

การใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไดรด์เพื่อเป็นเมมเบรนของทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟกต์
ที่ไวต่อไอออนสำหรับการวัดค่าความเป็นกรด-เบส



นางสาวน้ำผึ้ง ผึ้งไพบูลย์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF ALUMINUM OXYNITRIDE THIN FILM AS MEMBRANE OF ION SENSITIVE FIELD
EFFECT TRANSISTOR FOR pH MEASUREMENT



Miss Nampueng Pangpaiboon

สถาบันวิทยบริการ
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

น้ำผึ้ง ผังไพบูลย์ : การใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เพื่อเป็นเมมเบรนของทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟกต์ที่ไวต่อไอออนสำหรับการวัดค่าความเป็นกรด-เบส. (UTILIZATION OF ALUMINUM OXYNITRIDE THIN FILM AS MEMBRANE OF ION SENSITIVE FIELD EFFECT TRANSISTOR FOR pH MEASUREMENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. นิสานาด ไตรผล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.โอภาส ตริทวิศักดิ์, 94 หน้า

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิคอาร์เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา เพื่อใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนสำหรับวัดค่าความเป็นกรด-เบส โดยจากการศึกษาพบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถใช้ปลูกฟิล์มให้มีความหนาตรงตามที่ต้องการ และมีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่ง นอกจากนี้ความหนาและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มยังมีความคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำ โดยฟิล์มบางที่ปลูกได้มีองค์ประกอบทางเคมีคือ อะลูมิเนียม $54.84 \pm 1.75\%$ ไนโตรเจน $35.28 \pm 1.36\%$ และออกซิเจน $9.88 \pm 0.85\%$ เมื่อทำการแอนนัลฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 300°C ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนทางด้านโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 และ 800°C พบว่าเกิด nucleating sites และการขยายขนาดของเกรนตามลำดับ โดยพบรอยแตกที่เกิดจากความเค้นทางความร้อนบนผิวของฟิล์มด้วย เมื่อนำฟิล์มมาสร้างเป็นโครงสร้าง MIS และทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า ฟิล์มควรมีความหนาอย่างน้อย 70 nm เพื่อให้มีค่ากระแสรั่วต่ำ เมื่อนำฟิล์มมาสร้างเป็นโครงสร้าง EIS และทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกันในช่วง $4-10$ พบว่า สามารถตอบสนองต่อความหนาแน่นของไอออนได้โดยมีค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 46.67 mV/pH

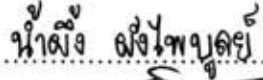
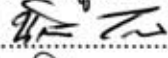
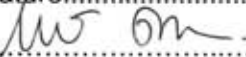
ภาควิชาวัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....น้ำผึ้ง.....ผังไพบูลย์.....
 สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4972338023: MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORD: ALUMINUM OXYNITRIDE / pH SENSOR / EIS STRUCTURE

NAMPUENG PANGPAIBOON : UTILIZATION OF ALUMINUM OXYNITRIDE THIN FILM AS MEMBRANE OF ION SENSITIVE FIELD EFFECT TRANSISTOR FOR pH MEASUREMENT. THESIS PRINCIPLE ADVISOR : ASSIST.PROF.NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., THESIS COADVISOR : OPAS TRITHAVEESAK, Ph.D., 94 pp

In this research, properties of the aluminum oxynitride thin films obtained by RF magnetron sputtering with gas timing technique were investigated. The technique successfully fabricated the films with precise thickness and uniformity. In addition, repeatability of the film thickness and chemical composition can be achieved. The chemical compositions of the thin films were $54.84 \pm 1.75\%$ aluminum, $35.28 \pm 1.36\%$ nitrogen and $9.88 \pm 0.85\%$ oxygen. The films that were annealed at 300°C exhibited no significant changes in crystal structure and microstructure. When the annealing temperature increased to 500 and 800°C , nucleating sites and grain growth were respectively observed along with cracks on the film surface caused by thermal stress. MIS structures composed of the aluminum oxynitride thin films were assembled and tested for electrical properties. The thickness of the films was required to be at least 70 nm to minimize the leakage current. Then, EIS structures utilizing the aluminum oxynitride thin films as membranes were assembled. Their electrical properties were examined in various acidic buffer solutions of pH 4-10. It was found that the EIS structures were sensitive to ion density with the sensitivity of 46.67 mV/pH.

Department: Materials Science Student's Signature..... 
 Field of Study: Ceramic Technology..... Principle Advisor's Signature..... 
 Academic year 2007..... Co-advisor's Signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.โอภาส ตริทวิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคคลและสถาบันต่างๆ ดังมีรายนามต่อไปนี้

ดร.อัมพร โพธิ์ไย และ คุณชาญเดช หรือนันท์ ที่คอยถามไถ่ถึงความก้าวหน้าของงานวิจัย อยู่เสมอ

ดร.นิภาพรรณ กลั่นเงิน (ภูละมัย) ดร.วุฒินันท์ เจียมศักดิ์ศิริ คุณวิน บรรจงปรุ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดลอง

คณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้การสนับสนุนการทำงานในทุกๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดลองและวิเคราะห์ทดสอบตลอดการวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการศึกษาและการทำวิจัย

โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต

เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุเซรามิกอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์.....	4
2.2 กระบวนการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์	4
2.3 โครงสร้าง MIS	6
2.3.1 แถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ	8
2.3.2 แถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ.....	10
2.3.3 สมบัติ C-V	12
2.3.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่.....	18
2.3.3.2 ชนิดของประจุไฟฟ้าภายในฉนวน	20
2.4 โครงสร้าง EIS.....	24
2.5 อุปกรณ์ ISFET.....	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	32
3.1 ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์จากเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง	32
3.1.1 ความหนาของฟิล์ม.....	32
3.1.2 ความสม่ำเสมอของฟิล์ม	36
3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม	38

3.2 การแอนนีสฟิล์ม.....	40
3.2.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม.....	42
3.2.2 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม	42
3.3 โครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์เป็นฉนวน.....	44
3.3.1 การสร้างโครงสร้าง MIS.....	44
3.3.2 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง MIS.....	45
3.3.3 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS	47
3.3.3.1 ความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่.....	48
3.3.3.2 ประจุไฟฟ้าภายในชั้นฉนวน.....	48
3.4 โครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน.....	49
3.4.1 การสร้างโครงสร้าง EIS.....	49
3.4.2 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS	50
3.4.3 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	52
4.1 สมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์จากเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคโตรสโกปี.....	52
4.1.1 ความหนาของฟิล์ม.....	52
4.1.2 ความสม่ำเสมอของฟิล์ม	54
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม	58
4.2 ผลของการแอนนีสต่อสมบัติของฟิล์ม	61
4.2.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม.....	62
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม	67
4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์เป็นชั้น ฉนวน.....	70
4.3.1 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง MIS.....	71
4.3.2 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS	72
4.3.2.1 ความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่.....	76
4.3.2.2 ประจุไฟฟ้าภายในฉนวน.....	78
4.4 สมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์เป็นเมม เบรนที่ไวต่อไอออน.....	81
4.4.1 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS	81

4.4.2 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการวิจัย	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	87
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการใช้เครื่อง อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ในการปลูกฟิล์ม อะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์	91
ภาคผนวก ข การ์ดมาตรฐาน JCPDS.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 วัสดุที่ได้รับความสนใจสำหรับการใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน	2
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการปลูกฟิล์มเพื่อศึกษาความหนาของฟิล์ม	32
ตารางที่ 3.2 ภาวะในการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์	36
ตารางที่ 3.3 ภาวะที่ใช้ในการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ	41
ตารางที่ 3.4 ภาวะที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์	41
ตารางที่ 3.5 ภาวะที่ใช้ในการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เพื่อใช้เป็นฉนวนของโครงสร้าง MIS.....	44
ตารางที่ 4.1 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ก่อนปรับ Thickness monitor	53
ตารางที่ 4.2 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์หลังปรับ Thickness monitor	53
ตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เมื่อปลูกครั้งที่ 1.....	55
ตารางที่ 4.4 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เมื่อปลูกครั้งที่ 2.....	56
ตารางที่ 4.5 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เมื่อปลูกครั้งที่ 3.....	57
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์	61
ตารางที่ 4.7 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์.....	75
ตารางที่ 4.8 ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	78

สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบสปีดเตอริง.....	5
รูปที่ 2.2 กลไกในการสปีดเตอริงเมื่อเป้าเป็นโลหะอะลูมิเนียม	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้าง MIS พื้นฐาน.....	7
รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำก่อนเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ.....	8
รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำเมื่อเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ.....	9
รูปที่ 2.6 แผนผังแท่งประจุของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะได้รับแรงดันไฟฟ้า.....	9
รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำก่อนเป็นโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ	10
รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำเมื่อเป็นโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ	11
รูปที่ 2.9 กราฟสมบัติ C-V ในอุดมคติที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	12
รูปที่ 2.10 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะแอกคิวมูเลชัน	13
รูปที่ 2.11 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ในภาวะแอกคิวมูเลชัน.....	14
รูปที่ 2.12 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะดีพลีทชัน.....	15
รูปที่ 2.13 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ในภาวะดีพลีทชัน.....	15
รูปที่ 2.14 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ในขณะที่เริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน.....	16
รูปที่ 2.15 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน.....	17
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ในขณะที่เกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน.....	17
รูปที่ 2.17 วงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS	18
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงสมบัติ C-V ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่.....	19
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงสมบัติ C-V ที่ไม่ขึ้นกับความถี่	20
รูปที่ 2.20 ประจุไฟฟ้าต่างๆ ภายในชั้นฉนวน.....	21
รูปที่ 2.21 กราฟ C-V ที่เลื่อนไปตามแกนของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากมีประจุหนึ่งชนิดบวกหรือลบ สำหรับเซมิคอนดักเตอร์ชนิด (a) p-type (b) n-type	22
รูปที่ 2.22 กราฟสมบัติ C-V เมื่อมีประจุกับดักที่ผิว.....	23
รูปที่ 2.23 โครงสร้าง EIS พื้นฐาน.....	24
รูปที่ 2.24 สมดุลระหว่างผิวที่เป็นได้ทั้งกรดและเบสของ SiOH.....	25

รูปที่ 2.25	แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตและอีสเฟต	25
รูปที่ 2.26	สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีทินออกไซด์เป็นฉนวน	27
รูปที่ 2.27	สมบัติ I_D-V_{ref} ของอุปกรณ์อีสเฟตที่มีทินออกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน	28
รูปที่ 2.28	สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางทั้งสแตนท์โรออกไซด์เป็นฉนวน.....	29
รูปที่ 2.29	สมบัติ I_D-V_{GS} ของอุปกรณ์อีสเฟตที่มีฟิล์มบางทั้งสแตนท์โรออกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน.....	29
รูปที่ 2.30	สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีเลดไทเทเนตเป็นฉนวน.....	30
รูปที่ 2.31	สมบัติ I_D-V_{GS} ของอุปกรณ์อีสเฟตที่มีเลดไทเทเนตเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน	31
รูปที่ 3.1	แผ่นซิลิคอนก่อนปลูกฟิล์ม	33
รูปที่ 3.2	การวางแผ่นซิลิคอนภายในภาชนะ.....	33
รูปที่ 3.3	แผ่นซิลิคอนหลังปลูกฟิล์ม.....	33
รูปที่ 3.4	เครื่อง Surface profiler	34
รูปที่ 3.5	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	34
รูปที่ 3.6	ลักษณะของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนด้วยภาวะในตารางที่ 3.1.....	35
รูปที่ 3.7	ภาพตัดขวางของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนด้วยภาวะในตารางที่ 3.1 ที่ใช้ในการศึกษาความหนาด้วย SEM.....	35
รูปที่ 3.8	ลักษณะของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนด้วยภาวะในตารางที่ 3.2.....	36
รูปที่ 3.9	กระจกไลต์ก่อนปลูกฟิล์ม.....	37
รูปที่ 3.10	การวางกระจกไลต์ภายในภาชนะ	37
รูปที่ 3.11	กระจกไลต์หลังปลูกฟิล์ม	37
รูปที่ 3.12	ลักษณะของฟิล์มที่ปลูกบนกระจกไลต์ด้วยภาวะในตารางที่ 3.2	38
รูปที่ 3.13	ภายนอกเครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES)	39
รูปที่ 3.14	ภายในเครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES)	39
รูปที่ 3.15	เตาเผาแบบท่อ.....	40
รูปที่ 3.16	อุปกรณ์ควบคุมเตาเผาแบบท่อ.....	40
รูปที่ 3.17	เครื่อง X-Ray Diffractometer.....	42
รูปที่ 3.18	แผนผังแสดงขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา และการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม.....	43
รูปที่ 3.19	โครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เป็นฉนวน.....	45
รูปที่ 3.20	HP 4156B precision semiconductor parameter analyzer	46

รูปที่ 3.21 เครื่อง HP 4284 LCR meter	47
รูปที่ 3.22 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง MIS และการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 3.23 โครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน.....	50
รูปที่ 3.24 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง EIS และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	51
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 1	58
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 2	59
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 3	59
รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 4	60
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 5	60
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดก่อนแอนนัล.....	63
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C	64
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C	65
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 800°C	66
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดก่อนแอนนัล	67
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C	67
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C	68
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 800°C	68
รูปที่ 4.14 รอยแตกที่เกิดขึ้นบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิสูง	70
รูปที่ 4.15 โครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่ความหนาต่างๆ เป็นฉนวน	71
รูปที่ 4.16 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง MIS ที่มีความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดต่างกัน	72
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดหนา 30 nm เป็นฉนวน	73
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดหนา 50 nm เป็นฉนวน	73

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์หนา 70 nm เป็นฉนวน	74
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 30 nm เป็นฉนวน	76
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 50 nm เป็นฉนวน	77
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 70 nm เป็นฉนวน	77
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 30 nm เป็นฉนวน	79
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 50 nm เป็นฉนวน	79
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 70 nm เป็นฉนวน	80
รูปที่ 4.26 โครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน.....	81
รูปที่ 4.27 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10	82
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4	83
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 7	83
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 10	84
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ค่าความเป็นกรด-เบสหรือค่าพีเอช (pH) ในสารละลาย สามารถวัดได้จากความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้นๆ ในอุตสาหกรรมบางประเภทมีการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-เบสขณะดำเนินการต่างๆ ตลอดเวลา เนื่องจากเป็นค่าพื้นฐานที่วัดได้ง่าย สามารถใช้เป็นค่าควบคุมในกระบวนการผลิตและเป็นค่าบ่งชี้ถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี การตรวจวัดค่าความเป็นกรด-เบสสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้กระดาษลิตมัส การใช้พีเอชมิเตอร์แบบกระดาษแก้ว ซึ่งวิธีนี้ได้รับความนิยมเพราะสามารถตรวจวัดได้ง่าย แต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภทเนื่องจากแก้วอาจเกิดการแตกหักได้ เช่นในอุตสาหกรรมอาหาร จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาอุปกรณ์ฮีสเฟตหรือทรานซิสเตอร์แบบฟิลด์เอฟเฟกต์ที่ไวต่อไอออน (Ion Sensitive Field Effect Transistor, ISFET) เพื่อใช้ในการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-เบส

