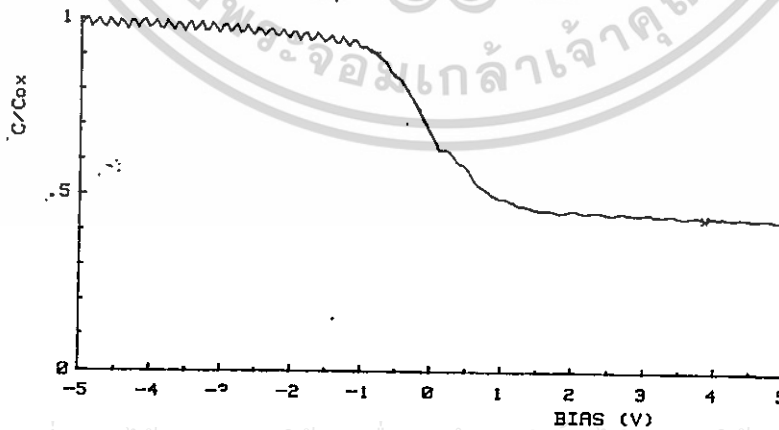
รูปที่ 3.22 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 Å

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF P-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 4.80E-04cm² Dox= 1500Å
 Cox= 22.42pF Vth= 3.922V
 Cfb= 9.48pF Vfb= -2.15V
 Nsub= 1.3E+15/cm³ Qss/q= 2.3E+10/cm²



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 Å

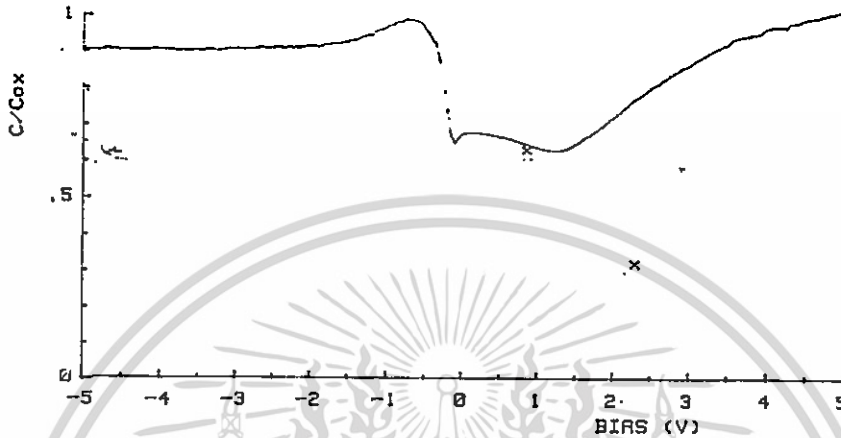
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

C-V CHARACTERISTICS

HP 4261A

SAMPLE= ZnO CAPACITOR OF I-SUB

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 4.80E-04cm2 Dox= 1500Å
 Cox= 22.03pF Vth= .868V
 Cfb= 18.40pF Vfb= 2.3V
 Nsub= 5.0E+18/cm3 Qss/q= 8.1E+10/cm2



รูปที่ 3.24 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 Å

ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 3.16 ถึง 3.24 เป็นกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ความถี่ 10 kHz ของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ซึ่งสร้างด้วยสารโคอีเล็กทริกซิงค์ออกไซด์ ในช่วงการผันกลับของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างบนแผ่นฐานรองซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี ประจุพาหะส่วนน้อยไม่สามารถตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟสลับได้ทัน กราฟที่ได้จึงมีลักษณะเหมือนกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ทั่วไป แต่ในผลการทดลองบางส่วนนั้นพบว่าค่าความจุไฟฟ้าในช่วงการสะสมประจุมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออ่าขนาดของแรงดันเพิ่มมากขึ้นซึ่งแตกต่างจากตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์จะมีค่าความจุไฟฟ้าคงที่ในสภาวะการสะสมประจุ อาจเนื่องจากผลของโคโพลภายในเนื้อสารซิงค์ออกไซด์ทำให้เกิดตัวเก็บประจุภายในตัวเนื้อสารซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้ารวมของโครงสร้างทำให้มีค่าไม่คงที่

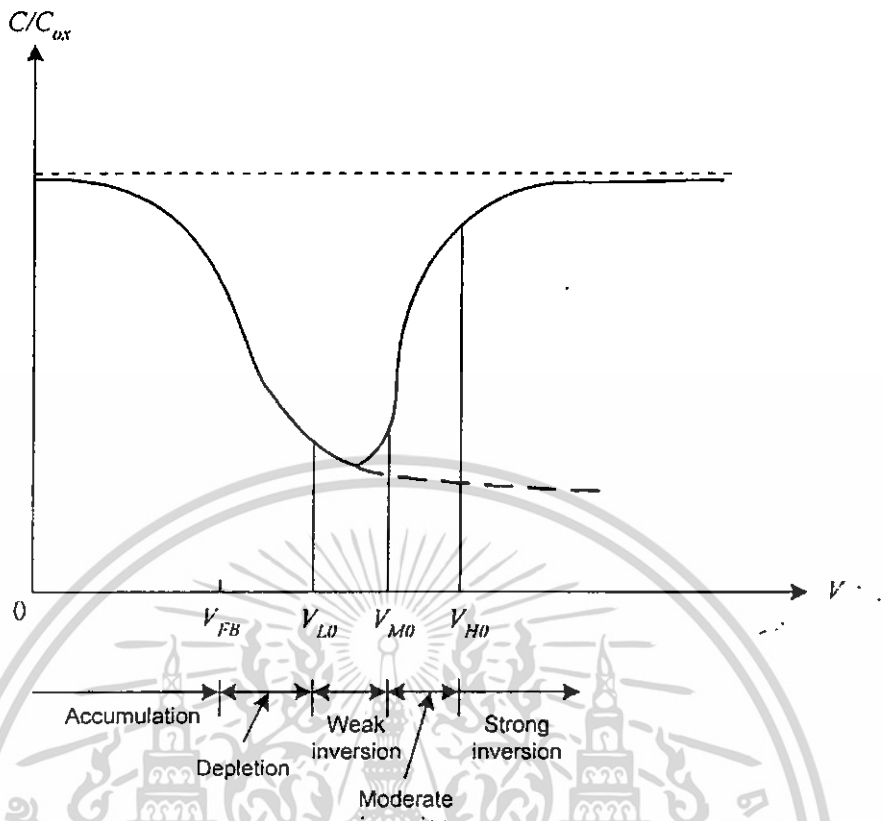
ถ้าหากกราฟของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างบนแผ่นฐานรองซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำจะมีลักษณะแตกต่างออกไป ลักษณะของกราฟในรูปที่ 3.18, 3.21 และรูปที่ 3.24 แสดงให้เห็นว่าประจุพาหะส่วนน้อยของแผ่นฐานรองสามารถตอบสนองต่อสัญญาณแรงดันไฟสลับได้ทัน ค่าความจุไฟฟ้ารวมในช่วงการผันกลับจึงมีค่าใกล้เคียงกับ

ค่าความจุไฟฟ้าของชั้น ไดอิเล็กทริกซึ่งคือออกไซด์ในช่วงการสะสมประจุ เนื่องจากผลของประจุบวกที่อยู่ในชั้นซึ่งคือออกไซด์ทำให้ส่งผลต่อประจุที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน นอกจากนี้ยังเกิดจากผลของอะตอมทองคำที่เติมลงในฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอน สารเจืออะตอมทองคำจะแพร่เข้าไปในฐานรองแบบเข้าไปแทรกตัวอยู่ในเนื้อสาร ดังนั้นอะตอมทองคำในเนื้อสารซิลิกอนจึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ หรือทำหน้าที่เสมือนเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของประจุพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ (ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล) มีผลทำให้ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยลดลง และส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าในช่วงการผันกลับ จากลักษณะกราฟที่ได้พบว่าขณะที่จ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากที่บริเวณรอยต่อระหว่างซึ่งคือออกไซด์และฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเกิดชั้นปลอดพาหะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุตัวหนึ่งต่ออนุกรม และเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้นค่าความจุไฟฟ้ารวมของโครงสร้างจึงมีค่าน้อยลง

ที่ความถี่ต่ำ ตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS จะอยู่ในสถานะสมดุลความร้อนภายใต้การกระตุ้นของสัญญาณไฟสลับขนาดเล็ก ซึ่งประจุพาหะส่วนน้อยสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟสลับได้ (ในทางปฏิบัติที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อระหว่างซิลิกอนและออกไซด์จะมีแทรปของอิเล็กตรอนและโฮลอยู่ รวมทั้งภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำด้วย ระบบซึ่งประกอบด้วยแทรปของอิเล็กตรอนและโฮลจะยังคงอยู่ในสถานะสมดุลความร้อน ถ้าแทรปเหล่านี้สามารถตอบสนองต่อแรงดันไฟสลับได้ในทันที)[16]

จากรูปที่ 3.25 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันค่าต่าง ๆ ที่ความถี่ต่ำของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ซึ่งมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี พิจารณาขณะที่โครงสร้างถูกไบอัสด้วยแรงดันลบ ระบบจะเข้าสู่สถานะการขุ่นมัว โดยแรงดันลบที่ขั้วโลหะจะเหนี่ยวนำประจุโฮลมาสะสมที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ และเมื่อขนาดของแรงดันลบมากขึ้นความหนาแน่นของประจุโฮลที่บริเวณผิวหน้าจะมากกว่าความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสาร ซึ่งความหนาแน่นของประจุโฮลที่มากขึ้นนี้จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ (C_s) มีค่ามากด้วย เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน C_s ต่ออนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าของออกไซด์ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ ขณะที่แรงดันซึ่งป้อนให้แก่โครงสร้างมีค่าเป็นลบน้อยลง ความหนาแน่นของประจุโฮลที่บริเวณผิวหน้าจะลดลงส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลงด้วย ค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์ และเมื่อแรงดันมีค่าเป็นลบลดลงจนมีค่าเท่ากับค่าแรงดัน V_{FB} จะทำให้แถบพลังงานของโครงสร้างอยู่ในสถานะพลังงานแถบราบ