อุปกรณ์ฮีสเฟตถูกพัฒนามาจากอุปกรณ์มอสเฟต (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) โดยเกิดจากการแยกชั้นโลหะหรือเกตออกจากอุปกรณ์มอสเฟต ให้ชั้นฉนวนสัมผัสกับสารละลายและวัดสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฉนวนกับสารละลายและค่ากระแสในช่องทางเดินของกระแส (Channel) จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย หรือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้นๆ [1]

เมื่อเปรียบเทียบการวัดค่าความเป็นกรด-เบสจากอุปกรณ์ฮีสเฟตกับพีเอชมิเตอร์แบบกระดาษแก้วที่ใช้กันโดยทั่วไป พบว่าการวัดค่าความเป็นกรด-เบสจากอุปกรณ์ฮีสเฟตมีข้อได้เปรียบหลายข้อ เช่น อุปกรณ์ฮีสเฟตมีขนาดเล็ก ผลิตได้จำนวนมากต่อการผลิตหนึ่งครั้ง ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสได้รวดเร็ว สามารถทำงานในช่วงอุณหภูมิกว้าง ทำความสะอาดและเก็บรักษาได้ง่าย และมีอายุการใช้งานยาวนาน [2]

ชั้นฉนวนของอุปกรณ์ฮีสเฟตซึ่งทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน (Ion sensing membrane) มีความสำคัญสำหรับการวัดค่าความเป็นกรด-เบส เนื่องจากความสามารถในการตอบสนองต่อปริมาณไอออนขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นเมมเบรน ซึ่งวัสดุนั้นจะต้องเป็นฉนวนที่ตอบสนองต่อไฮโดรเจนไอออนเพียงชนิดเดียว การตอบสนองต่อไอออนชนิดอื่นจะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง และต้องไม่เกิดฟิล์มชนิดอื่นขึ้น

ระหว่างการใช้งานเพื่อให้ค่าความเป็นกรด-เบสที่วัดได้มีความคงที่เมื่อใช้งานเป็นเวลานาน นอกจากนี้เมมเบรนยังต้องสามารถยึดติดกับอุปกรณ์อิเล็กโทรดได้ดีแม้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรดและเบส

จากตารางที่ 1.1 [3-8] พอลิเมอร์บางของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) อะลูมินา (Al_2O_3) แทนทาลัมเพนทอกไซด์ (Ta_2O_5) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) และทินออกไซด์ (SnO_2) ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน พบว่า Ta_2O_5 มีค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสดีที่สุด แต่มีปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแสงซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานจริง ในขณะที่ Si_3N_4 เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการใช้งานสำหรับวัดค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่า เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่โดยธรรมชาติมักมีฟิล์มบางของออกไซด์เกิดขึ้นบน Si_3N_4 ซึ่งจะส่งผลให้การตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสและความคงที่ของค่าความเป็นกรด-เบสเมื่อวัดเป็นเวลานานลดลง [9]

ตารางที่ 1.1 วัสดุที่ได้รับความสนใจสำหรับการใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

Materials	SiO_2	Si_3N_4	Al_2O_3	Ta_2O_5	WO_3	SnO_2
Test range (pH)	4-10	2-12	3-11	3-11	1-7	2-10
Sensitivity (mV/pH)	25-46	45-52	53	54-58	44-50	58
Response time (s)	60	1	1	1	-	-
Stability (mV/h)	unstable	1.0	0.5	0.5	-	-
Hysteresis (mV)	-	2	3	1.4	-	2.5

สำหรับวัสดุที่มีความน่าสนใจสำหรับการใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนอีกชนิดหนึ่งคือ อะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์ซึ่งเป็นวัสดุเซรามิกที่โปร่งใส แข็งและมีความแข็งแรงสูง มีสมบัติเชิงกลดี ที่อุณหภูมิสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำและมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน [10] อะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทั้งในเชิงเคมีและเชิงกล [11] นอกจากนี้ อะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากรด-เบส จึงเป็นวัสดุเซรามิกที่มีแนวโน้มว่าสามารถนำมาใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กโทรดได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปัตเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive gas-timing RF magnetron sputtering) เพื่อใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์ นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS (Metal Insulator Semiconductor) และโครงสร้าง EIS (Electrolyte

Insulator Semiconductor) ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเป็นชั้นฉนวน เพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่อใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไอปฏิกิริยา สำหรับใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของอุปกรณ์ไอสเฟต

2. ศึกษาถึงความสามารถในการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสของอุปกรณ์ไอสเฟตที่ใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไอปฏิกิริยา สำหรับใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของอุปกรณ์ไอสเฟต

2. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ไอสเฟต

3. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสของอุปกรณ์ไอสเฟตที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเพื่อทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของอุปกรณ์ไอสเฟต

2. ได้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสของอุปกรณ์ไอสเฟตเมื่อใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเซรามิกอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์

อะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์เป็นสารละลายของแข็งของอะลูมินัมออกไซด์และอะลูมินัมไนไตรด์ เป็นวัสดุเซรามิกที่โปร่งใส แข็งและมีความแข็งแรงสูง มีสมบัติเชิงกลดีที่อุณหภูมิสูง มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำและมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน [10] สามารถนำมาใช้งานเป็นเซรามิกโครงสร้าง (Structural ceramic) ได้ ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทั้งในเชิงเคมีและเชิงกล [11] นอกจากนี้ อะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากรด-เบส จึงเป็นวัสดุเซรามิกที่มีแนวโน้มว่าสามารถนำมาใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไฮโดรเจนไอออนสำหรับอุปกรณ์ไอเซลล์ได้ [10, 12] ในรูปแบบของฟิล์มบาง

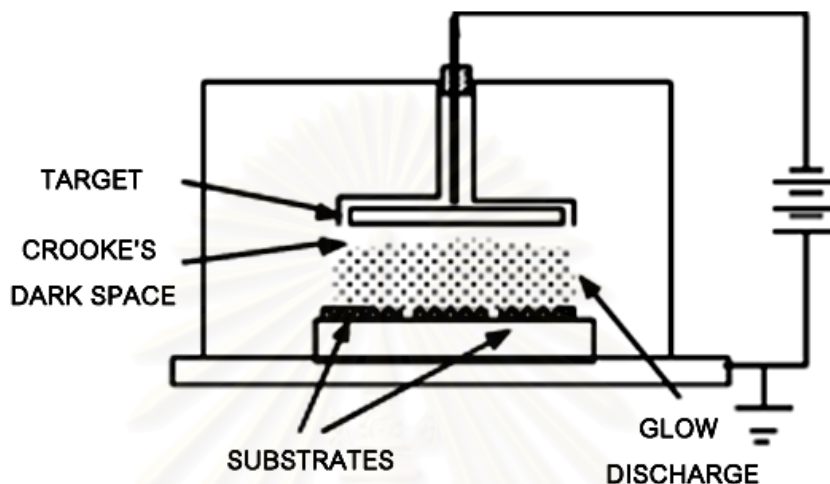
สำหรับฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานหลายๆ ด้านในปัจจุบัน เช่น การเคลือบเพื่อป้องกันการขีดสีและกัดกร่อน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และในเทคโนโลยีด้านต่างๆ เนื่องจากข้อดีของอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์คือ สมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนระหว่างอะลูมินัม ออกไซด์ และไนไตรด์ ดังนั้นสมบัติของฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์สามารถปรับปรุงได้ตามอัตราส่วนระหว่างอะลูมินัมออกไซด์ และอะลูมินัมไนไตรด์ [13]

2.2 กระบวนการปลูกฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์

สเปตเตอริง (Sputtering) เป็นกระบวนการปลูกฟิล์มบางของสารต่างๆ ทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะลงบนฐานรอง (Substrate) โดยใช้หลักการทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition) ซึ่งจะแตกต่างจากการปลูกฟิล์มโดยใช้หลักการทางเคมี (Chemical vapor deposition) เนื่องจากการปลูกฟิล์มโดยใช้หลักการทางเคมีนั้นจะควบคุมความหนาได้ยากและทำให้ฟิล์มที่มีความหนามากเกินความต้องการ นอกจากนั้นจะต้องใช้ฐานรองเป็นตัวนำไฟฟ้า ส่วนการปลูกฟิล์มโดยใช้หลักการทางฟิสิกส์นั้นสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ และได้ฟิล์มที่บางกว่า

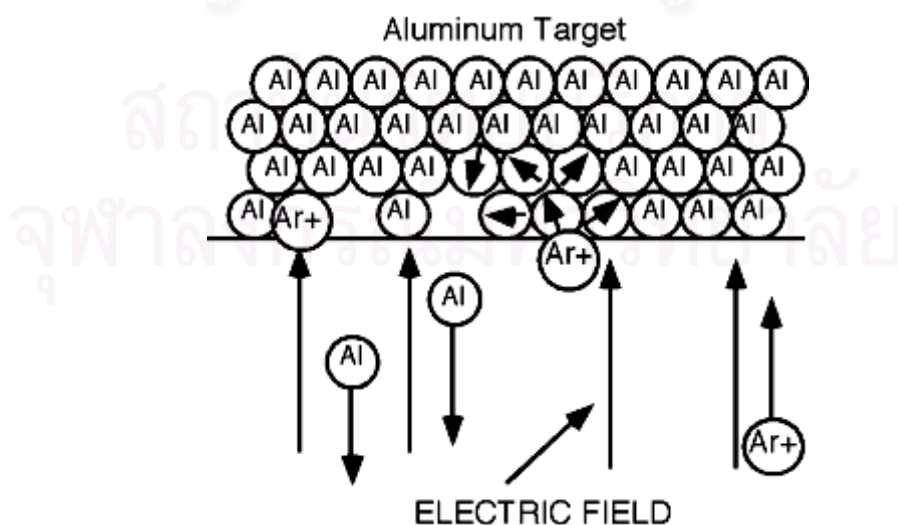
ลักษณะเด่นของกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคสเปตเตอริงคือสามารถปลูกฟิล์มที่เป็น ธาตุ โลหะอัลลอย และสารประกอบได้ และฟิล์มที่ปลูกได้มีความคงทนในการยึดเกาะสูง เป้า (Target) สามารถใช้งานได้นาน ไม่สิ้นเปลือง สามารถใช้ปลูกฟิล์มบนผิวของรูปทรงแท่งหรือกระบอกได้ นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดในกระบวนการมีเพียงเล็กน้อย

ระบบของการสปัตเตอริงเกิดขึ้นภายในแชมเบอร์ (Chamber) ประกอบด้วยเป้าซึ่งเป็นวัสดุที่ต้องการเคลือบลงบนฐานรอง ดังรูปที่ 2.1 [14] หลังจากดูดอากาศออกจากแชมเบอร์แล้ว แก๊สอาร์กอน (Ar) ที่ความดันต่ำจะถูกปล่อยเข้ามาในแชมเบอร์อย่างช้าๆ



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงระบบสปัตเตอริง

แก๊สอาร์กอนถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง ไอออนที่มีพลังงานสูงจะวิ่งไปชนเป้า ดังรูปที่ 2.2 [14] ทำให้อะตอมของเป้าหลุดออกมาด้วยความเร็วสูง ตกลงมาที่ฐานรอง และเนื่องจากอะตอมที่หลุดออกมามีพลังงานสูง ดังนั้นอะตอมจึงสามารถฝังตัวลงบนฐานรองได้ลึก ทำให้ฟิล์มที่ปลูกโดยวิธีการสปัตเตอริงสามารถยึดเกาะฐานรองได้ดี



รูปที่ 2.2 กลไกในการสปัตเตอริงเมื่อเป้าเป็นโลหะอะลูมิเนียม

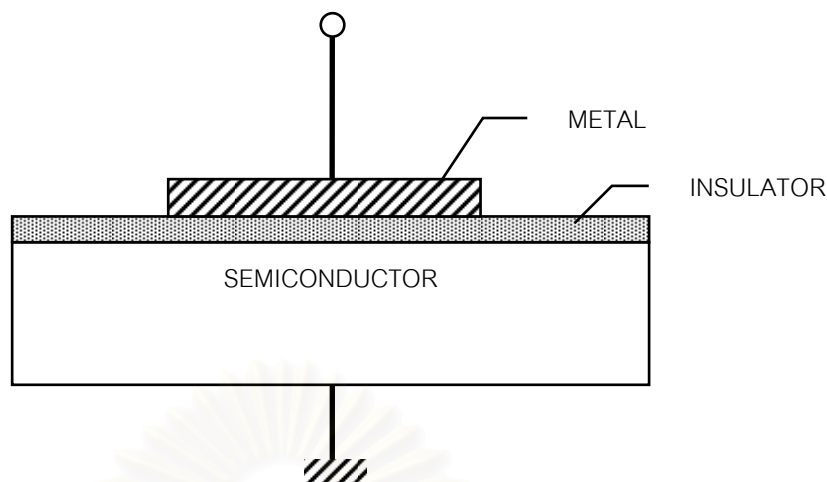
ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดในกระบวนการสเปตเตอริงมีดังนี้ [15]

1. ไอออนของอาร์กอนที่วิ่งชนเป้าและสะท้อนออกมา ส่วนใหญ่จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของเป้า แล้วสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า
2. การชนของไอออนกับเป้าสามารถทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) หลุดออกมาได้ เนื่องจากไอออนของแก๊สที่วิ่งเข้าชนเป้ามีพลังงานสูง
3. ไอออนอาจฝังอยู่ในเป้าอย่างถาวร (Ion implantation) และระดับความลึกของการฝังตัวจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับพลังงานของไอออน
4. อาจเกิดความเสียหายขึ้นในโครงสร้างผลึกของเป้าเนื่องมาจากการชน เช่น เกิดความบกพร่องของโครงผลึก (Lattice defect) หรือเกิดช่องว่าง (Vacancy)
5. การชนอาจทำให้เกิดการกระเจิงอย่างซับซ้อน และทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหลุดออกมาในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของไอออนที่วิ่งเข้าชน อะตอมเหล่านี้ถูกเรียกว่าอะตอมสเปตเตอริง (Sputter atom)

เทคนิคสเปตเตอริงสามารถแยกออกได้เป็นหลายประเภท เช่น ดี ซี สเปตเตอริง (DC-sputtering) อาร์ เอฟ สเปตเตอริง (RF sputtering) ดี ซี แมกนีตรอน สเปตเตอริง (DC magnetron sputtering) และสเปตเตอริงแบบใช้แก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive sputtering) การเปลี่ยนเทคนิคในการสเปตเตอริงจากระบบ ดี ซี (DC: direct current) เป็นระบบ อาร์ เอฟ (RF: radio frequency) จะใช้ในการปลูกฟิล์มสำหรับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าและเทคนิคนี้จะทำให้เกิดพลาสมา (Plasma) ได้ โดยใช้ความดันของอาร์กอนที่ต่ำกว่าเทคนิคสเปตเตอริงแบบธรรมดา การใช้เทคนิคแมกนีตรอน (Magnetron) จะทำให้อิออนของอาร์กอนเคลื่อนที่เข้าหาเป้าได้มากขึ้นทำให้อัตราการเกิดฟิล์ม (Deposition rate) สูงขึ้น และการใช้เทคนิคแบบใช้แก๊สไวปฏิกิริยา (Reactive) เกิดจากการเติมแก๊สที่ช่วยทำปฏิกิริยา (Reactive gas) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับเป้า ซึ่งข้อดีของการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคนี้คือ ฟิล์มที่ได้จะมีส่วนประกอบทางเคมีสม่ำเสมอทั่วทั้งแซมเบอร์

2.3 โครงสร้าง MIS

โครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ โดยชั้นของฉนวนอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของโลหะและชั้นของสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปชั้นของโลหะนิยมใช้เป็นอะลูมิเนียมหรือผลึกของโพลีซิลิคอนที่ถูกเจือสารชนิดเอ็นอย่างเข้มข้น ชั้นของฉนวนสามารถใช้วัสดุฉนวนได้ทุกชนิด แต่ในการใช้งานจริงนิยมใช้ซิลิคอนไดออกไซด์จึงอาจเรียกได้ว่าชั้นออกไซด์ ส่วนชั้นของสารกึ่งตัวนำนิยมใช้ซิลิคอนซึ่งใช้ได้ทั้งซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type) และชนิดพี (p-type) [16]



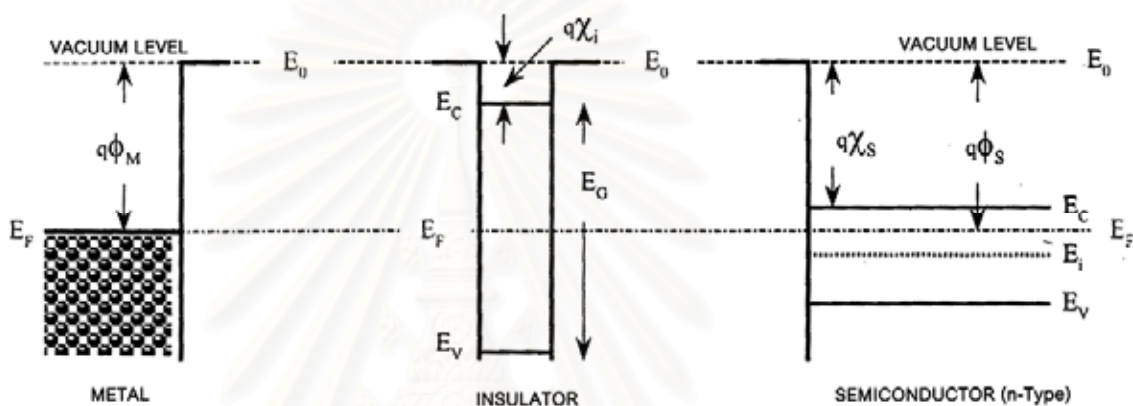
รูปที่ 2.3 โครงสร้าง MIS พื้นฐาน

โครงสร้าง MIS อาจเรียกได้ว่าโครงสร้าง MOS (Metal Oxide Semiconductor) เนื่องจากฉนวนที่ใช้เป็นออกไซด์ ขั้วไฟฟ้าด้านโลหะเรียกว่าเกต ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านสารกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่เป็นขั้วสายดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โครงสร้าง MIS ในอุดมคติมีลักษณะดังนี้

1. ชั้นโลหะมีความหนาเพียงพอ เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจึงมีศักย์ไฟฟ้ากระจายอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ความต้านทานภายในชั้นโลหะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์
2. ชั้นฉนวนมีความเป็นฉนวนที่สมบูรณ์ ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแม้ว่าจะได้รับแรงดันไฟฟ้า ชั้นฉนวนต้องมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์
3. ชั้นสารกึ่งตัวนำถูกเติมสารเจืออย่างสม่ำเสมอ และมีความหนาเพียงพอที่จะทำให้เกิดบริเวณปลอดสนามไฟฟ้า
4. ไม่มีประจุไฟฟ้าใดๆ สะสมอยู่ภายในฉนวนหรือที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ
5. ประจุไฟฟ้าใดๆ ที่มี จะสะสมอยู่ที่สารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ และที่โลหะด้านที่สัมผัสกับฉนวน
6. ขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านของโครงสร้างต้องมีสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก
7. ในการวิเคราะห์จะพิจารณา 1 มิติ
8. ค่าฟังก์ชันงานของโลหะและของสารกึ่งตัวนำถูกพิจารณาว่ามีค่าเท่ากัน

2.3.1 แถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ ก่อนประกอบกันเป็นโครงสร้าง MIS แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 เส้นทึบในแนวตั้งแสดงถึงขอบของผิววัสดุ โดยระดับพลังงานสุญญากาศ (Vacuum level: E_0) คือพลังงานที่น้อยที่สุดที่อิเล็กตรอนต้องใช้เพื่อให้หลุดออกไปอยู่ภายนอกวัสดุ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level: E_F) คือพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ ฟังก์ชันงาน (Work function: Φ) คือความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานสุญญากาศกับพลังงานเฟอร์มิ ฟังก์ชันงานของโลหะเขียนแทนด้วย $q\Phi_M$ ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย $q\Phi_S$

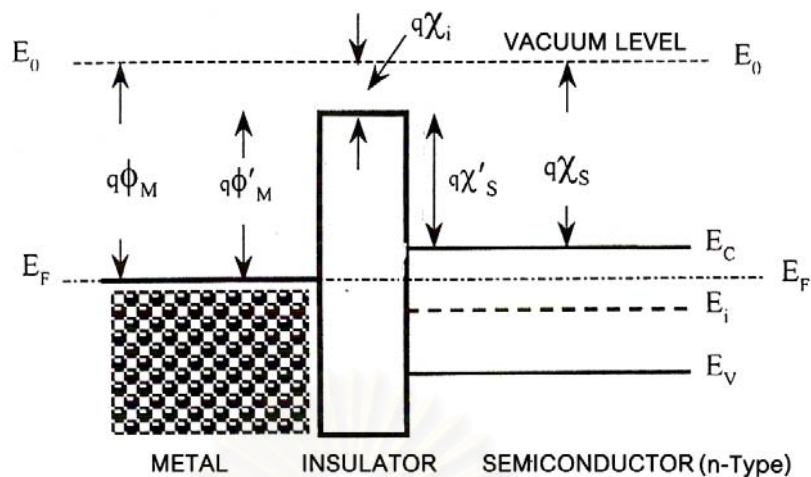


รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำก่อนเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

ความสูงของกำแพงพลังงานที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (Surface energy barrier) คือความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานสุญญากาศและระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (Conduction level: E_C) ถูกกำหนดด้วยค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity: χ) และเขียนแทนด้วย $q\chi_s$

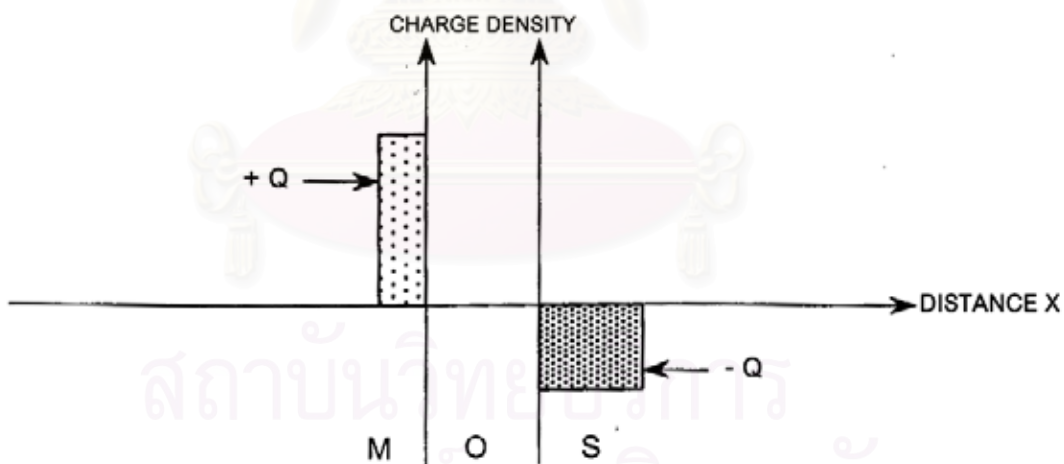
แถบพลังงานของฉนวนจะคล้ายกับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแต่จะมีช่องว่างพลังงาน (Energy gap: E_G) ที่กว้างมาก ความสูงของกำแพงพลังงานที่ผิวของฉนวนถูกกำหนดด้วยค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเช่นเดียวกันและเขียนแทนด้วย $q\chi_i$

โครงสร้าง MIS ในอุดมคติจะพิจารณาว่าค่าฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากัน รูปที่ 2.5 แสดงระดับพลังงานเมื่อนำโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ มาประกอบกันเกิดเป็นโครงสร้าง MIS พบว่าระดับพลังงานต่างๆ อยู่ในระดับเดิมแม้ที่บริเวณสารกึ่งตัวนำ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นแถบเรียบ (Flat band) นั่นคือระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะอยู่ในระดับเดียวกัน และทำให้ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าและระดับพลังงานสูงสุดของแถบเวเลนซ์เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าในภาวะสมดุลจะไม่มีประจุไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าใดๆ เกิดขึ้นในโครงสร้างของ MIS แบบอุดมคติ



รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำเมื่อเป็นโครงสร้าง MIS ในอุดมคติ

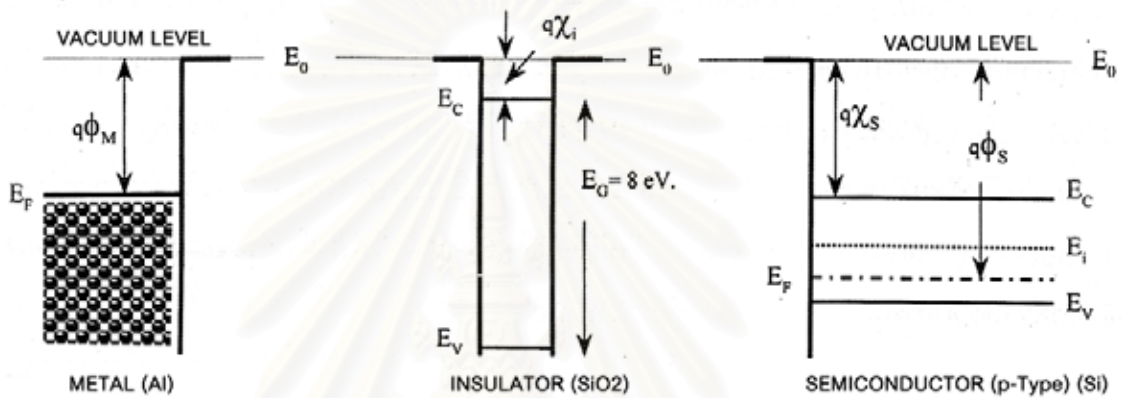
เมื่อโครงสร้าง MIS ได้รับแรงดันไฟฟ้า จะเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่โลหะไปเหนี่ยวนำประจุด้านสารกึ่งตัวนำที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดลักษณะคล้ายกับการสะสมประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน (Parallel plate capacitor) การกระจายของประจุไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังแท่งประจุของโครงสร้าง MIS ในอุดมคติขณะได้รับแรงดันไฟฟ้า

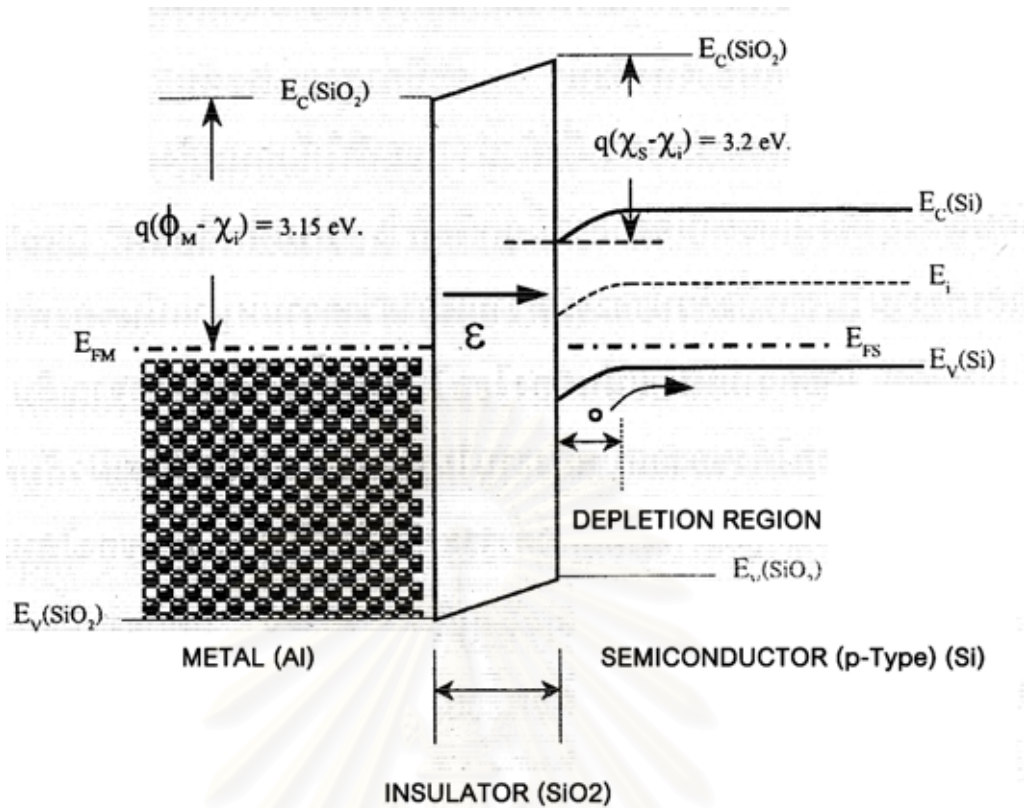
2.3.2 แถบพลังงานของโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ

โครงสร้างของ MIS ในทางปฏิบัติจะต่างจากแบบอุดมคติ เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะมีค่าไม่เท่ากัน รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างแถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ ก่อนประกอบกันเป็นโครงสร้าง MIS เมื่อโลหะเป็นอะลูมิเนียม ($q\Phi_M = 4.10$ eV) ฉนวนเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ($q\chi_i = 0.95$ eV, $E_G = 8$ eV) และสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดพี ($q\Phi_S = 5.05$ eV, $q\chi_s = 4.15$ eV, $E_G = 1.12$ eV)



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำก่อนเป็นโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ