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 คุณลักษณะค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS (เส้นทึบเป็นพฤติกรรมที่ความถี่ต่ำ และเส้นประเป็นพฤติกรรมที่ความถี่สูง)

เมื่อที่ขั้วโลหะมีแรงดันเป็นบวก โพลจะถูกผลักออกจากผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดชั้นปลอดพาหะของอะตอมผู้รับไอออน ซึ่งในสภาวะนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ปลอดพาหะ และเมื่อแรงดันมีค่าบวกมากขึ้น ชั้นปลอดพาหะจะกว้างขึ้นทำให้ C_s มีค่าลดลง ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าลดลง ขณะที่ความหนาแน่นของประจุโฮลที่บริเวณผิวหน้าลดลงเนื่องจากแรงดันบวกที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณผิวหน้ามีค่าเท่ากับความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ($p_s = n_s = n_i$) ระบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะผันกลับ (onset of inversion) และเมื่อแรงดันมีค่าบวกมากขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิวหน้ามากกว่าความหนาแน่นของโฮลเกิดขึ้นผันกลับของอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ (เนื่องจากที่ความถี่ต่ำ ประจุพาหะส่วนน้อยสามารถตอบสนองต่อสัญญาณไฟสลับได้ทัน) ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นผันกลับมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์มาก ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้ารวมจึงมีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นออกไซด์

ในการพิจารณาตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS สามารถแบ่งช่วงการผันกลับออกได้เป็นสามช่วง เพื่อสะดวกในการวิเคราะห์คุณสมบัติที่แตกต่างกันในช่วงต่าง ๆ คือ ช่วงการผันกลับแบบอ่อน (weak inversion), ช่วงการผันกลับแบบปานกลาง (moderate inversion) และ ช่วงการผันกลับอย่างรุนแรง (strong inversion)

ช่วงการผันกลับแบบอ่อน เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนมีปริมาณเท่ากับความหนาแน่นของพาหะส่วนมากที่บริเวณผิวหน้า หรือ $\phi_s = \phi_f$ และจะเริ่มเข้าสู่สภาวะผันกลับอย่างปานกลาง เมื่อความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำมีปริมาณเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือไอออน โดย $\phi_s = 2\phi_f$ ในการทำงานเข้าสู่สภาวะการผันกลับอย่างรุนแรงของตัวเก็บประจุ MOS จะเกิดขึ้นผันกลับที่ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยมีความสัมพันธ์กับค่าศักดาที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ โดยค่าศักดาที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าสูงกว่าช่วงการผันกลับแบบปานกลางประมาณ $6 \frac{kT}{q}$

$$\text{หรือ } \phi_s = 2\phi_f + 6 \frac{kT}{q} \quad [17]$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน สามารถพิจารณาจุดเริ่มของสภาวะการผันกลับแบบอ่อน, การผันกลับแบบปานกลาง และช่วงการผันกลับอย่างรุนแรง ในพจน์ของแรงดันได้เป็น V_{LO} , V_{MO} และ V_{HO} โดยที่

$$V_{LO} = V_{FB} + \phi_f + \gamma \sqrt{\phi_f} \quad \dots \quad (3.8)$$

$$V_{MO} = V_{FB} + 2\phi_f + \gamma \sqrt{2\phi_f} \quad (3.9)$$

โดย
$$\phi_f = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{sub}}{n_i}$$

และค่าแรงดัน V_{HO} สามารถหาได้จาก

$$V_{HO} = V_{MO} + V_{ZO} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จากสมการ (3.8) ถึงสมการ (3.10) พบว่าขึ้นอยู่กับพจน์ของค่าแรงดันแถบราบ V_{FB} ซึ่งค่าแรงดันแถบราบนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของฟังก์ชันงานและผลกระทบของประจุของชั้นออกไซด์สามารถหาได้จาก

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_0}{C_{ZnO}} \quad (3.11)$$

โดย Q_0' คือ ค่าประจุที่อยู่บริเวณผิวหน้ารอยต่อสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและชั้นออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อแถบพลังงาน ประกอบไปด้วย

- 1) ประจุที่ไม่เคลื่อนที่ในออกไซด์ (Fixed oxide charge) Q_f เกิดจากการสร้างพันธะที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างชั้นออกไซด์และสารกึ่งตัวนำซิลิกอน
- 2) ประจุที่จับประจุในออกไซด์ (Oxide trapped charge) Q_{ot} เป็นประจุที่อยู่บริเวณใกล้ผิวหน้ารอยต่อของสารกึ่งตัวนำและออกไซด์ เกิดจากความไม่สมบูรณ์ภายในชั้นออกไซด์
- 3) ประจุเคลื่อนที่ (Mobile ionic charge) Q_m เป็นประจุจากไอออนของสารอัลคาไลน์ (Alkali) โดยเฉพาะ ไอออนของโซเดียม (Na^+) (ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการ) ที่เกิดจากการผลิต เข้ามาในชั้นออกไซด์
- 4) ประจุที่จับประจุในช่วงรอยต่อ (Interface trapped charge) Q_{it} เป็นประจุที่อยู่บริเวณผิวหน้ารอยต่อของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนและชั้นออกไซด์ เกิดจากจุดเสียบที่บริเวณผิวของรอยต่อ

3.3 การศึกษาค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS

จากการทดลองวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน (CV Characteristics) สามารถนำกราฟคุณสมบัติที่ได้มาหาค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ (C_{ZnO}) และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (C_s) โดยค่าความจุไฟฟ้าของชั้นไดอิเล็กทริกซิงค์ออกไซด์จะหาได้จากค่าความจุไฟฟ้ารวมสูงสุดที่เกิดขณะโคงของตัวเก็บประจุเกิดสภาวะการสะสมประจุ และสำหรับค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นสามารถหาได้ในขณะที่ค่าความจุไฟฟ้ารวมในกราฟมีค่าต่ำสุด โดยขณะที่ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าต่ำสุด (C_{min}) นั้นจะเกิดในสภาวะที่โครงสร้างตัวเก็บประจุเข้าสู่สภาวะการผันกลับ ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าเนื่องจากการอนุกรมกันระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงจะมีค่า

$$C_s = \frac{C_{min} \cdot C_{ZnO}}{C_{ZnO} - C_{min}} \quad (3.12)$$

จากกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันในรูป 3.16 - 3.24 สามารถหาค่าความจุไฟฟ้าของชั้น ไดอิเล็กทริกซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, ชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ โดยมีความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 500 – 1500 อังสตรอม ได้ผลแสดงดังตาราง

ตารางที่ 3.1 ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS

| ชนิดของแผ่นฐานรอง | ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ (อังสตรอม) | ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่(nF/cm ²) | ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (nF/cm ²) |
|--|---------------------------------------|--|---|
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 500 | 140.63 | 19.18 |
| | 1000 | 66.13 | 19.72 |
| | 1500 | 45.44 | 19.47 |
| สารกึ่งตัวนำชนิดพี | 500 | 135 | 33.56 |
| | 1000 | 67.89 | 32 |
| | 1500 | 46.77 | 31.14 |
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ | 500 | 141.38 | 94.25 |
| | 1000 | 71.56 | 95.06 |
| | 1500 | 45.89 | 93.182 |

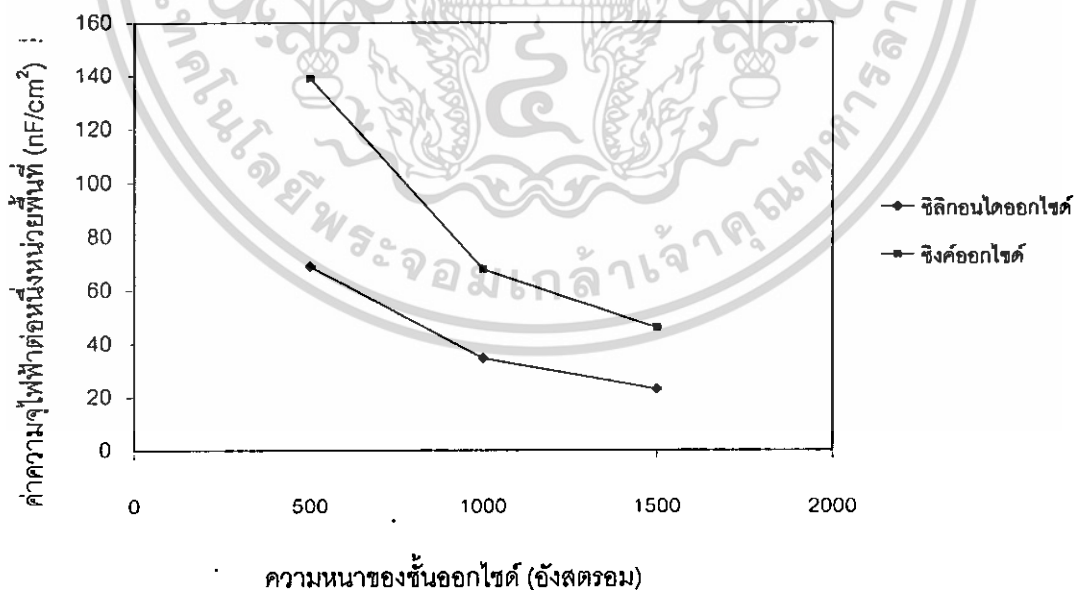
สำหรับค่าความจุไฟฟ้าชั้นออกไซด์ของตัวเก็บประจุ MOS ที่มีชั้นฉนวนเป็นซิลิกอนไดออกไซด์นั้นสามารถแสดงได้ดังตาราง 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

| ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (อังสตรอม) | ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (nF/cm^2) |
|--|--|
| 500 | 69.06 |
| 1000 | 34.53 |
| 1500 | 23.02 |

ผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 3.1 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์นั้นจะมีค่าขึ้นกับค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ โดยค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มมากขึ้น และค่าความจุไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับชนิดของแผ่นฐานรอง สำหรับค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นจะไม่ขึ้นกับความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ แต่จะขึ้นกับค่าความหนาแน่นของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และผลการทดลองในตารางที่ 3.1 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์นั้นจะมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอน ไดออกไซด์เมื่อตัวเก็บประจุมีความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริกเท่ากัน



รูปที่ 3.26 ค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชั้นซิงค์ออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ

3.4 การศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์ที่สร้างได้ในวิทยานิพนธ์นั้นสามารถคำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด (ในช่วงการสะสมประจุ) ของกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันดั่งสมการ

$$C_{ZnO} = \frac{\epsilon_{ZnO}}{T_{ZnO}} \quad (3.13)$$

จากผลการทดลองกราฟคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันในรูปที่ 3.16 - 3.24 นั้นสามารถหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์โดยอาศัยสมการ (3.13) แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์

| ชนิดของฐานรอง | ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ (อังสตรอม) | ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (nF/cm ²) | ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์ |
|--|---------------------------------------|---|-------------------------------------|
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น | 500 | 140.63 | 7.94 |
| | 1000 | 66.13 | 7.47 |
| | 1500 | 45.44 | 7.71 |
| สารกึ่งตัวนำชนิดพี | 500 | 135 | 7.62 |
| | 1000 | 67.89 | 7.66 |
| | 1500 | 46.77 | 7.9 |
| สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ | 500 | 141.38 | 7.98 |
| | 1000 | 71.56 | 8.07 |
| | 1500 | 45.89 | 7.78 |

สาร ไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์นั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมาตรฐานประมาณ 8.5 โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิงค์ออกไซด์ที่คำนวณได้ในวิทยานิพนธ์นี้มีค่าอยู่ในช่วง 7.5 - 8 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานแสดงว่าชั้น ไดอิเล็กตริกที่สร้างขึ้นนั้นเป็นสารซิงค์ออกไซด์

3.5 การศึกษาผลของรูปร่างต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS

เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของชั้นซิงค์ออกไซด์กับค่าความจุไฟฟ้า จึงได้ทำการออกแบบให้ขั้วโลหะมีลักษณะลวดลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน, หกเหลี่ยม และวงกลม

สำหรับกระบวนการสร้างเหมือนกับกระบวนการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่วไป ในหัวข้อที่ผ่านมา เนื่องจากสร้างบนแผ่นผลึกซิลิกอนเดียวกัน โดยในรูปที่ 3.27 เป็นภาพถ่ายด้านบนของตัวเก็บประจุ MOS ที่มีลวดลายแบบต่าง ๆ



(ก)

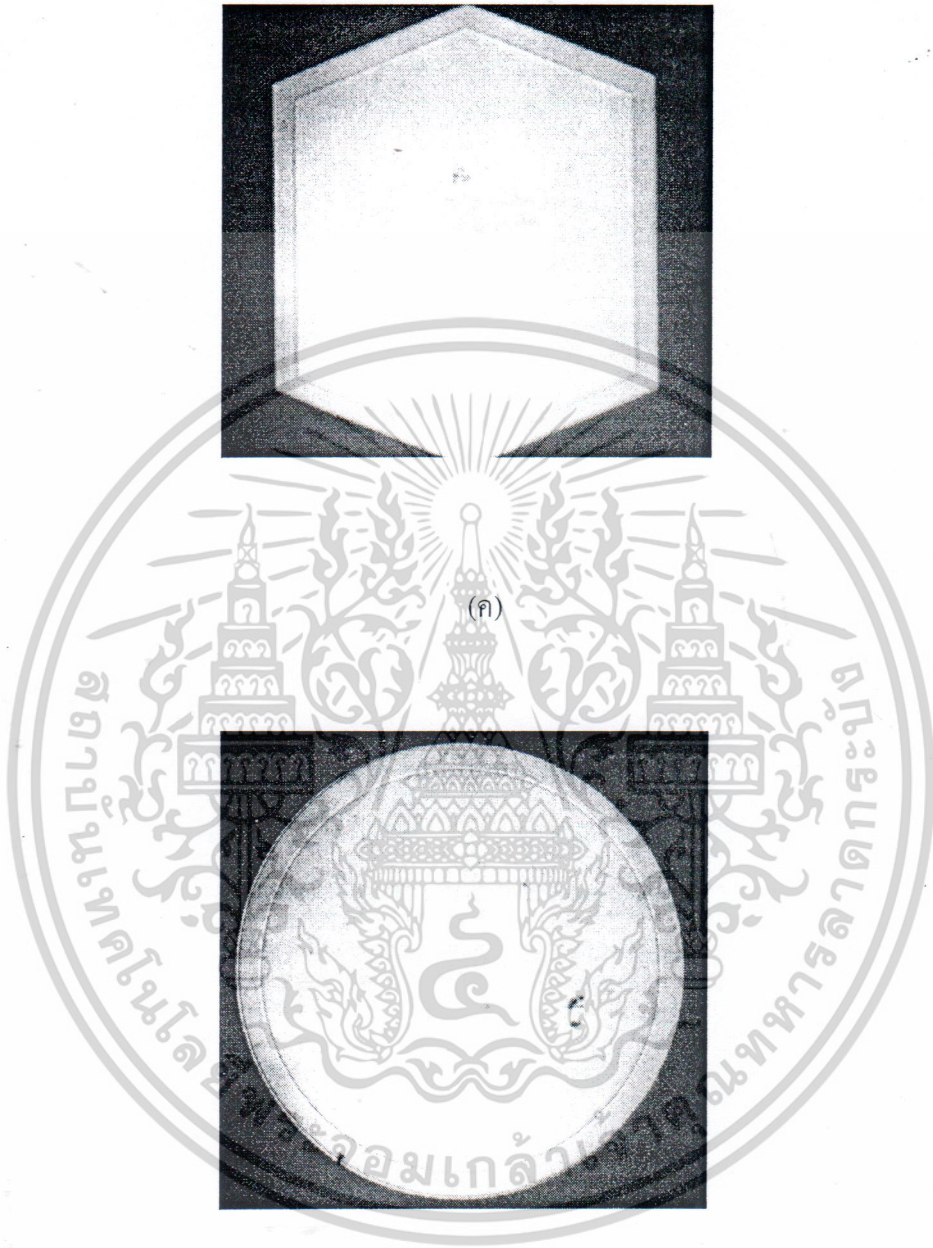


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.27 ภาพถ่ายด้านบนของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ที่ออกแบบเป็นลวดลายแบบต่าง ๆ

(ก) สี่เหลี่ยม (ข) สี่เหลี่ยมขอบมน (ค) หกเหลี่ยม (ง) วงกลม



(ง)

รูปที่ 3.27 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

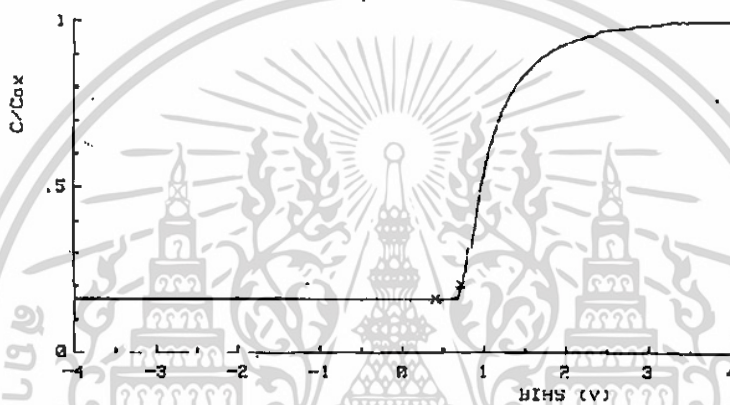
การทดลองได้นำตัวเก็บประจุที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือวัดคุณสมบัติของตัวเก็บประจุเหมือนกับหัวข้อ 3.2 โดยจะนำเสนอผลการทดลองตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมและวงกลมซึ่งสร้างบนแผ่นฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น สำหรับตัวเก็บประจุที่มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมขอบมนให้ผลการทดลองในลักษณะแนวโน้มนเดียวกัน ซึ่งมีผลการทดลองที่ได้ดังนี้ คือ

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= SQUARE ZnO CAPACITOR

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 1.00E-02cm² Dox= 520Å
 Cox= 999.50pF Vth= .4079V
 Cfb= 53.56pF Vfb= .72V
 Nsub= 5.0E+15/cm³ Qss/q= 4.0E+11/cm²



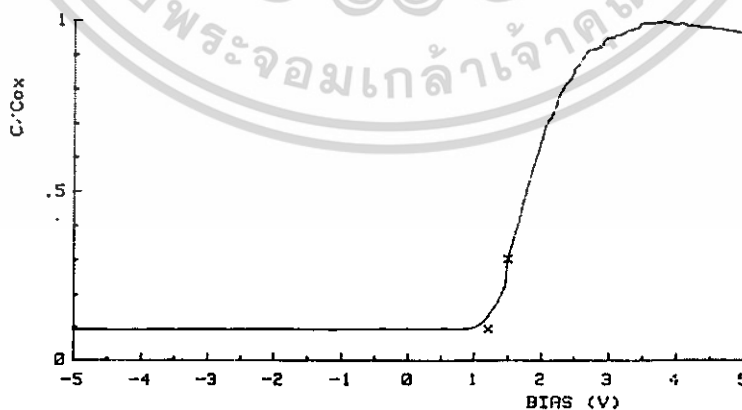
(ก)