เนื่องจากฟังก์ชันงานของโลหะน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ หรือกล่าวได้ว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นเมื่อนำโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำมาประกอบกันเป็นของโครงสร้าง MIS จะส่งผลให้อิเล็กตรอนจากโลหะถ่ายเทผ่านชั้นไฟฟ้าไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ที่ภาวะสมดุลผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับฉนวนจะมีประจุบวกกระจายเป็นชั้นบางๆ ทางด้านโลหะ ส่วนด้านสารกึ่งตัวนำจะมีแรงดันตกคร่อมและมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณที่สัมผัสกับฉนวน โหนดที่อยู่บริเวณนี้ถูกผลักไปรวมกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากชั้นไฟฟ้า ดังนั้นไอออนลบจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมา ลักษณะแถบพลังงานในภาวะสมดุลแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำเมื่อเป็นโครงสร้าง MIS ในทางปฏิบัติ

เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าใดๆ ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะและของสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในระดับเดียวกัน ที่ภาวะสมดุลนี้การเคลื่อนที่สุทธิของอิเล็กตรอนจะมีค่าเป็นศูนย์ ปริมาณประจุไฟฟ้าบวกด้านโลหะและปริมาณประจุไฟฟ้าลบด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวนจะคงที่ ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ฉนวน ระดับพลังงานในฉนวนจึงไม่เป็นแถบเรียบแต่จะมีความชันเกิดขึ้น โดยระดับพลังงานด้านที่สัมผัสกับโลหะจะต่ำกว่าด้านที่สัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวนจะโค้งงอ บริเวณนี้เรียกว่าย่านดีพลีทชัน (Depletion region) การโค้งงอของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของพาหะในย่านนี้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าลดลง

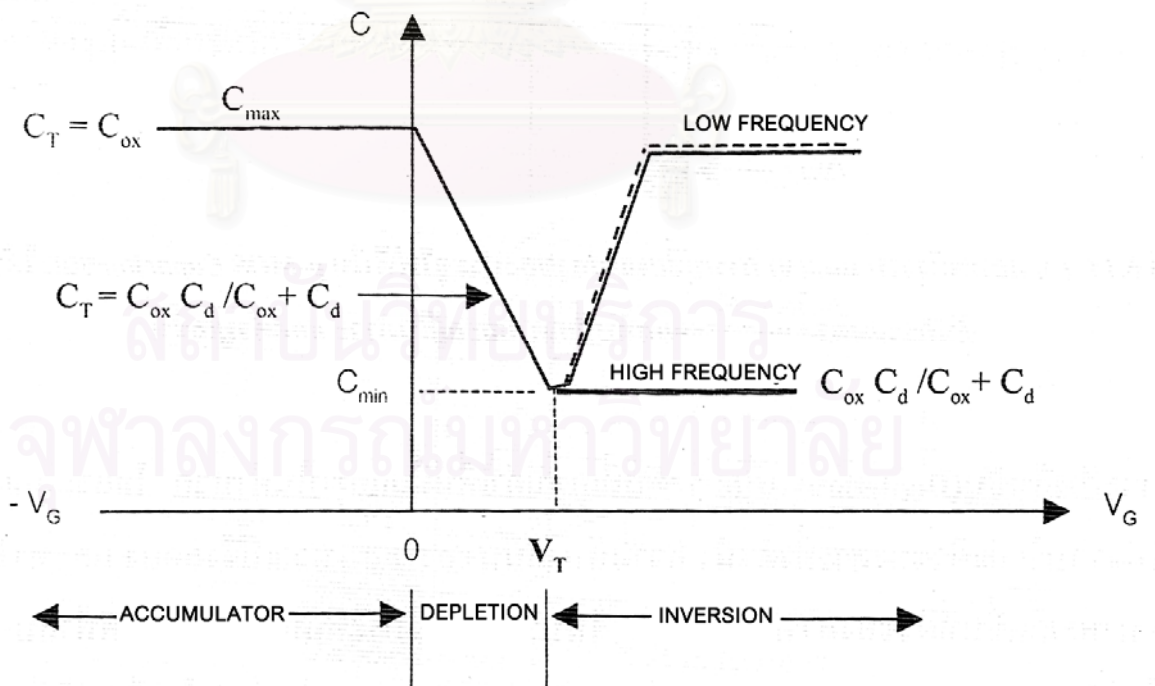
การโค้งงอของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และถ้ามีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นจะสามารถควบคุมการโค้งงอของแถบพลังงานได้ด้วยขนาดและทิศทางของแรงดันไฟฟ้า

2.3.3 สมบัติ C-V

โครงสร้าง MIS มีสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ จึงมีอีกชื่อเรียกว่าตัวเก็บประจุแบบ MOS (MOS Capacitor) โดยค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าสมบัติ C-V (C-V Characteristic) ความสัมพันธ์นี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของโครงสร้าง MIS ได้

สมบัติ C-V สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้เช่น ค่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage: V_T) ซึ่งเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่โลหะที่ทำให้ความหนาแน่นของความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด และค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดขณะที่อยู่ในภาวะแอกคิวิตูเมชันคือค่าความจุไฟฟ้าของฉนวน (Oxide capacitance: C_{ox}) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของชั้นฉนวนได้

หลักการของการวัดสมบัติ C-V คือป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับซ้อนให้แก่โครงสร้าง MIS แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ แรงดันกระแสตรงจะถูกเปลี่ยนไปอย่างช้าๆ ซึ่งจะทำให้ MIS มีการทำงานเข้าสู่ภาวะต่างๆ ดังนี้คือ แอกคิวิตูเมชัน ดีพลีทชัน และ อินเวอร์ชัน ซึ่งในภาวะที่แตกต่างกันนี้จะมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าในโครงสร้าง MIS แตกต่างกัน ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีค่าต่างกัน กราฟสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS แบบอุดมคติเมื่อมีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นดังรูปที่ 2.9



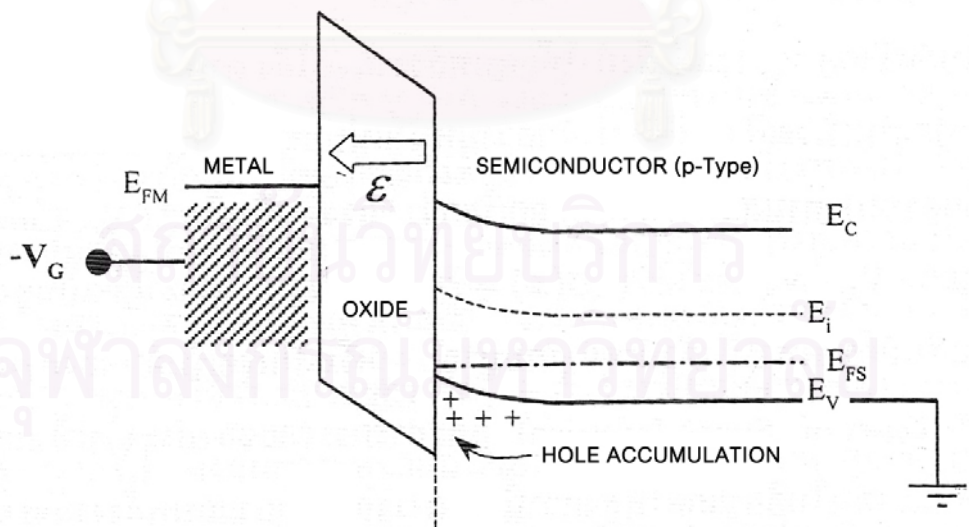
รูปที่ 2.9 กราฟสมบัติ C-V ในอุดมคติที่มีฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ภาวะที่แตกต่างกันเนื่องจากการกระจายตัวของประจุอธิบายได้ดังนี้

1. ภาวะแอคคิวมูเลชัน (Accumulation)

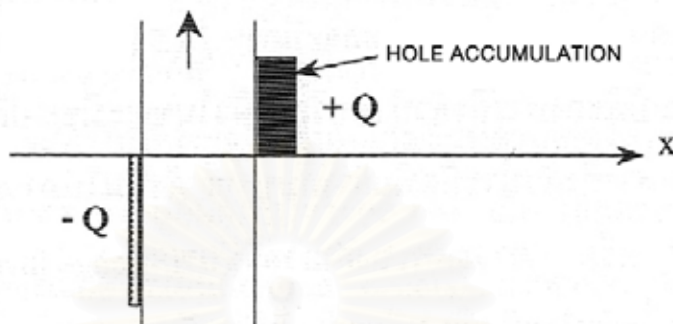
เมื่อโลหะได้รับแรงดันไฟฟ้าค่าลบจะทำให้มีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้นที่โลหะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับฉนวน ประจุไฟฟ้าลบจะกระจายอยู่ในช่วงแคบๆ มีลักษณะเหมือนเป็นแผ่นประจุ ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้โฮลซึ่งเป็นพาหะหลัก (Majority carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีเข้าไปสะสมที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ผิวสัมผัส ภาวะนี้จึงถูกเรียกว่า ภาวะการสะสม หรือ ภาวะแอคคิวมูเลชัน ประจุไฟฟ้าบวกและลบที่ขอบทั้งสองด้านของฉนวนจะมีค่าเท่ากันเพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า ความจุไฟฟ้ารวมของโครงสร้าง MIS ในภาวะนี้จะเหมือนกับความจุไฟฟ้าแบบแผ่นขนานของชั้นฉนวนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าคงที่

พิจารณาแถบพลังงานเมื่อฐานรองเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี พบว่าในภาวะแอคคิวมูเลชันเมื่อโลหะได้รับแรงดันไฟฟ้าเป็นลบ ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านโลหะจะสูงขึ้นและสูงกว่าด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานในฉนวนและในสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวนมีการโค้งงอ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ผิวสัมผัสและเมื่อห่างออกไปจากผิวสัมผัสความหนาแน่นจะมีค่าลดลง และในที่สุดความหนาแน่นโฮลจะมีค่าเท่ากับค่าเดิมก่อนได้รับแรงดันไฟฟ้า แสดงว่าความหนาแน่นของพาหะส่วนมากที่บริเวณผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ามากกว่าในเนื้อสาร คล้ายกับมีโฮลเข้ามาสะสมอยู่ในบริเวณนี้



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะแอคคิวมูเลชัน

เมื่อพิจารณาการกระจายของประจุไฟฟ้าจะพบว่า ด้านโลหะจะมีประจุไฟฟ้าลบอยู่ที่ผิวที่สัมผัสกับฉนวน ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกขนาดเท่ากันที่สารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวน ลักษณะการกระจายของประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ในภาวะแอกคิวิตูเลชัน

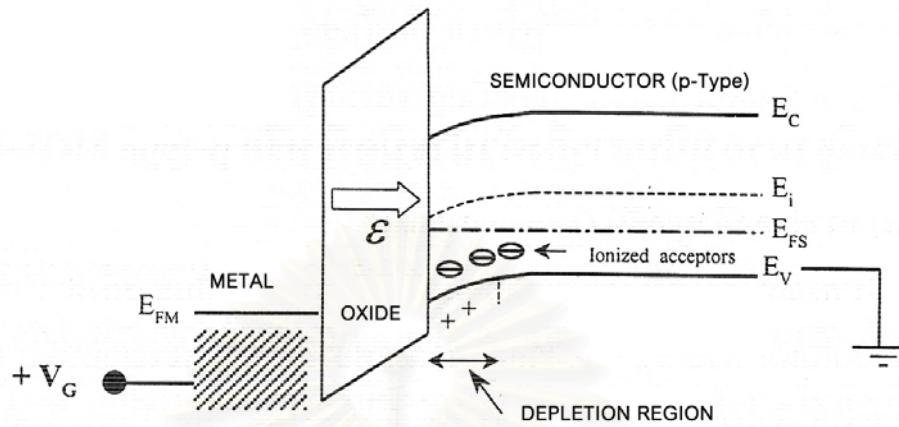
2. ภาวะดีพลีทชัน (Depletion)

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นบวก โดยมีค่าไม่สูงนักจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกที่โลหะบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับฉนวน ซึ่งส่งผลให้โฮลถูกผลักออกจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ ในบริเวณนี้จะประกอบไปด้วยประจุไฟฟ้าลบของอะตอมสารเจือผู้รับ (ionized acceptor) และเนื่องจากความหนาแน่นของโฮลลดลงจึงเรียกภาวะนี้ว่า ภาวะลดลง หรือ ภาวะดีพลีทชัน ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในภาวะนี้จะประกอบไปด้วยความจุไฟฟ้าของชั้นฉนวน (C_{ox}) และความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะ (C_D) ซึ่งต่อรวมกันแบบอนุกรม

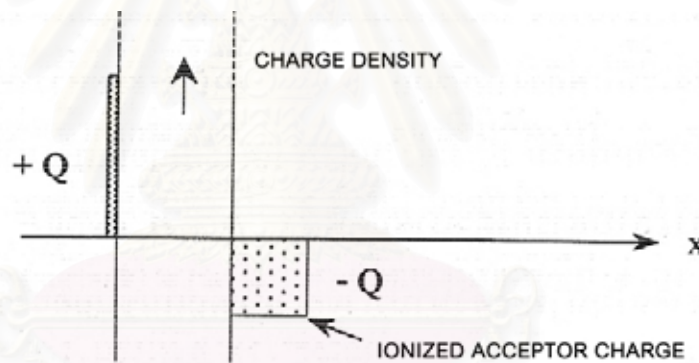
การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่โลหะจะทำให้ความหนาแน่นของประจุเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะเพิ่มขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะกว้างขึ้น ทำให้ความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะลดลง ดังนั้นความจุไฟฟ้ารวมจึงลดลง และลดลงจนต่ำที่สุดเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มเกิดภาวะอินเวอร์ชัน

เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะลดลง และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำเพียงเล็กน้อย ดังนั้นแถบพลังงานในชั้นฉนวนจะเอียงโดยมีความชันบวก ส่วนแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำบริเวณที่สัมผัสกับฉนวนจะมีลักษณะโค้งงอเล็กน้อยดังรูปที่ 2.12 นั่นคือความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าน้อยกว่าภายในสารกึ่งตัวนำ ในช่วงนี้จะมีประจุบวกเกิดขึ้นที่ด้านโลหะและทำให้โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำถูกผลักให้ห่างออกไป ซึ่งทำให้โฮลบนผิวของ

อะตอมสารเจือแสดงอำนาจไฟฟ้าลบบอกมา ลักษณะการกระจายตัวของประจุในภาวะนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ที่มีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีในภาวะดีพลีทชัน



รูปที่ 2.13 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ในภาวะดีพลีทชัน

3. ภาวะอินเวอร์ชัน (Inversion)