C-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE= CIRCLE ZnO CAPACITOR

FREQ= 10kHz T= 300K
 AREA= 7.40E-03cm² Dox= 500Å
 Cox= 73.32pF Vth= 1.215V
 Cfb= 22.12pF Vfb= 1.5V
 Nsub= 2.8E+15/cm³ Qss/q= 6.5E+10/cm²

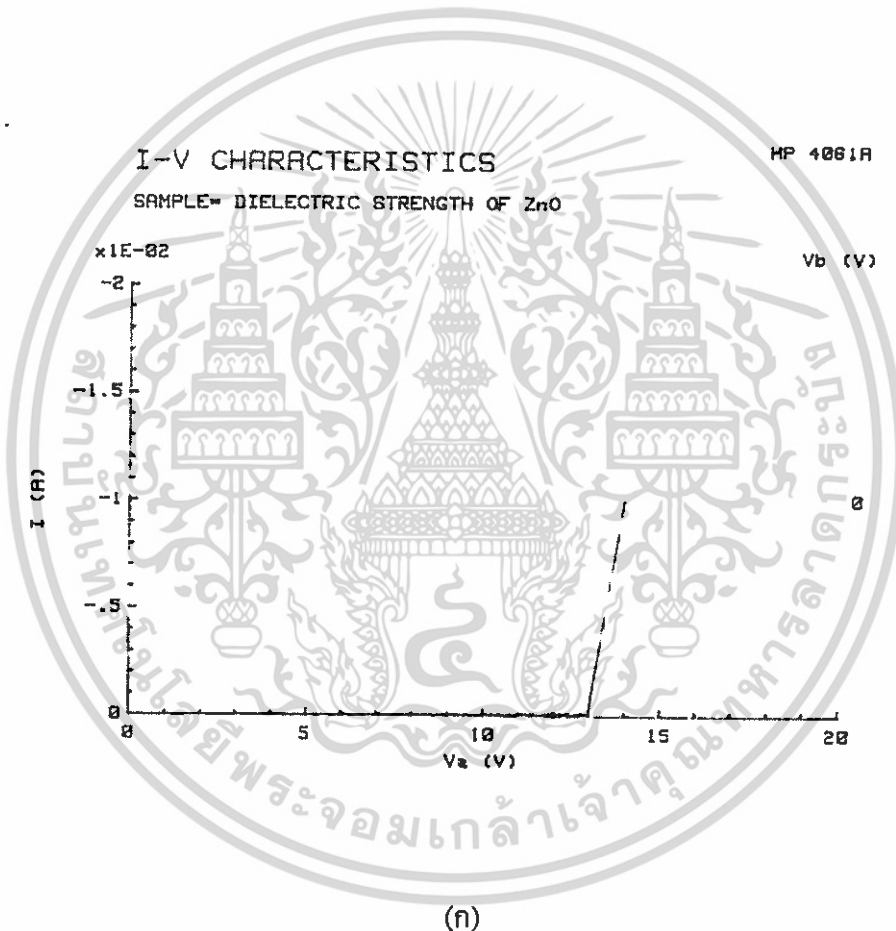


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (ข) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.28 ตัวอย่างผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบ MOS เมื่อตัวเก็บประจุมีลักษณะรูปร่างต่าง ๆ (ก) สี่เหลี่ยม (ข) วงกลม

3.6 การศึกษาแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์

ค่าแรงดันพังทลายของสารไดอิเล็กตริก (Dielectric breakdown strength) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกค่าหนึ่งซึ่งจะเป็นตัวกำหนดช่วงแรงดันใช้งานของอุปกรณ์ โดยการทดลองจะนำตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่มีชั้นไดอิเล็กตริกเป็นซิงค์ออกไซด์ที่สร้างขึ้นมาจากค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ โดยใช้เครื่องมือวัดคุณสมบัติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Hewlett Packard รุ่น 4061A Semiconductor/Component Test System วัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดันเมื่อตัวเก็บประจุมีความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 500 \AA , 1000 \AA และ 1500 \AA ซึ่งแสดงดังรูป 3.29(ก) ถึง 3.29(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 3.29 กราฟค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ เมื่อความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์

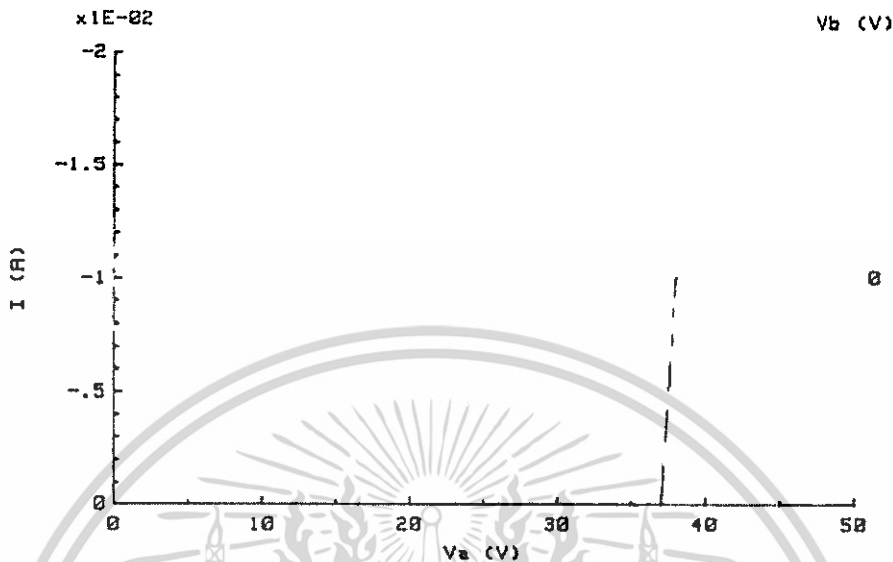
(ก) 500 อังสตรอม (ข) 1000 อังสตรอม (ค) 1500 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE- DIELECTRIC STRENGTH OF ZnO

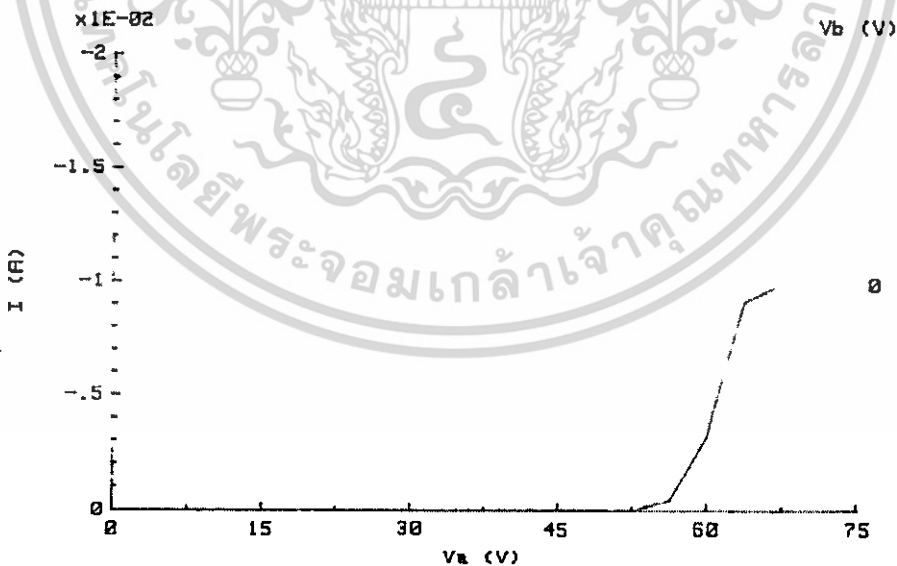


(a)

I-V CHARACTERISTICS

HP 4061A

SAMPLE- DIELECTRIC STRENGTH OF ZnO

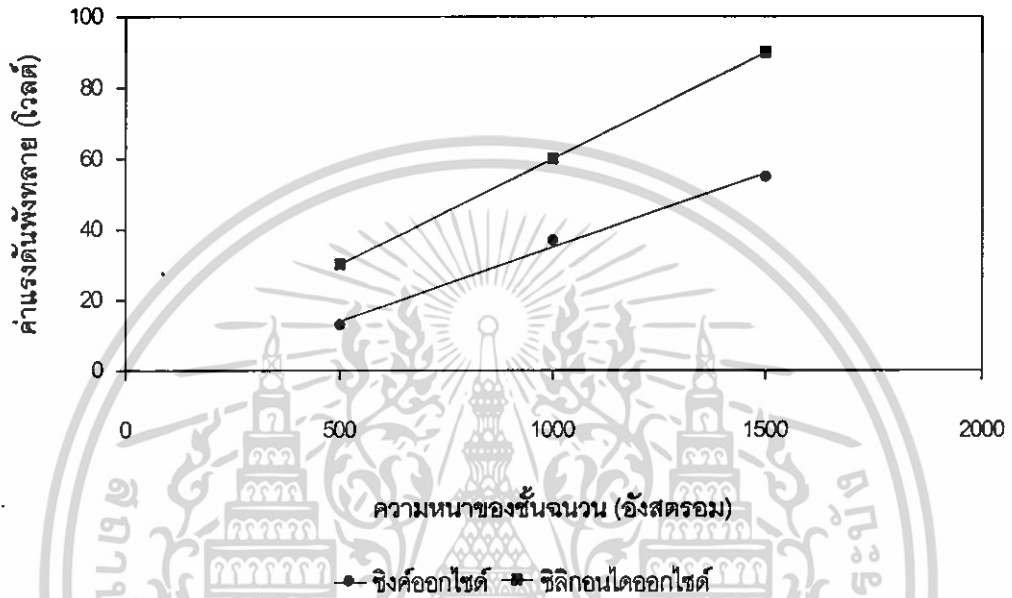


(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.29 (ต่อ)

จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ คือ ค่าแรงดันที่ตำแหน่งซึ่งเกิดกระแสไหลอย่างรุนแรง โดยค่าแรงดันพังทลายจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทลายกับค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เปรียบเทียบกับค่าแรงดันพังทลายของซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันพังทลายกับค่าความหนาของซิงค์ออกไซด์ และความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์

ค่าแรงดันพังทลายของซิงค์ออกไซด์ที่วัดได้จะมีค่าประมาณ 337 โวลต์ต่อไมครอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันพังทลายของซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมสร้างเป็นชั้นไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ทั่วไปนั้นมีค่าประมาณ 600 โวลต์ต่อไมครอน [18] จะพบว่าตัวเก็บประจุแบบ MOS ที่สร้างได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีค่าแรงดันพังทลายของซิงค์ออกไซด์ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณครึ่งหนึ่ง

3.7 การทดลองค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยการควบคุมความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์

แรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่ทำการพิจารณา คือ ค่าแรงดันที่จ่ายแก่ขั้วโลหะแล้วสามารถเหนี่ยวนำประจุพาหะที่ต้องการมาอยู่ที่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนได้ โดยค่าแรงดันขีดเริ่มมีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นไดอิเล็กตริก ซึ่งอยู่ในรูปของค่าความจุไฟฟ้าดังแสดงในสมการ

$$V_T = \Phi_{ms} - \phi_F - \frac{1}{C_{ZnO}} \left(\sqrt{4q\epsilon_{Si}N_{sub}|\phi_F| + Q_{ss}} \right) \quad (\text{n-type substrate})$$

$$V_T = \Phi_{ms} + \phi_F + \frac{1}{C_{ZnO}} \left(\sqrt{4q\epsilon_{Si}N_{sub}|\phi_F| - Q_{ss}} \right) \quad (\text{p-type substrate}) \quad (3.14)$$

สำหรับค่าแรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ซึ่งมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำจะมีความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับค่าแรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่ว ๆ ไปดังสมการ (3.15) [11]

$$V_T = \Phi_{ms} - \phi_F - \frac{1}{C_{ZnO}} \left(\sqrt{2q\epsilon_{Si}N_{sub}|\phi_F| + Q_{ss}} \right) \quad (3.15)$$

ซึ่งความหนาของซิงค์ออกไซด์มีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า ดังนี้

$$T_{ZnO} = \frac{\epsilon_{ZnO}}{C_{ZnO}} \quad (3.16)$$

ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ โดยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง HP4061A Semiconductor/Component Test System และวัดความหนาด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy)

เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่มีขนาดเล็ก การทำงานของกล้องลักษณะนี้จะไม่ขึ้นกับแสงแต่จะใช้ลำอิเล็กตรอนในการสแกนลงบนชิ้นสารที่บรรจุอยู่ในแชมเบอร์ซึ่งดูดอากาศออกให้เป็นสุญญากาศ ลำอิเล็กตรอนจะเกิดจากการทำให้แคโทดทั้งสแตนด์นร้อนจนสามารถปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออก จากนั้น

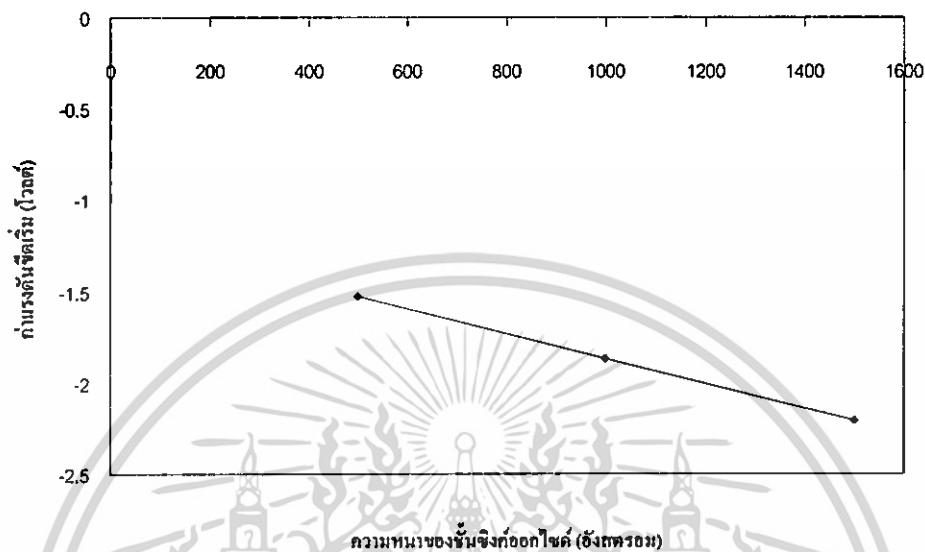
อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยพลังงานค่าสูง (5-50 keV) และถูกโฟกัสให้เป็นลำที่เล็ก อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะทำให้เกิดไอออนและปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่พลังงานต่ำ ($\approx 50\text{eV}$) จากชั้นผิวหน้าของตัวอย่างชิ้นสาร อิเล็กตรอนปฐมภูมิหนึ่งตัวอาจทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิน 1 ตัว ดังนั้นการทำให้ลำอิเล็กตรอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากจะทำให้เกิดการแยกชัดที่ดี (high resolution) ข้อดีของ SEM เมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์ทางแสง (Optical Microscope) ทั่ว ๆ ไป คือ SEM มีกำลังขยายสูง (ตั้งแต่ 50-40,000x), ความคมชัดของภาพสูง (2.5-10 nm), ความลึกของสนามมากกว่า 500 เท่า และภาพที่เป็นเป็นแบบสามมิติ วิธีการวิเคราะห์ด้วย SEM ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องจัดเตรียมชิ้นสารเป็นพิเศษและไม่มีอันตรายอันเนื่องจากการใช้เครื่องมือ อย่างไรก็ตามหากเป็นกรณีวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าจะมีประจุสะสมอยู่บนผิวหน้าซึ่งจะลดการแยกชัดของภาพลง ในกรณีเช่นนี้ต้องทำการเคลือบชั้นบาง ๆ ของวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสูงก่อน ซึ่งสารที่มักจะนำมาใช้เคลือบคือ ทองและคาร์บอน [19]

การวิเคราะห์หาความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเครื่อง SEM มาประยุกต์ใช้คำนวณหาความหนาของชั้นฉนวนซิงค์ออกไซด์ โดยเครื่อง SEM ที่ใช้เป็นของบริษัท JEOL รุ่น JSM-5200 มีความละเอียด (Resolution) 5.5 nm กำลังขยาย 15x ถึง 200,000x ซึ่งภาพตัดขวางของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 3.31

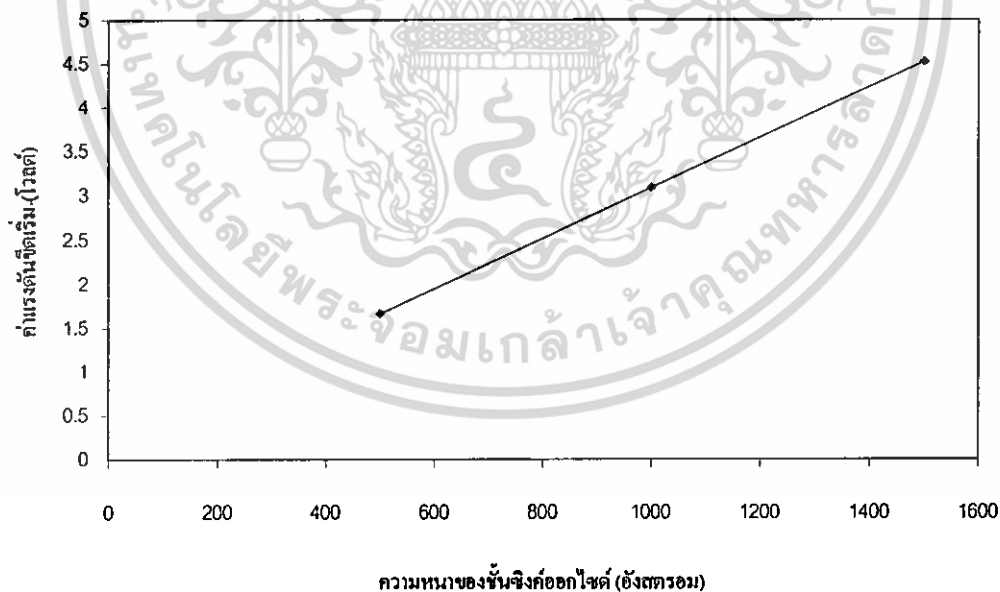


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 3.31 ตัวอย่างภาพตัดขวางของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่ถ่ายจากเครื่อง SEM

เมื่อกำหนดความหนาที่ได้จากภาพถ่าย SEM แล้วนำตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ จะได้ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.32



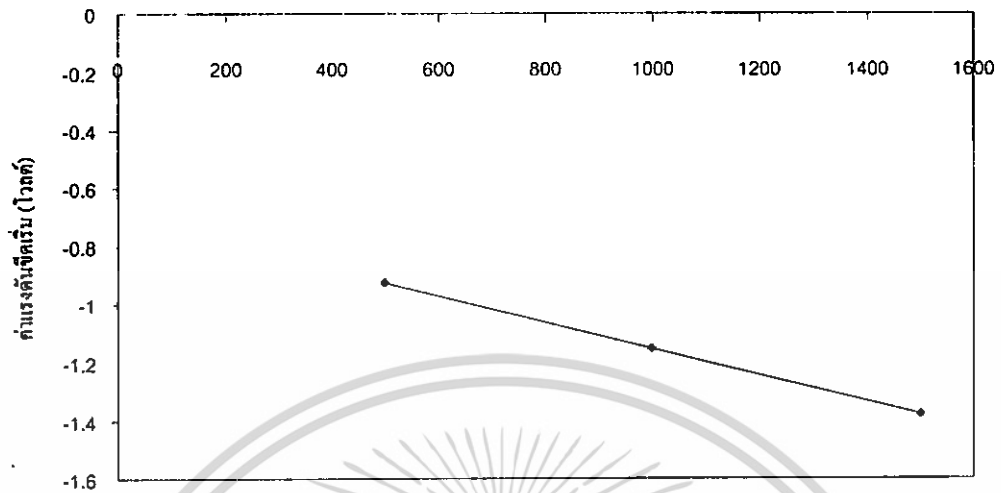
- (ก) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และ $Q_{ss}/q = 2.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$