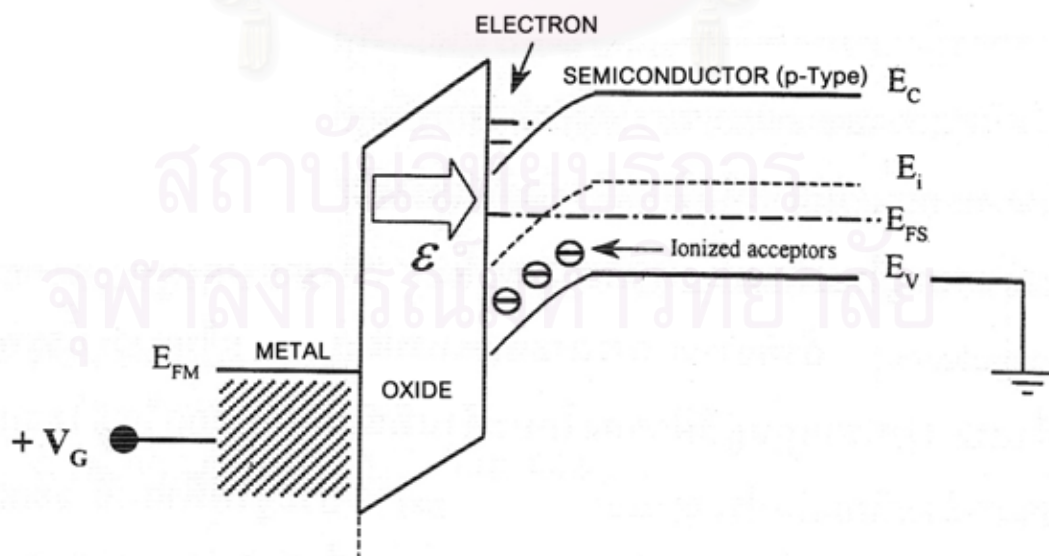
เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โหนดมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ภาวะอินเวอร์ชัน บริเวณหลอดพาหะจะมีความกว้างสูงสุดและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป แต่จะมีอิเล็กตรอนเข้ามาอยู่บริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำเป็นจำนวนมากและเกิดเป็นชั้นกลับ (Inversion layer) ที่จุดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างสมบูรณ์ โดยเปลี่ยนจากสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นชนิดเอ็น จึงเรียกภาวะนั้นว่า ภาวะเปลี่ยนกลับ หรือ ภาวะอินเวอร์ชัน

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิวจะเปลี่ยนแปลงตามความต่างศักย์ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำแบบเอกซิปิโบนีเยล ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะทำให้ประจุไฟฟ้าในชั้นกลับเปลี่ยนแปลงอย่างมาก

ในกรณีที่สัญญาณกระแสสลับมีความถี่ต่ำ อิเล็กตรอนในชั้นกลับสามารถตอบสนองได้ทันต่อการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าของฉนวนซึ่งต่ออนุกรมกับความจุไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำซึ่งมีค่าสูงมาก การเปลี่ยนแปลงประจุในสารกึ่งตัวนำจะเป็นการเปลี่ยนแปลงในชั้นกลับเท่านั้น ดังนั้นโครงสร้าง MIS จะเป็นเหมือนตัวเก็บประจุแบบธรรมดา โดยค่าความจุไฟฟ้ารวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเข้าสู่ค่า C_{ox} อีกครั้ง

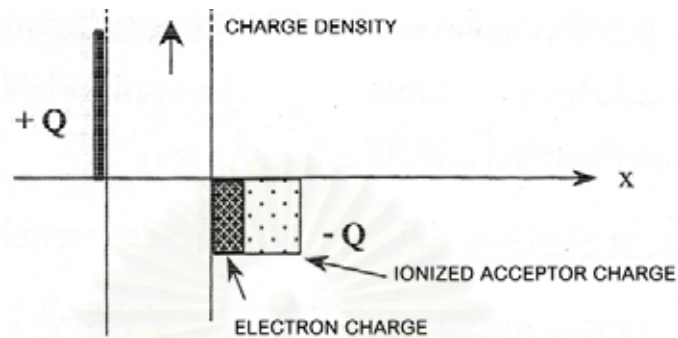
ในกรณีที่สัญญาณกระแสสลับมีความถี่สูง อิเล็กตรอนจะไม่สามารถตอบสนองได้ทันตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิวจะมีค่าคงที่ ทำให้ความหนาแน่นของความจุไฟฟ้ารวมเกิดจากความจุไฟฟ้าของฉนวนซึ่งต่ออนุกรมกับความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งความจุไฟฟ้าของบริเวณปลอดพาหะนี้จะมีค่าต่ำสุดเพราะเกิดขึ้นขณะที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าสูงสุดเช่นเดียวกับที่ภาวะดีพลีทชัน

เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าด้วยค่าบวกที่มากขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะจะต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำมากยิ่งขึ้น ความชันของการโค้งงอของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากขึ้น แสดงว่าค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ในที่สุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่โลหะมีค่าสูงเท่ากับแรงดันขีดเริ่ม แถบพลังงานจะโค้งงอ ดังรูปที่ 2.14



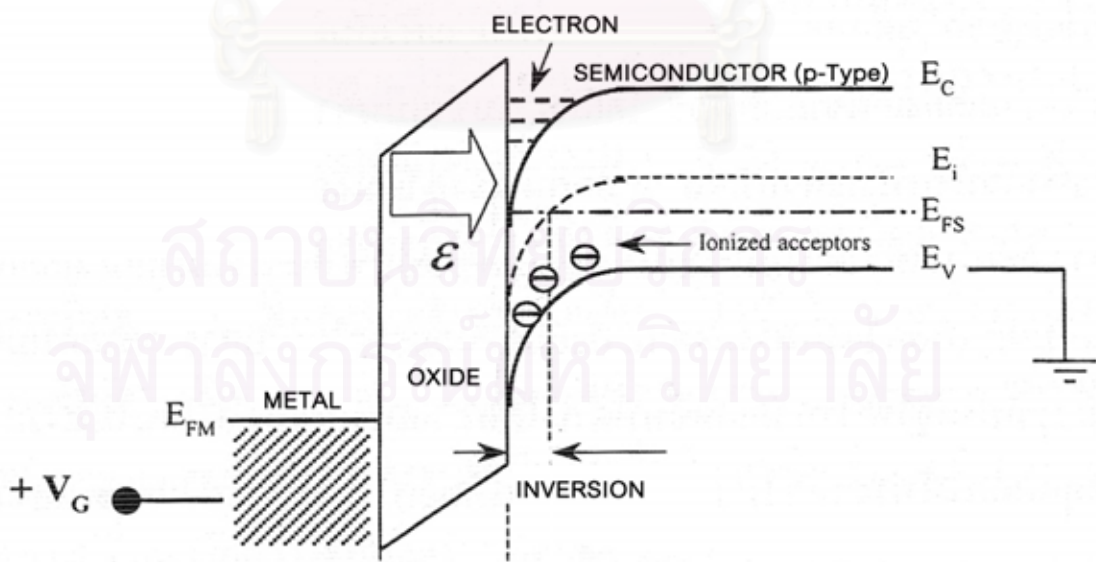
รูปที่ 2.14 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ในขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน

ภาวะนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างสมบูรณ์ หรือเป็นจุดเริ่มของการเกิด ภาวะสตรองอินเวอร์ชัน (Onset of strong inversion) ลักษณะการกระจายของประจุไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนผังแท่งประจุในโครงสร้าง MIS ขณะเริ่มเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน

ถ้าให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นการโค้งงอของแถบพลังงานจะมากขึ้นดังรูปที่ 2.16 สมบัติของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณผิวสัมผัสของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนกลับจากสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังนั้นภาวะนี้จึงถูกเรียกเป็น ภาวะเปลี่ยนกลับอย่างเต็มที่ หรือ ภาวะสตรองอินเวอร์ชัน (Strong inversion) ของโครงสร้าง MIS ชนิดพี



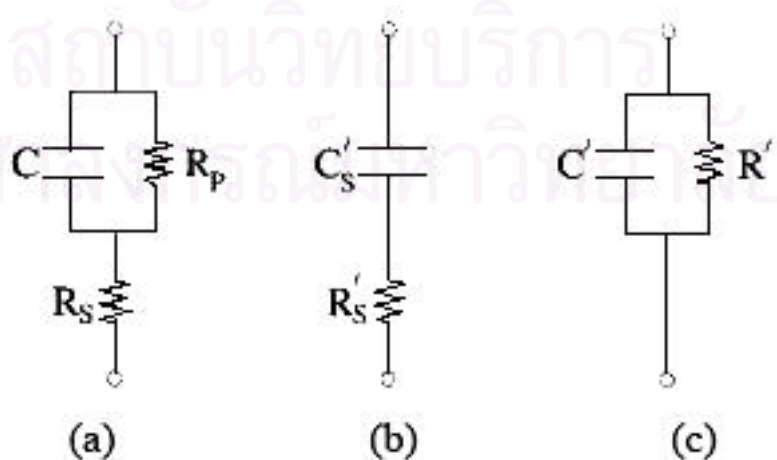
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานในโครงสร้าง MIS ในขณะเกิดภาวะสตรองอินเวอร์ชัน

2.3.3.1 ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่

เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการพัฒนาโครงสร้าง MIS ให้มีขนาดเล็กลง ความหนาของฉนวนที่ใช้ในโครงสร้างมีความบางมากขึ้น ทำให้การวัดสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ยากขึ้น เนื่องจากเมื่อความหนาของฉนวนน้อยลงจะเกิดกระแสรั่วผ่านฉนวน (Direct tunneling leakage current) เพิ่มมากขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการวัดสมบัติ C-V ที่ความถี่สูง ดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ (Frequency-dependent capacitance) [17]

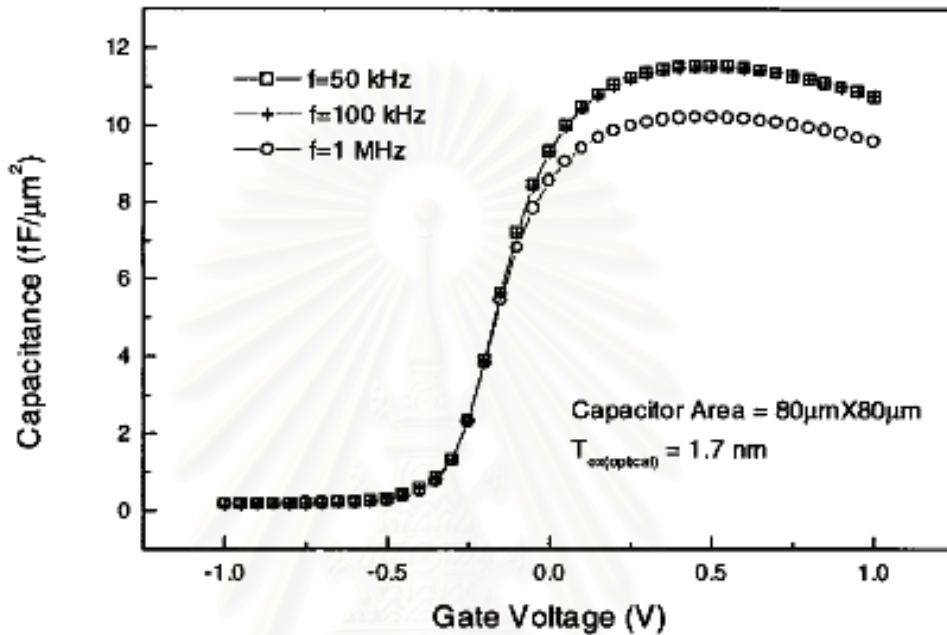
การแก้ปัญหาค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่สามารถทำได้โดยศึกษาสมบัติ C-V จากวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 2.17 (a) ซึ่งเป็นวงจรมีความเหมาะสมที่สุดในการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าสำหรับโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนบางและมีกระแสรั่ว เนื่องจากเป็นวงจรมีพิจารณาทั้งความต้านทานขนานซึ่งเกิดจากกระแสรั่วในฉนวน (R_p) และความต้านทานอนุกรมซึ่งเป็นความต้านทานของสารกึ่งตัวนำและโลหะ (R_s)

แต่โดยทั่วไปการตั้งค่าอุปกรณ์เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติ C-V จะมีวงจรไฟฟ้าที่ใช้แทนโครงสร้าง MIS เพียง 2 แบบดังรูปที่ 2.17 (b) และรูปที่ 2.17 (c) ซึ่งความแตกต่างกันของทั้ง 2 วงจรอยู่ที่ชนิดของความต้านทานที่ใช้ โดยวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2.17 (b) เป็นวงจรมีนิยมนำใช้ในการศึกษาสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนมีความหนาเพียงพอและกระแสรั่วมีค่าน้อย เนื่องจากพิจารณาเฉพาะความต้านทานอนุกรมของสารกึ่งตัวนำและโลหะ (R'_s) และไม่พิจารณาความต้านทานขนานซึ่งเกิดจากกระแสรั่ว ส่วนวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2.17 (c) เป็นวงจรมีนิยมนำใช้ในการศึกษาสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนบางและกระแสรั่วมีค่ามาก เนื่องจากพิจารณาเฉพาะความต้านทานขนานซึ่งเกิดจากกระแสรั่วในฉนวน (R') และไม่พิจารณาความต้านทานอนุกรมของสารกึ่งตัวนำและโลหะ



รูปที่ 2.17 วงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS

จากรูปที่ 2.18 แสดงสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ที่คำนวณได้จากการใช้วงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2.17 (c) ทำการทดลองโดย K.J. Yang [17] พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่และค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS จะลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระแสรั่วที่มีค่ามากขึ้น



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงสมบัติ C-V ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

เพื่อให้ได้ค่า C ที่ไม่ขึ้นกับความถี่จึงได้ทำการตั้งค่าอุปกรณ์เป็นแบบใช้วงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2.17 (c) โดยพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่ 2 ความถี่ที่แตกต่างกัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณดังสมการ

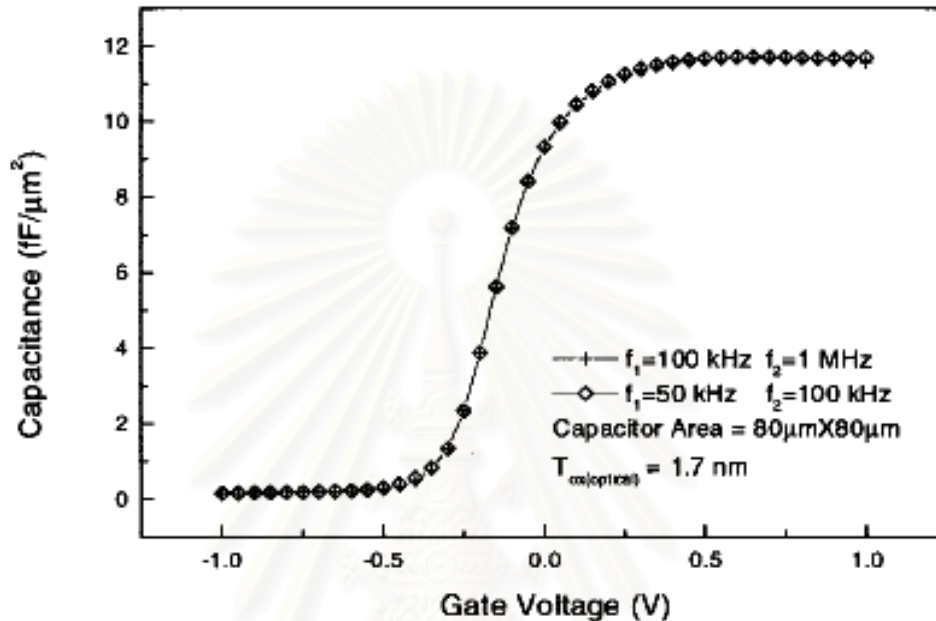
$$C = \frac{f_1^2 C_1' (1 + D_1'^2) - f_2^2 C_2' (1 + D_2'^2)}{f_1^2 - f_2^2} \quad 2.1$$