- (ข) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิกอนชนิดพี $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันขีดเริ่มและความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์



ความหนาแน่นขิงก้อออกไซด์ (ขังศรอม)

- (ค) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำ $7.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ และ $Q_{\text{ss}}/q = 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

รูปที่ 3.32 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปและบทวิจารณ์

ตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS ที่สร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์ เป็นตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างและลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับตัวเก็บประจุแบบ MOS ทั่ว ๆ ไปที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ การสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS สามารถสร้างด้วยเทคโนโลยีความร้อนในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเริ่มต้น เลือกใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ระบายของผลึก (100) ทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเพื่อกำจัดโลหะและไขมันที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนออก สำหรับการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOIS ทำการเติมอะตอมสารเจือทองคำเข้าไปในเนื้อของฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น โดยการเคลือบทองคำที่บริเวณด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยเครื่องเคลือบโลหะสุญญากาศ และทำการขบถึงทองคำที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ในบรรยากาศของไนโตรเจนบริสุทธิ์ จะทำให้ฐานรองที่ใช้ในการสร้างตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติคล้ายสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จากนั้นทำการสร้างชั้นซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการ สปีดเดอริ่งแบบ อาร์เอฟ ไดโอด สปีดเดอริ่ง ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน, ความดันภายในแชมเบอร์ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ (mbar), อุณหภูมิของฐานรอง (อาโนด) 25 องศาเซลเซียส แล้วทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้วยเครื่องเคลือบโลหะสุญญากาศ ทำการอบเพื่อให้รอยสัมผัสเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก หลังจากดำเนินการสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

เนื่องจากตัวเก็บประจุโครงสร้างแบบ MOS เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้าโครงสร้างแบบ MOS และเป็นอุปกรณ์ที่มีประโยชน์ในการศึกษาผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำและการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์ เนื่องจากเสถียรภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับสภาวะที่ผิวหน้าของอุปกรณ์ ดังนั้นการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างบริเวณผิวหน้าจึงมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์

เริ่มต้นทำการทดลองวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ซึ่งพบว่ากราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างด้วยสารไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์ มีลักษณะเหมือนกับกราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ทั่วไป โดยการทดลองได้ทำการวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่ 10 kHz เมื่อพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่

สร้างบนแผ่นฐานรองซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนชนิดพี ในขณะที่อยู่ในสถานะผันกลับ ประจุพาหะส่วนน้อยของฐานรองไม่สามารถตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟสลับได้ทัน ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงผันกลับจึงมีค่าเท่ากับ ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ต่ออนุกรมกับค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อโครงสร้างเข้าสู่สถานะผันกลับอย่างรุนแรง ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟคุณสมบัติระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ความถี่สูงของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ สำหรับกราฟของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOIS ที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำอย่างเหมาะสม ลักษณะกราฟที่ได้จะแตกต่างออกไป ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ (C_{ZnO}) ในช่วงการสะสมประจุ ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าลดลงเมื่อบริเวณผิวหน้าเกิดขึ้นปลดพาหะและกลับมามีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์อีกครั้งเมื่อผิวหน้าเกิดขึ้นผันกลับ เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อยของแผ่นฐานรองซิลิกอนที่ทำให้เกิดขึ้นผันกลับสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันไฟสลับได้ทัน ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MOIS เกิดจากการสะสมประจุที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองด้านของชั้นซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้ารวมจึงมีค่าประมาณค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ กราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOIS ที่วัดได้ ค่าความจุไฟฟ้าในช่วงผันกลับมีค่าน้อยกว่าความจุไฟฟ้าในช่วงการสะสมประจุ เนื่องจากผลของประจุบวกที่อยู่ในชั้นซิงค์ออกไซด์ทำให้ส่งผลต่อประจุที่บริเวณผิวหน้าของฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอน และผลเนื่องจากอะตอมทองคำที่เติมลงในแผ่นฐานรองซิลิกอน ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอนอะตอมทองคำจะเป็นสารเจือประเภทขั้วลึก (deep impurity) และการแพร่ของอะตอมทองคำจะเป็นการแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอมซิลิกอน โดยไม่เกิดพันธะทางเคมีใดๆ ชี้กับอะตอมซิลิกอน ดังนั้นอะตอมทองคำในเนื้อสารซิลิกอนจึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของประจุพาหะ หรือทำหน้าที่เสมือนเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของประจุพาหะที่กำลังเคลื่อนที่ (ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล) มีผลทำให้ประมาณประจุพาหะส่วนน้อยลดลง และส่งผลต่อความจุไฟฟ้าในช่วงผันกลับ นอกจากนี้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าลดลงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแตกต่างจากตัวเก็บประจุ โครงสร้าง MOS ทั่วไป เนื่องจากผลของการขยายตัวของบริเวณปลดพาหะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างซิงค์ออกไซด์และฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าอีกค่าหนึ่งอนุกรมอยู่ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าลดลง

ในการทดลองวัดคุณสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน สามารถนำกราฟคุณสมบัติที่ได้มาหาค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์และค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นฐานรองได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะพบว่าค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ โดยค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้นจะไม่ขึ้นกับความหนา

ของชั้น ไดโอิเล็กทริกแต่ละชั้นกับความหนาแน่นของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้เมื่อนำค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์นั้นมีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 2 เท่า เมื่อตัวเก็บประจุมีความหนาของชั้นไดโอิเล็กทริกเท่ากัน และจากค่าความจุไฟฟ้าของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่หาได้ จะสามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกของวัสดุซิงค์ออกไซด์ โดยค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกของซิงค์ออกไซด์ที่สร้างได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีค่าอยู่ในช่วง 7.5-8 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกมาตรฐานของซิงค์ออกไซด์ คือ 8.5 แสดงว่าชั้นไดโอิเล็กทริกที่สร้างนี้เป็นซิงค์ออกไซด์

แรงดันพังทลายของสาร ไดโอิเล็กทริกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งของการใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งสามารถหาค่าแรงดันพังทลายของซิงค์ออกไซด์ได้โดยการวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดัน ผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าแรงดันพังทลายจะขึ้นกับความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ เมื่อค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 500 \AA แรงดันพังทลายมีค่าประมาณ 13 โวลต์, ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 1000 \AA แรงดันพังทลายมีค่า 38 โวลต์ และ ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 1500 \AA แรงดันพังทลายมีค่า 48 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่วัดได้จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 337 โวลต์ต่อไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันพังทลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าประมาณ 600 โวลต์ต่อไมครอน พบว่าค่าแรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่สร้างได้ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าของซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณครึ่งหนึ่ง

ในการศึกษาผลของรูปร่างต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS พบว่าเมื่อออกแบบให้ขั้วโลหะมีลักษณะลดทอนเป็นรูปสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน, หกเหลี่ยมและวงกลม กราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่ได้จากการทดลองวัดมีลักษณะเหมือนกับกราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่วไป

ลักษณะกราฟค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันที่วัดได้ของตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างบนฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น, ชนิดพี และสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติมอะตอมทองคำที่มีความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 500 \AA จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ที่วัดได้ของตัวเก็บประจุที่มีความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1000 \AA และ 1500 \AA โดยพบว่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้ารวมของกราฟในขณะที่โครงสร้างเข้าสู่สภาวะการสะสมประจุ นอกจากนี้การเปลี่ยนค่าความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์จะส่งผลต่อค่า แรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุที่สร้างบนฐานรองทั้งสามชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น (ไม่คิดเครื่องหมาย) โดยที่ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 500 \AA ค่าแรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุที่สร้างบนฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็น, ฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี และตัวเก็บประจุที่สร้างบนฐานรองสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดเอ็นที่ได้รับการเติม

อะตอมทองคำมีค่า -1.527 โวลต์, 1.667 โวลต์ และ -0.926 โวลต์ ตามลำดับ ที่ความหนาซิงค์ออกไซด์ 1000 \AA ค่าแรงดันขีดเริ่มของตัวเก็บประจุมีค่า -1.865 โวลต์, 3.092 โวลต์ และ -1.152 โวลต์ สำหรับที่ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์ 1500 \AA ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่า -2.202 โวลต์, 4.52 โวลต์ และ -1.378 โวลต์ ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปคุณสมบัติของตัวเก็บประจุสารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS ที่สร้างด้วยสารโคอีเล็กทริกซิงค์ออกไซด์เปรียบเทียบกับซิลิกอนไดออกไซด์ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ โครงสร้างแบบ MOS ที่สร้างด้วยสารโคอีเล็กทริกซิงค์ออกไซด์เปรียบเทียบกับซิลิกอนไดออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ

| ความหนาของชั้นซิงค์ออกไซด์และชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (\AA) | ค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (nF/cm^2) | | ค่าคงที่โคอีเล็กทริก | แรงดันพังทลายของชั้นซิงค์ออกไซด์ (V) |
|--|---|----------------------|----------------------|--------------------------------------|
| | ชั้นซิงค์ออกไซด์ | ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ | | |
| 500 | 139 | 69.06 | 7.85 | 13 |
| 1000 | 68 | 34.53 | 7.73 | 38 |
| 1500 | 46 | 23.02 | 7.8 | 48 |