โดยค่า C_1' และ D_1' คือค่าความจุไฟฟ้า และค่า Dissipation ที่วัดได้จากความถี่ f_1

และค่า C_2' และ D_2' คือค่าความจุไฟฟ้า และค่า Dissipation ที่วัดได้จากความถี่ f_2

จะได้ค่า C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 2.17 (c) (C') และค่า Dissipation ($D' = \frac{1}{\omega R' C'}$) ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีนี้จะเปรียบเสมือนการคำนวณโดยใช้วงจร (a) แทนในโครงสร้าง MIS ซึ่งเป็นวงจรที่เหมาะสมที่สุดแต่ไม่สามารถเลือกตั้งค่าอุปกรณ์ได้

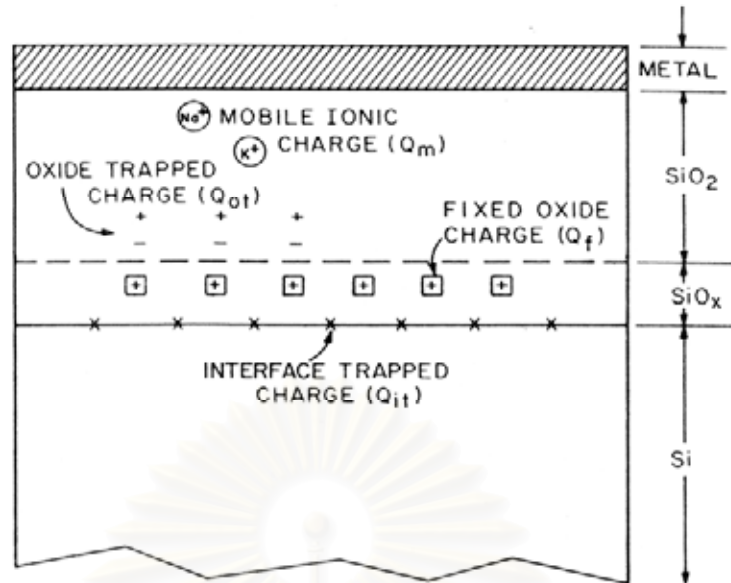
จากรูปที่ 2.19 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่เมื่อใช้วงจรไฟฟ้างรูปที่ 2.17 (c) และพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่ 2 ความถี่ที่แตกต่างกัน ทำการทดลองโดย K.J. Yang [17] โดยพิจารณาค่าความจุไฟฟ้าความถี่ 50 kHz กับ 100 kHz และ 100 kHz กับ 1 MHz พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากทั้ง 2 ค่าของความถี่ที่แตกต่างกันมีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงสมบัติ C-V ที่ไม่ขึ้นกับความถี่

2.3.3.2 ชนิดของประจุไฟฟ้าภายในฉนวน

เมื่อศึกษาถึงรายละเอียดของโครงสร้าง MIS พบว่าสมบัติ C-V จะมีการเปลี่ยนแปลงจากอุดมคติ ซึ่งเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่นการมีไอออนของอัลคาไลด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนของโซเดียม (Na^+) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าบวกและสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ภายในฉนวน (Mobile charge : Q_m) หรืออาจเกิดจากการมีประจุที่เคลื่อนที่ไม่ได้อยู่ในฉนวนและที่รอยต่อระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ โดยประจุต่างๆ เหล่านี้ได้แก่ ประจุนิ่งในฉนวน (Fixed charge : Q_f) ประจุกักตักในฉนวน (Oxide trapped charge : Q_{ot}) ประจุกักตักที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ (Interface-trapped charge : Q_{it}) ชนิดของประจุและตำแหน่งที่เกิดประจุภายในโครงสร้าง MIS แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยรายละเอียดของประจุแต่ละชนิดมีดังนี้ [18]



รูปที่ 2.20 ประจุไฟฟ้าต่างๆ ภายในชั้นฉนวน

1. ประจุที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile charge : Q_m)

ไอออนที่เคลื่อนที่ได้ในฉนวนส่วนใหญ่คือไอออนของอัลคาไลน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอออนของโซเดียม (Na^+) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก มักเกิดขึ้นได้ง่ายในกระบวนการสร้างโครงสร้าง MIS ไอออนเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ไปมาภายในฉนวนได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อมีสนามไฟฟ้าในฉนวน ไอออนจะสามารถเคลื่อนที่ข้ามฉนวนได้ นอกจากนี้หากมีไอออนอยู่ใกล้ผิวสัมผัสของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ก็จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบขึ้นที่สารกึ่งตัวนำได้ ทำให้สมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS เปลี่ยนแปลงไปจากอุดมคติ เช่นกราฟสมบัติ C-V จะเคลื่อนที่ไปทางด้านตรงข้ามกับแรงดันที่ให้แก่ฉนวน ดังนั้นแรงดันขีดเริ่มบนกราฟจึงเลื่อนไปจากเดิม อาจแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการให้แรงดันไฟฟ้าลบที่ฉนวน

การลดปริมาณประจุบวกที่เกิดจากไอออนของโซเดียมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การรักษาความสะอาดขณะทำการสร้างฉนวน การสร้างโครงสร้าง MIS ในห้องสะอาด (Clean room) การใช้สารเคมี น้ำ และอุปกรณ์การทดลองที่สะอาด นอกจากนี้การเติมคลอรีนในปริมาณเพียงเล็กน้อยขณะทำการสร้างฉนวน จะทำให้ได้ฉนวนที่สะอาดและมีปริมาณของไอออนที่น้อยลง แต่เป็นเรื่องยากที่จะทำให้หมดไป

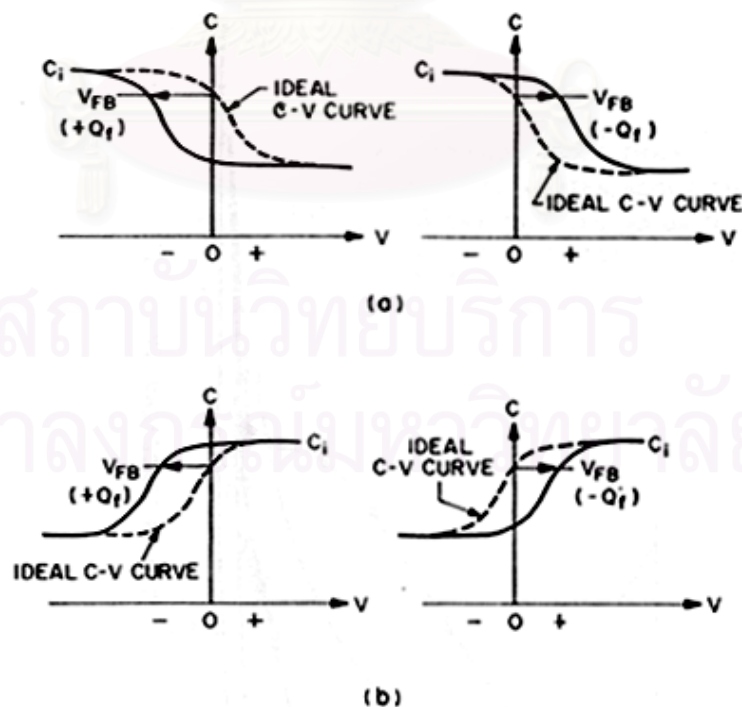
2. ประจุนิ่งในฉนวน (Fixed charge : Q_f)

ประจุนิ่งในฉนวนหมายถึงประจุซึ่งเคลื่อนที่ไม่ได้ เป็นประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและอยู่ในฉนวน โดยอยู่ห่างจากผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำประมาณ 3 nm ความหนาแน่นของประจุจะไม่ขึ้นกับความหนาของฉนวน ไม่ขึ้นกับชนิดหรือจำนวนของสิ่งปนเปื้อนของชั้นสารกึ่งตัวนำ แต่จะขึ้นกับภาวะในการออกซิเดชัน ภาวะในการแอนนัล และขึ้นกับทิศทางการจัด

เรียงตัวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งคาดว่าประจุหนึ่งในฉนวนเหล่านี้คือไตรวาเลนต์ซิลิคอน (Trivalent silicon) หรือ นอนบริดจิง ออกซิเจน (Nonbridging oxygen) ที่อยู่บริเวณรอยต่อของชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์กับซิลิคอน ประจุนี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยอะตอมของซิลิคอนเคลื่อนตัวแยกออกไปจากผิวผลึกซิลิคอนเพื่อทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจน อะตอมซิลิคอนเหล่านี้จะมีสภาพเป็นไอออน เมื่อกระบวนการออกซิเดชันเสร็จสิ้น ไอออนของซิลิคอนเหล่านี้จะยังคงเหลืออยู่ใกล้ๆ กับผิวสัมผัสของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอน โดยไอออนนี้มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกและไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้เกิดเป็นชั้นทรานซิชั่นบางๆ อยู่ระหว่างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอน

หากประจุอยู่ใกล้กับผิวสัมผัสของซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอนจะทำให้มีผลกระทบต่อสมบัติ C-V มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ประจุนี้มีผลกระทบน้อยกว่าประจุของไฮโดรเจน ไอออนซึ่งเคลื่อนที่ได้ และการแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการแอนนัลชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน และไนโตรเจน ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

รูปที่ 2.21 แสดงการเลื่อนของสมบัติ C-V ไปตามแกนของแรงดันไฟฟ้าเมื่อในฉนวนมีประจุที่เป็นบวกและลบตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับสมบัติ C-V แบบอุดมคติซึ่งถือว่าไม่มีประจุ ถ้าประจุเป็นบวกจะทำให้กราฟ C-V เลื่อนไปทางค่าที่เป็นลบ ในขณะที่ประจุที่เป็นลบจะทำให้กราฟ C-V เลื่อนไปทางค่าที่เป็นบวกมากขึ้น

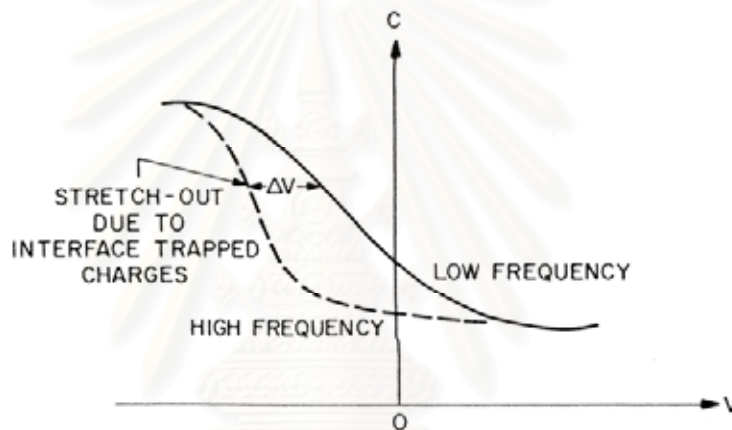


รูปที่ 2.21 กราฟ C-V ที่เลื่อนไปตามแกนของแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากมีประจุชนิดบวกหรือลบ

สำหรับเซมิคอนดักเตอร์ชนิด (a) p-type (b) n-type

3. ประจุกับดักที่ผิวสัมผัส (Interface-trapped charge : Q_{it})

ประจุกับดักที่ผิวสัมผัสเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอน เกิดขึ้นเนื่องจากมีปริมาณของอะตอมออกซิเจนที่มากเกินไปหรืออะตอมแปลกปลอมที่ผิวสัมผัส สามารถดักจับได้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ประจุเหล่านี้แม้มีจำนวนเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่อคุณสมบัติของโครงสร้าง MIS อย่างมาก พิจารณาได้จากสมบัติ C-V ที่เปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.22 นั่นคือเมื่อพิจารณาสมบัติ C-V ที่ความถี่สูง ซึ่งประจุกับดักที่ผิวจะไม่สามารถเคลื่อนที่ตามกระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงได้ จึงทำให้กราฟเลื่อนจากสมบัติ C-V ที่พิจารณาที่ความถี่ต่ำไปทางค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นลบ เนื่องจากที่ความถี่สูง วิธีการลดประจุเหล่านี้สามารถทำได้โดยการแอนนัลที่อุณหภูมิประมาณ 450°C ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน



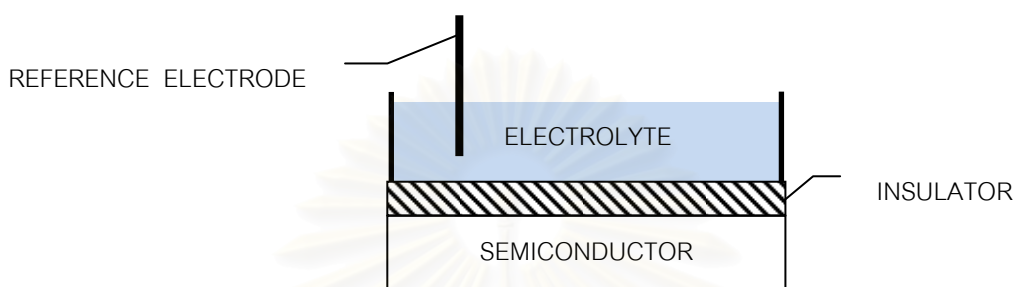
รูปที่ 2.22 กราฟสมบัติ C-V เมื่อมีประจุกับดักที่ผิว

4. ประจุกับดักในฉนวน (Oxide trapped charge : Q_{ot})

ประจุชนิดนี้เป็นประจุวกที่เกี่ยวข้องกับตำหนิ (Defect) ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นเนื่องจากแสงเพราะเมื่อมีโฟตอน (Photon) ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำ ตกกระทบฉนวนจะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนมีสภาพคล่อง (Mobility) สูงกว่าโฮล อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ออกไปเหลือไว้แต่โฮลที่ถูกดักอยู่ในชั้นฉนวนออกไซด์ ประจุนี้มีผลให้สมบัติ C-V เลื่อนไปจากแนวเดิม โดยกราฟของ C-V จะเลื่อนไปทางค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นลบ ประจุนี้สามารถทำให้หมดไปได้โดยการแอนนัลที่อุณหภูมิประมาณ 400°C ภายหลังจากการฉายแสงทุกครั้ง