ผลการทดลองที่ได้จากการวิจัยทำให้ทราบถึงปัญหาและข้อจำกัดในการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้าง MOS โดยการสร้างตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOIS ต้องทำการเติมอะตอมทองคำบริสุทธิ์เข้าไปในฐานรองที่ใช้ในการสร้างตัวเก็บประจุ เพื่อให้ฐานรองมีคุณสมบัติคล้ายสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ โดยต้องควบคุมขั้นตอนการเติมอะตอมสารเจือทองคำเพื่อควบคุมให้ปริมาณอะตอมทองคำในแต่ละครั้งของการสร้างมีค่าคงที่ นอกจากนี้ต้องควบคุมการสร้างชั้นซิงค์ออกไซด์เนื่องจากความสมบูรณ์ของชั้นซิงค์ออกไซด์ที่บริเวณผิวหน้ารอยต่อจะมีผลต่อค่าประจุที่สถานะผิวของอุปกรณ์ รวมทั้งกระบวนการสร้างในขั้นตอนอื่น ๆ เพื่อให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีค่าคงที่และถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานเพื่อการศึกษาด้านนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบว่าตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS สามารถสร้างโดยใช้สารไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์ได้ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและกายภาพของโครงสร้างใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่วไปที่สร้างด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และเนื่องจากตัวเก็บประจุเป็นโครงสร้างหลักของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะพัฒนานำสารไดอิเล็กตริกซิงค์ออกไซด์มาสร้างเป็นเกทบริเวณช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS เพื่อปรับปรุงค่ากระแสของทรานซิสเตอร์ให้มีค่าสูงขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรทางสัญญาณอนาล็อกที่ต้องใช้กระแสสูง

โดยการพัฒนาตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ที่สร้างด้วยซิงค์ออกไซด์นี้ไปเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS จำเป็นต้องควบคุมกระบวนการสร้างให้เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรรวมต่าง ๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Parnklang J., Titiroongruang W., Supadech S., Iida M. and Kurosu T. "Electrical Characteristics of Au Doped Di CMOS FET's without Isolation Layer." Proceedings of the School of Engineering, Tokai University, Vol. XX, 1995. pp. 37 – 43.
- [2] สัจจา ส่องศิริ. "การศึกษา วิจัย และพัฒนาเฟดที่มีโครงสร้างใหม่แบบ MOIS." วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ปีการศึกษา 2532
- [3] Stephan A" Campbell et. al.. "MOSFET Transistor Fabricated with High Permittivity TiO_2 Dielectrics." IEEE Trans. on Electron Devices, VOL.44(NO.1), 1997, pp. 104-109
- [4] จิรวัดน์ ปานกลาง, จารุพิชญ์ สุธรรมานันท์ และ พ็ชราภรณ์ นิปีทหัตถพงษ์. "โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบ MIIS ที่มีชั้นฉนวนซึ่งมีค่าสภาพยอมสูง." การประชุมวิชาการเกษตรฯ. 2541
- [5] Jirawath Parnklang, Jarupich Surathammanun, Attaya Julprapa, Vanchai Riewruja and Wisut Titiroonruang. "The MIIS Structure Capacitor Fabricated with High Permittivity Material." IEEE TEN CONFERENCE Cheju Korea, Vol. 2, 1999. pp.1128-1131.
- [6] T.P.Alexander T.J.Bukowski. "Dielectric Properties of Sol-Gel Derived ZnO Thin Films" Proceedings of IEEE, 1996. pp.585-588
- [7] K. Wasa and Sh. Hayakawa. **Handbook of Sputter Deposition Technology. Principles, Technology and Applications.** Noyes Publications. 1992.
- [8] David R. Lide. **Handbook of Chemistry and Physics.** CRC Press, 78th edition, 1997-1998.
- [9] S.M. Sze. **Physics of Semiconductor Devices.** John Wiley & Sons, Inc. 1969.
- [10] จิรวัดน์ ปานกลาง. "การศึกษา วิจัย และพัฒนาทรานซิสเตอร์โครงสร้าง CMOIS เป็นวงจรรวมขนาดเล็ก." วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [11] Z.M. Jarzebski. **Oxide Semiconductor.** McGraw-Hill Publishing Co., 1986.

- [12] สมเกียรติ สุขเดช. **สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ,** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540

- [13] A.S. Grove. **Physics and Technology of Semiconductor Devices**. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1967.
- [14] James W. Robinson. **Practical Handbook of Spectroscopy**. CRC Press, Inc. 1991.
- [15] Z. Safer and D.S. Ferckides. "Characterization and Optimization of Reactive Sputtered ZnO" Proceedings of IEEE WCPEC, 1994. pp. 334-339
- [16] Dieter K. Schroder. **Semiconductor Material and Device Characterization**. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1990.
- [17] Yannis Tsvividis. "Moderate Inversion in MOS Devices." Solid-States Electronics, Vol. 25, No.11, 1982. pp. 1099-1104.
- [18] Richard S. Muller, Theodore I. Kamins. **Device Electronics for Integrated Circuits**. John Wiley & Sons, Inc. 1986.
- [19] กรกฎ วัฒนวิเชียร. โพลีซิลิคอนเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การเติมอะตอมสารเจือทองคำ

โดยทั่ว ๆ ไปกระบวนการแพร่สารเจือชนิดต่าง ๆ ในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิกอนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการ predeposition และกระบวนการ drive in โดยการทำ predeposition เป็นการแพร่สารเจือโดยไม่จำกัดปริมาณของสารเจือ และกระบวนการ drive in เป็นการแพร่สารเจือแบบจำกัดปริมาณของสารเจือ และมักจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการสร้างชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อปกคลุมแผ่นผลึก เพื่อป้องกันการแพร่ซึมของสารเจือออกนอกแผ่นผลึก และในการทำการ drive in ตัวแปรอุณหภูมิและระยะเวลาจะเป็นตัวกำหนดความลึกของสารเจือที่สามารถเข้าไปในแผ่นผลึกได้

การแพร่สารเจือทองคำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กระทำโดยการเคลือบโลหะทองคำที่บริเวณผิวด้านตรงกันข้ามกับบริเวณที่สร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และทำการขับเคลื่อนทองคำที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การเคลือบโลหะทองคำด้วยการเคลือบโลหะในสุญญากาศ เป็นกระบวนการ predeposition และกระบวนการต่อมาเป็นกระบวนการ drive in เมื่อทำการเคลือบโลหะทองคำเสร็จเรียบร้อยแล้ว แผ่นผลึกมีลักษณะดังรูปที่ ก.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก.1 แผ่นผลึกซิลิกอนที่ได้รับการเคลือบด้วยอะตอมทองคำ

ดังนั้นในการหาค่าความลึกที่ทองคำสามารถแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อสารซิลิกอนที่ระยะต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ใช้คณิตศาสตร์การแพร่ซึมเฉพาะช่วง drive in เท่านั้น ดังสมการที่ ก.1

$$N(x,t) = [Q / \text{sqr}(\pi Dt)] \exp - (x)^2 / 4Dt \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่ $N(x,t)$ คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ระยะ x ลึกลงไปจากผิวของแผ่นผลึก