2.4 โครงสร้าง EIS

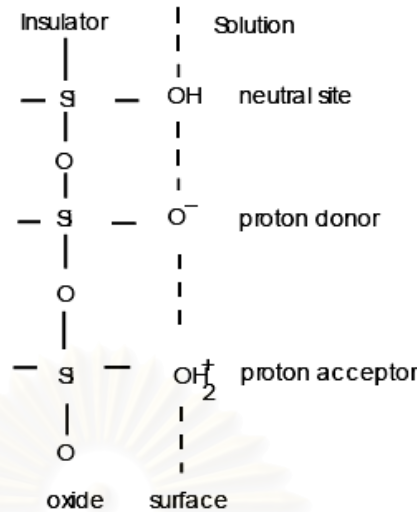
โครงสร้าง EIS เป็นโครงสร้างที่ปรับปรุงจากโครงสร้าง MIS โดยลอกโลหะออกเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง (Reference electrode) แล้วนำไปแช่ในสารละลาย ให้บริเวณฉนวนสัมผัสกับสารละลายดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงสร้าง EIS พื้นฐาน

ที่ผิวของฉนวนจะประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล [19] ซึ่งโดยปกติจะมีความสมดุลทางเคมี เพราะจะจับกับไอออนของสารละลายที่มาสัมผัส ตัวอย่างเช่นในกรณีของฉนวนที่เป็นซิลิคอน ไดออกไซด์จะมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็น SiOH โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของฉนวนเหล่านี้สามารถที่จะรับหรือให้โปรตอนกับสารละลายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 จะเห็นว่าปฏิกิริยาสมดุลสามารถเกิดขึ้นระหว่างโปรตอนในสารละลายและหมู่ไฮดรอกซิลที่รวมตัวกันที่รอยต่อของซิลิคอนไดออกไซด์กับสารละลาย และกลไกการตอบสนองของประจุออกไซด์ที่ผิวสามารถอธิบายได้จากสมดุลทางเคมีที่ผิวของ SiOH ซึ่งเป็นได้ทั้งกรดและเบส (Amphoteric) และไอออนของไฮโดรเจนในสารละลาย เมื่อฉนวนเชื่อมต่อกับสารละลาย การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่ผิว

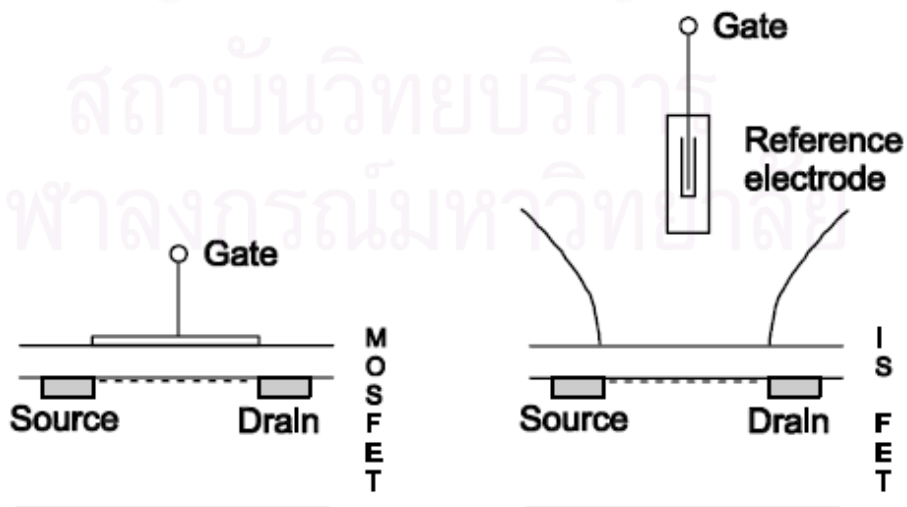
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.24 สมดุลระหว่างผิวที่เป็นได้ทั้งกรดและเบสของ SiOH

2.5 อุปกรณ์ ISFET

หลักการทำงานของอุปกรณ์ไอส์เฟต (ISFET: Ion Sensitive Field Effect Transistor) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือโครงสร้าง EIS สามารถอธิบายได้โดยการเปรียบเทียบกับอุปกรณ์มอสเฟต (MOSFET: Metal Oxide Field Effect Transistor) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือโครงสร้าง MIS [19] ซึ่งความแตกต่างระหว่างอุปกรณ์ทั้ง 2 แสดงได้ดังรูปที่ 2.25 โดยอุปกรณ์ไอส์เฟตเกิดจากอุปกรณ์มอสเฟตที่ถูกแยกเกตโลหะออกจากตัวอุปกรณ์เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง แล้วนำไปแช่ในสารละลาย โดยบริเวณซอส (Source) กับเดรน (Drain) ถูกห่อหุ้มอย่างมิดชิด มีเฉพาะบริเวณฉนวนซึ่งเรียกว่าเกตออกไซด์เท่านั้นที่สัมผัสกับสารละลาย



รูปที่ 2.25 แผนภาพโครงสร้างของอุปกรณ์มอสเฟตและไอส์เฟต

สำหรับทั้ง 2 อุปกรณ์ขณะที่อยู่ในช่วงไม่อิ่มตัว (non-saturated) ค่าของกระแส (I_d) จะขึ้นอยู่กับค่าการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนในชั้นอินเวอร์ชัน (μ) ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์ และอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของช่องทางเดินของกระแส นอกจากนั้นยังขึ้นกับค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับสมบัติของวัสดุเช่นฟังก์ชันงาน (Φ)

ค่าแรงดันขีดเริ่มสำหรับอุปกรณ์มอสเฟตจะมีความคงที่ ส่งผลให้กระแส (I_d) จะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่เกต (V_{gs}) เพียงอย่างเดียว เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างซอสกับเดรน (V_{ds}) มีค่าคงที่ สำหรับอุปกรณ์อีเอสเฟตค่าแรงดันขีดเริ่มจะเปรียบเทียบได้จากศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายกับเกตออกไซด์กับขั้วอ้างอิง ซึ่งศักย์ไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างเกตออกไซด์กับสารละลายจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเกตออกไซด์สัมผัสกับสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน ทำให้สามารถหาค่าการตอบสนองจากการพิจารณาค่าแรงดันขีดเริ่มได้

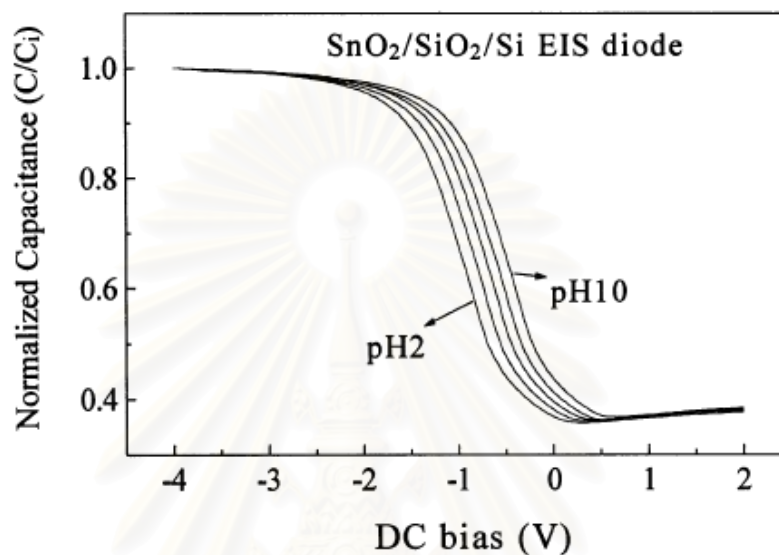
ในการออกแบบอุปกรณ์อีเอสเฟตเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองที่สูงที่สุด และสามารถเลือกที่จะตอบสนองเฉพาะไอออนที่ต้องการ จะต้องศึกษาบริเวณรอยต่อระหว่างเกตออกไซด์กับสารละลาย เพื่อที่จะสามารถเลือกวัสดุที่มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเกตออกไซด์ ซึ่งไม่ใช่ซิลิคอนไดออกไซด์เหมือนที่ใช้กับอุปกรณ์มอสเฟต

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปการหาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส (pH sensitivity) มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น 1) การพิจารณาจากการเลื่อนของกราฟแสดงสมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่อยู่ในสารละลายเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสที่แตกต่างกัน 2) การพิจารณาจากค่าแรงดันขีดเริ่มที่เปลี่ยนแปลงไป โดยศึกษาจากสมบัติ $I_{DS}-V_{GS}$ ของอุปกรณ์อีเอสเฟตที่อยู่ในสารละลายเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรด-เบสที่แตกต่างกัน และ 3) พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จริงเมื่ออุปกรณ์อีเอสเฟตอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน

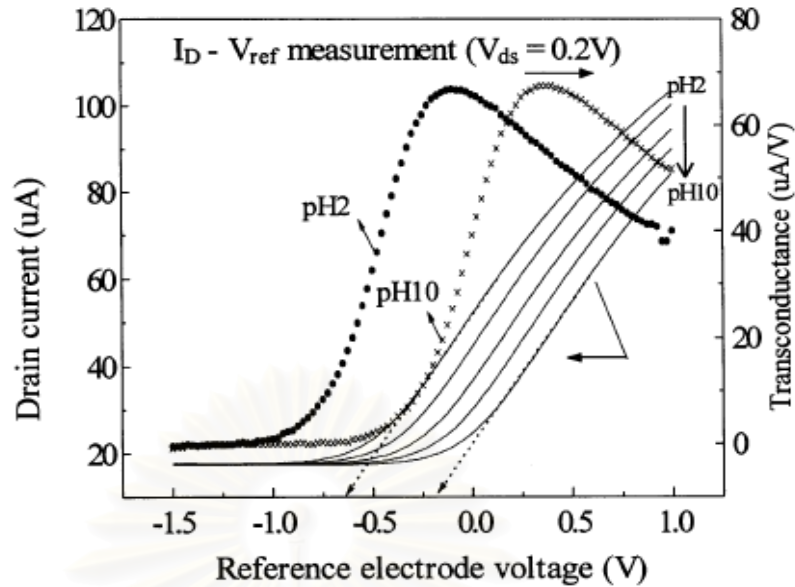
ในปี 1998 H.K. Liao และคณะ [8] ได้ทดลองนำฟิล์มทินออกไซด์ (SnO_2) ซึ่งปลูกด้วยเทคนิคการระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) มาใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของอุปกรณ์อีเอสเฟต โดยได้ศึกษาถึงค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส (pH response) การเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่อทำการวัดอย่างต่อเนื่อง (Drift) การเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่อทำการวัดย้อนกลับ (Hysteresis) และเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส (Time response) และโดยสร้างโครงสร้าง EIS และอุปกรณ์อีเอสเฟตที่มีเมมเบรนซึ่งสัมผัสกับสารละลายเป็นฟิล์มทินออกไซด์หนา 150 nm ปลูกบนฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm ที่อยู่บนฐานรองเป็นซิลิคอน (100) ชนิดพี โดยใช้ความดัน 6×10^{-5} torr และอุณหภูมิที่ฐานรองเท่ากับ 200°C หลังจากนั้นศึกษาสมบัติ C-V ของ

โครงสร้าง EIS โดยใช้เครื่อง HP 4284A LCR และศึกษาสมบัติ I-V ของอุปกรณ์ไอส์เฟต โดยใช้เครื่อง HP 4145B Semiconductor Parameter Analyzer ในสารละลายค่าความเป็นกรด-เบส 2 4 6 8 และ 10 กราฟสมบัติ C-V ที่ได้เป็นดังรูปที่ 2.26 พบว่าได้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 58 mV/pH



รูปที่ 2.26 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีทินออกไซด์เป็นฉนวน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เดรน (I_D) กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอ้างอิง (V_{ref}) เป็นดังรูปที่ 2.27 พบว่าค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสสามารถหาได้จากการพิจารณาค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ที่เลื่อนออกไปเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ระหว่าง 2-10 และพบว่าค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของอุปกรณ์ไอส์เฟตที่มีทินออกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนมีค่าเท่ากับ 58 mV/pH และเมื่อพิจารณาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของอุปกรณ์ไอส์เฟตที่มีซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ซึ่งสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบพบว่าได้ค่า 34 และ 49 mV/pH ตามลำดับ

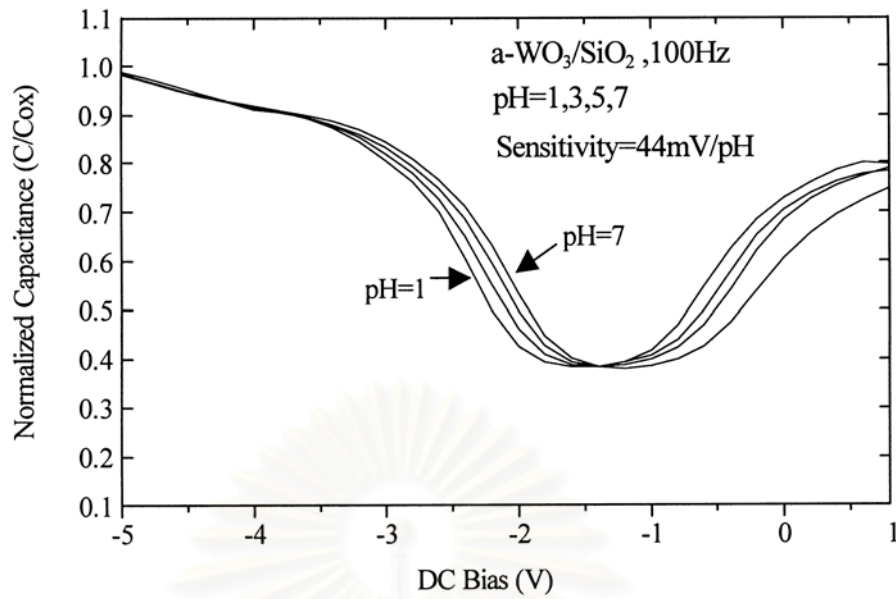


รูปที่ 2.27 สมบัติ $I_D - V_{ref}$ ของอุปกรณ์ออสเฟตที่มีทินออกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 9 วัน พบว่าได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป 28 mV และการเปลี่ยนแปลงของค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่อทำการวัดย้อนกลับ โดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความเป็นกรด-เบส $7 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 7$ พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.5 mV และพบว่าเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของอุปกรณ์ออสเฟตมีค่าน้อยกว่า 0.1 s