Q คือจำนวนอะตอมสารเจือที่แพร่ในกระบวนการ predeposition

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือที่อุณหภูมิการ drive in

t คือเวลาที่ใช้ในการแพร่ในกระบวนการ drive in

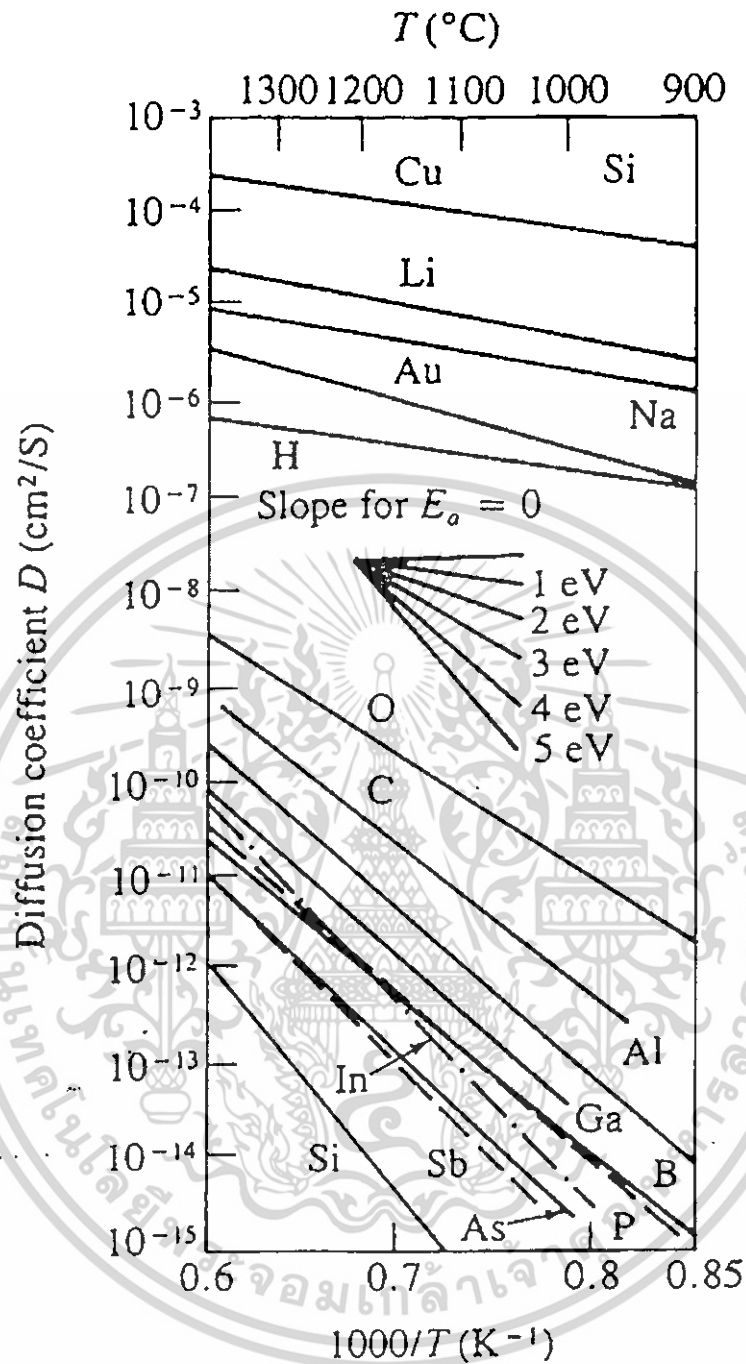
e คือค่าคงที่ 2.71828

x คือระยะลึกลงไปในแผ่นผลึกจากด้านที่อะตอมสารเจือเกาะอยู่

จากสมการจะพบว่าตัวแปร D ที่ต้องการทราบเพื่อใช้ในการคำนวณสามารถหาค่าได้จากกราฟดังรูปที่ ก.2 ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส มีค่า $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$ และค่าเวลา t ที่ใช้ในการแพร่ทองคำมีค่า 5400 วินาที ส่วนค่า Q ซึ่งเป็นปริมาณของอะตอมทองคำที่เคลือบผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ ทองคำบริสุทธิ์มีน้ำหนักอะตอม 1 โมลอะตอม (มีปริมาณอะตอมทั้งหมด 6.02×10^{23} อะตอม) เท่ากับ 196.967 กรัม ดังนั้นถ้าทราบน้ำหนักของอะตอมทองคำที่เคลือบอยู่บริเวณของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังการเคลือบทองคำเรียบร้อยแล้ว จะสามารถคำนวณปริมาณของอะตอมทองคำที่ผิวได้ และสามารถใช้ค่าปริมาณอะตอมทองคำนี้แทนค่าลงในสมการที่ ก.1 ได้ เพื่อหาว่าอะตอมทองคำสามารถแพร่ลึกลงไปได้เท่าใด ในการหาน้ำหนักของทองคำใช้วิธีการดังนี้คือ ก่อนการเคลือบทองคำบนแผ่นผลึกซิลิกอนให้นำแผ่นผลึกซิลิกอนชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนก่อน จากนั้นนำแผ่นผลึกซิลิกอนดังกล่าวเคลือบด้วยโลหะทองคำบริสุทธิ์ตามกระบวนการที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 เมื่อทำการเคลือบทองคำเสร็จเรียบร้อยแล้วนำแผ่นผลึกชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง น้ำหนักของแผ่นผลึกที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของทองคำที่เคลือบบนผิวของแผ่นผลึกนั่นเอง

โดยผลของความสามารถที่อะตอมทองคำแพร่ลึกลงไปในแผ่นผลึกอย่างน้อยที่สุดจะต้องเท่ากับความหนาของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ CMOIS ที่มีช่องทางเดินกระแสในแนวตั้ง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าทั่วทั้งแผ่นผลึกซิลิกอนมีอะตอมทองคำกระจายอยู่เต็มทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือต่าง ๆ ในเนื้อสารซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ความเป็นไปได้ในการพัฒนา ZnO เป็นฉนวนบริเวณช่องทางเดินกระแสของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างแบบ MOS

ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS (Metal Oxide Semiconductor) เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งในตระกูลของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้า (Field Effect Transistor) กระแสของประจุพาหะในสิ่งประดิษฐ์ประเภทนี้ จะถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าและเป็นกระแสของพาหะส่วนมากเพียงชนิดเดียวซึ่งเป็นกระแสครีฟท์ ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกทรานซิสเตอร์แบบนี้ว่า ยูนิโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Unipolar Transistor) ลักษณะเด่นของทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS คือ มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก มีความต้องการพลังงานในขณะใช้งานต่ำ แต่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เมื่อเทียบกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภทอื่น ๆ ที่มีลักษณะการใช้งานเช่นเดียวกัน จึงทำให้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยเฉพาะในวงจรที่ต้องการใช้พลังงานต่ำ ๆ หรือในโครงสร้างของวงจรรวม (Integrated Circuit) ที่มีจำนวนตัวประกอบ (Component) มาก ๆ ในระดับ VLSI เช่น ไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) และหน่วยความจำประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Memory) เป็นต้น เนื่องจากเป็นทรานซิสเตอร์ที่สร้างได้โดยง่าย มีขนาดเล็กจึงทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรรวมบรรจุอยู่ในพื้นที่ที่จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลต่อการทำงานต่ำ นอกจากนี้ทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS ยังเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทกำลัง (Power Device) ด้วย

จากการประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS ได้เป็นครั้งแรกในช่วงปลายปี 1950s โดยสร้างชั้นฉนวนซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการสร้างแบบความร้อน (Thermal Process) ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกพื้นฐานที่นิยมในการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้างแบบ MOS และได้มีการพัฒนาที่จะนำโครงสร้างสารไดอิเล็กตริกสองชั้น (Dual-dielectric structures) มาเป็นชั้นฉนวนสำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดผลของสนามไฟฟ้า เช่น $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ และ SiON-SiO_2 แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์คุณสมบัติที่บริเวณผิวและกระบวนการสร้าง

ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS มีข้อจำกัดทางด้านกระแส เนื่องจากการควบคุมความนำกระแสที่บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรที่ต้องการ

กระแสสูงได้ โดยวิธีหนึ่งที่สามารถพัฒนาค่ากระแสได้ คือ การใช้สารไดอิเล็กตริกที่มีค่าสภาพยอมสูงมาเป็นชั้นฉนวน

ซิงค์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง มีค่าไดอิเล็กตริกสูงเมื่อเทียบกับซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมสร้างเป็นชั้นฉนวนของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้าง MOS ซิงค์ออกไซด์สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง และสามารถทำให้บริสุทธิ์เป็นแหล่ง (Source) ในการสร้างชั้นฉนวนได้ ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการศึกษาที่จะนำมาสร้างเป็นชั้นฉนวนของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS

การสร้างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยกระบวนการ อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์ริง ในเงื่อนไขที่เหมาะสมจะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีค่าความต้านทานสูง มีคุณสมบัติเป็นสารไดอิเล็กตริก ฟิล์มที่ได้จากการสปัตเตอร์ริง มีลักษณะโปร่งใส สามารถมองเห็นผ่านชั้นฟิล์มไปยังฐานรองได้ ความสม่ำเสมอของฟิล์มสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า

กระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS นั้น จำเป็นที่จะต้องกัดฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ให้เป็นลวดลายต่าง ๆ เพื่อทำการแพร่สารเจือ ซึ่งการกัดชั้นฉนวนซิงค์ออกไซด์นั้นไม่สามารถใช้สารละลายในห้องปฏิบัติการตามปกติได้ (เช่น การกัดในกรดไนตริก) เนื่องจากซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับสารละลายอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่สามารถควบคุมการกัดให้เป็นไปตามลวดลายที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงต้องกัดซิงค์ออกไซด์ในสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์ไม่รุนแรง

เมื่อทำการทดลองกัดซิงค์ออกไซด์ในสารละลาย NH_4Cl 6 g: NH_4OH 4 cc ในน้ำ DI 30 cc พบว่าสามารถควบคุมรูปร่างของชั้นซิงค์ออกไซด์ได้ โดยมีอัตราการกัดประมาณ 0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$

การสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมลงบนผิวของชั้นซิงค์ออกไซด์ ซึ่งโดยปกติจะเคลือบอลูมิเนียมลงบนชั้นฉนวน แล้วจึงกัดชั้นอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกให้ได้ลวดลายตามที่ต้องการ ซึ่งสารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมในห้องปฏิบัติการ คือ H_3PO_4 : NH_3 : CH_3COOH : H_2O ในอัตราส่วน 80:5:5:10 แต่เนื่องจากสารละลายนี้ทำปฏิกิริยากับซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นจึงใช้กัดชั้นของอลูมิเนียมที่อยู่บนซิงค์ออกไซด์ไม่ได้ เมื่อทดลองกัดอลูมิเนียมในสารละลาย KOH : $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ในอัตราส่วน 1g:10g ในน้ำ DI 600 cc พบว่าสามารถกัดอลูมิเนียมได้โดยที่ไม่ทำให้ซิงค์ออกไซด์เสียหาย

จากผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบว่าตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS สามารถสร้างโดยใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นชั้นฉนวนได้ และมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ค่าแรงดันขีดเริ่ม, ค่าประจุที่สถานะผิว, ค่าประจุที่บริเวณรอยต่อ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS ทั่วไปที่สร้างโดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นฉนวน เนื่องจากตัวเก็บประจุโครงสร้าง MOS โครงสร้างหลักที่สำคัญของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้า และคุณสมบัติของโครงสร้างตัวเก็บประจุมีความสำคัญต่อ

การทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทผลของสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะพัฒนาซิงค์ออกไซด์เป็นฉนวนบริเวณช่องทางเดินกระแสของทรานซิสเตอร์โครงสร้าง MOS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจารุพิชญ์ สุธรรมานันท์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2519 ที่กรุงเทพมหานคร ๑ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (โพลีเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2539

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการขณะกำลังศึกษาอยู่มีดังนี้

1. “โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบ MIIS ที่มีชั้นฉนวนซึ่งมีค่าสภาพยอมสูง.” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 37, หน้า 87-92
2. “The MIIS Structure Capacitor Fabricated with High Permittivity Material.” IEEE TEN CONFERENCE Cheju Korea, 1999 หน้า 1128-1131



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้