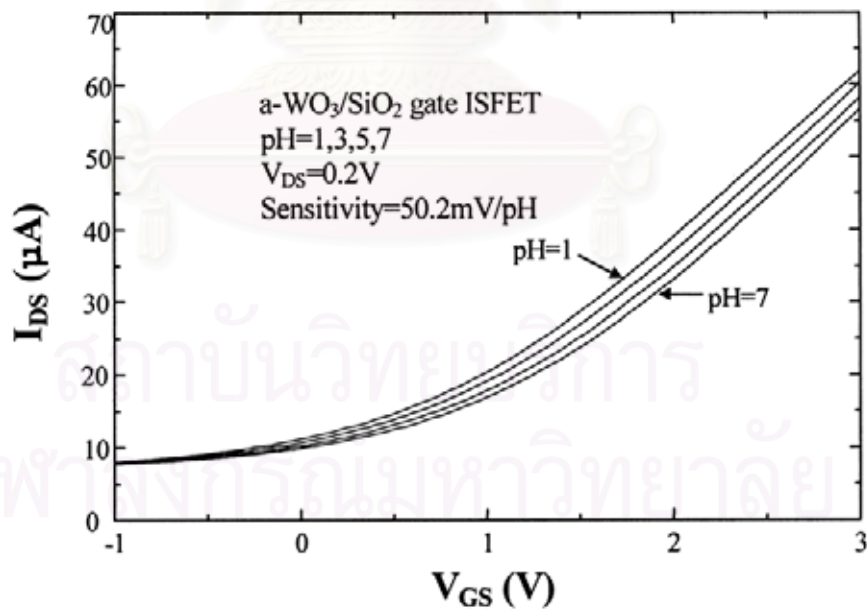
ในปี 2000 J.C. Chou และคณะ [20] ได้ศึกษาความสามารถในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางทังสเตนไดรอกไซด์ ($a-WO_3$) ที่ปลูกลงบนฐานรองด้วยเทคนิคอาร์ เอพ สปัตเตอริง โดยใช้เป้าทังสเตนไดรอกไซด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 in. ความบริสุทธิ์ 99.99% ที่ความดัน 30 mTorr ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและออกซิเจน

ในงานนี้โครงสร้าง EIS ถูกสร้างลงบนฐานรองซิลิคอน (100) ชนิดพี ซึ่งมีความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์ 100 nm เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติ C-V ด้วยเครื่อง HP 4284A LCR Parameter Analyzer โดยใช้แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง +5.0 ถึง +1.0 V และพบว่าสมบัติ C-V ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 1-7 ได้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 44 mV/pH ดังแสดงในรูปที่ 2.28 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเร็วมาก และพบว่าฟิล์มบางทังสเตนไดรอกไซด์จะสลายไปอย่างรวดเร็วในสารละลายที่เป็นเบส



รูปที่ 2.28 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นฉนวน

นอกจากนี้ยังใช้เครื่อง HP 4145B Semiconductor Parameter Analyzer ในการหาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่ออุปกรณ์ไอส์เฟตอยู่ในสภาวะละลายค่าความเป็นกรด-เบส 1 3 5 และ 7 พบว่าได้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสมีค่าเท่ากับ 50.2 mV/pH ดังแสดงในรูปที่ 2.29

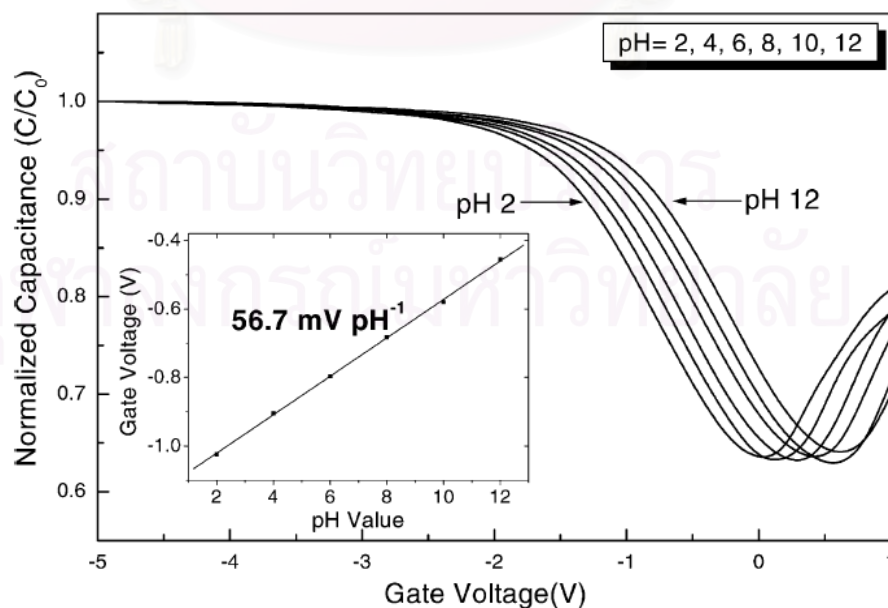


รูปที่ 2.29 สมบัติ I_D - V_{GS} ของอุปกรณ์ไอส์เฟตที่มีฟิล์มบางทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

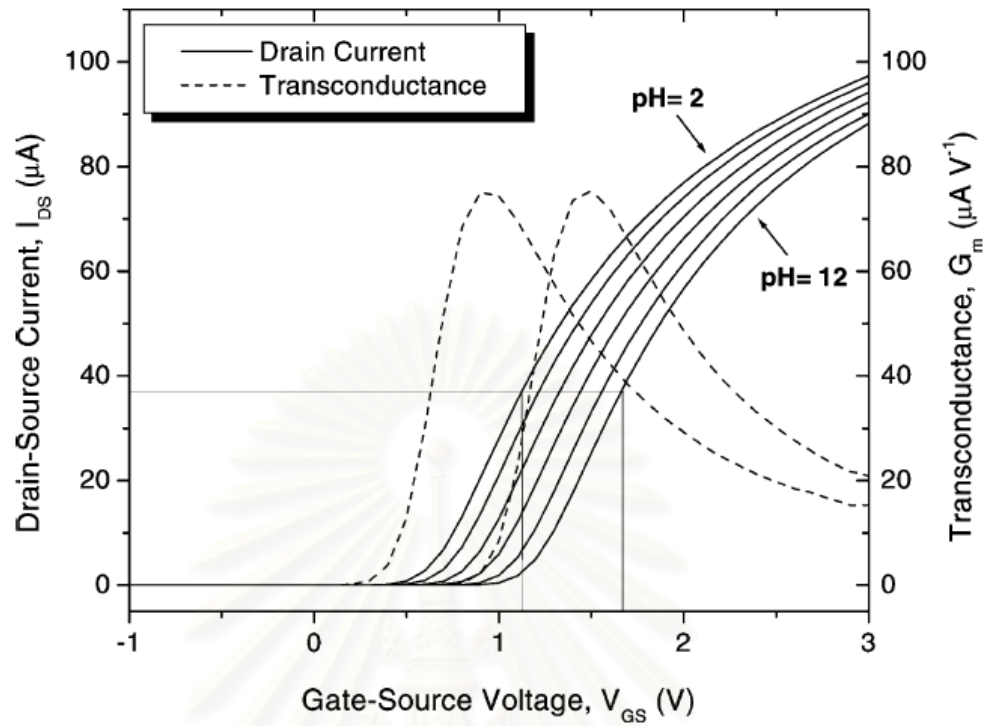
ในปี 2002 S.S. Jan และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาความสามารถของเลดไทเทเนต (PbTiO_3) เมื่อนำมาใช้งานเป็นเมมเบรนที่ตอบสนองต่อไอออนของอุปกรณ์อีเสเพด โดยสร้างโครงสร้าง EIS เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับที่ผิว ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส และความสามารถในการทนกรด-เบส ศึกษาสมบัติ I-V จากอุปกรณ์อีเสเพดที่มีเลดไทเทเนตเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเพื่อพิจารณาสมบัติทางไฟฟ้าและค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของอุปกรณ์ นอกจากนั้นยังทำการศึกษาคูณภูมิที่ใช้ในการแอนนีสเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสที่ดีที่สุดและมีค่ากระแสรั่วที่น้อยที่สุด และศึกษาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อีเสเพดที่ใช้งานจริง

เลดไทเทเนตหนา 500 nm ถูกปลูกลงบนซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm ที่อยู่บนฐานรองที่เป็นซิลิคอน (100) ชนิดพี เพื่อสร้างเป็นโครงสร้าง EIS และศึกษาสมบัติ C-V ด้วยเครื่อง HP4284A LCR parameter analyzer เมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายค่าความเป็นกรด-เบส 2-12 จากกราฟสมบัติ C-V ดังรูปที่ 2.30 พบว่าค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 56.7 mV/pH นอกจากนั้นยังพบว่าที่รอยต่อระหว่างสารละลายและเลดไทเทเนตมีการดูดซับที่ดีมาก และเลดไทเทเนตมีความทนทานต่อกรดและเบสที่เข้มข้น

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เดรน (I_D) กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอ้างอิง (V_{GS}) ของอุปกรณ์อีเสเพดพบว่ากราฟจะเลื่อนไปเมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกันดังรูปที่ 2.31 ได้ค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 56.6 mV/pH และเมื่อศึกษาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเมื่อสร้างเป็นอุปกรณ์อีเสเพดที่ใช้งานจริงพบว่ามีความเท่ากับ 58.1 mV/pH



รูปที่ 2.30 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีเลดไทเทเนตเป็นฉนวน



รูปที่ 2.31 สมบัติ I_D - V_{GS} ของอุปกรณ์ไอส์เฟตที่มีเลดไทเทเนตเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์จากเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

ศึกษาการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ ที่ปลูกโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไว้ปฏิกิริยาลงบนแผ่นซิลิคอนและกระจกสไลด์ โดยขั้นตอนการใช้เครื่อง อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แสดงในภาคผนวก ก

3.1.1 ความหนาของฟิล์ม

เมื่อมีการเปลี่ยนเป้าโลหะและทำความสะอาดภายในภาชนะของระบบสปีดเตอริง อาจส่งผลให้ Thickness monitor ซึ่งใช้ในการอ่านค่าความหนาของฟิล์มที่ปลูกภายในแชมเบอร์ของระบบสปีดเตอริง อ่านค่าความหนาไม่ตรงกับความหนาที่แท้จริง จึงต้องทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของ Thickness monitor และปรับค่าให้ Thickness monitor สามารถอ่านค่าที่แท้จริงของฟิล์มที่กำลังปลูกภายในแชมเบอร์ได้ถูกต้อง

ทำการศึกษาความหนาของฟิล์มที่ปลูกโดยใช้ภาวะดังตารางที่ 3.1 โดยปลูกฟิล์มดังกล่าวลงบนแผ่นซิลิคอน 2 แผ่นในการปลูกครั้งเดียวกัน ขั้นตอนการปลูกฟิล์มเพื่อศึกษาความหนามีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการปลูกฟิล์มเพื่อศึกษาความหนาของฟิล์ม

Ar Flow Rate (sccm)	12
N ₂ Flow Rate (sccm)	7
Timing [Ar (sec) : N ₂ (sec)]	Al, 10:30, 10:60, 10:90
Power (W)	200
Thickness (nm)	100, 100, 100, 100
Deposition Rate (nm/sec)	0.94

sccm: standard cubic centimeter per minute

1. เตรียมแผ่นซิลิคอนดังรายละเอียดในภาคผนวก ก และติดเทปกาวลงบนแผ่นซิลิคอน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นซิลิคอนก่อนปลูกฟิล์ม

2. วางแผ่นซิลิคอนลงในแชมเบอร์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การวางแผ่นซิลิคอนภายในภาชนะ

3. ปลูกฟิล์มที่ภาวะดังตารางที่ 3.1 อ่านค่าความหนาจาก Thickness monitor ให้ได้ ความหนารวม 400 nm ซึ่งประกอบด้วยฟิล์มอะลูมิเนียมหนา 100 nm ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ ที่ Timing [Ar (sec) : N₂(sec)] เท่ากับ 10:30 10:60 และ 10:90 หนาชั้นละ 100 nm เพื่อทดสอบ โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการปล่อยแก๊ส

4. ลอกเทปกาวบนแผ่นซิลิคอนออกดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผ่นซิลิคอนหลังปลูกฟิล์ม

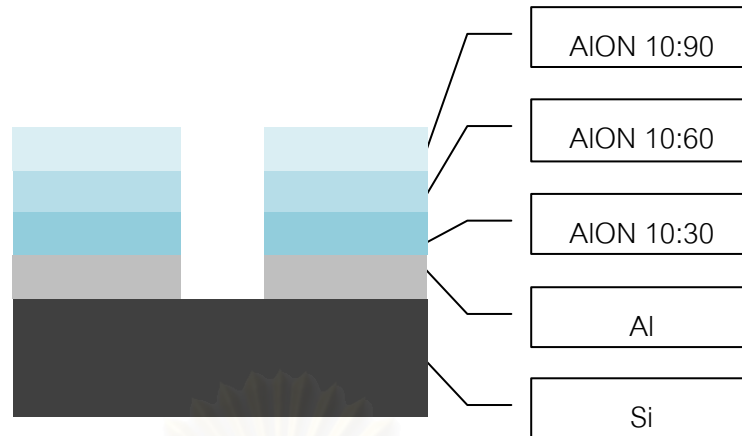
5. ศึกษาความหนาของฟิล์มดังกล่าวด้วยเครื่อง Surface profiler (Tencor รุ่น P-10) ดังรูปที่ 3.4 และเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (Hitachi รุ่น S-4700) ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้เครื่อง Surface profiler ในการตรวจสอบความสูงต่ำของผิวหน้าของฟิล์มในรูปที่ 3.6 และใช้เครื่อง SEM ในการศึกษาภาพตัดขวางของฟิล์มดังรูปที่ 3.7



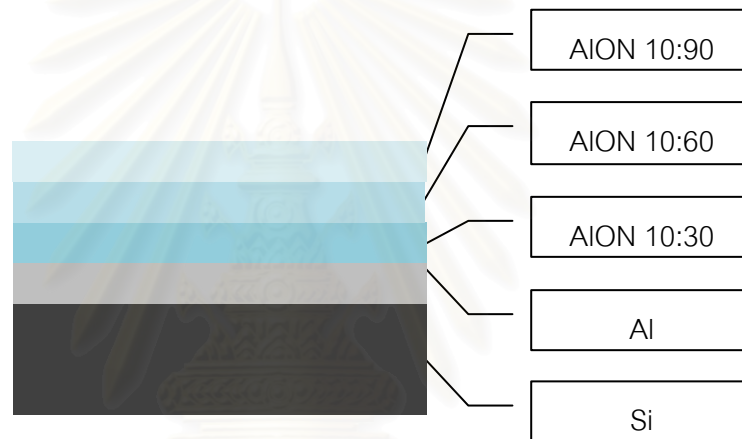
รูปที่ 3.4 เครื่อง Surface profiler



รูปที่ 3.5 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 3.6 ลักษณะของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนด้วยภาวะในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 ภาพตัดขวางของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนด้วยภาวะในตารางที่ 3.1 ที่ใช้ในการศึกษาความหนาด้วย SEM

6. นำความหนาของฟิล์มที่ได้จากทั้ง 2 เทคนิคมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาที่อ่านได้จาก Thickness monitor ของเครื่องสปีดเตอร์ริง เพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนของ Thickness monitor และปรับเพื่อให้สามารถอ่านค่าได้ตรงกับความหนาจริง โดยค่า Tooling factor ของ Thickness monitor ที่เหมาะสม สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Tooling factor} = T_m / T_{ind} \quad 3.1$$

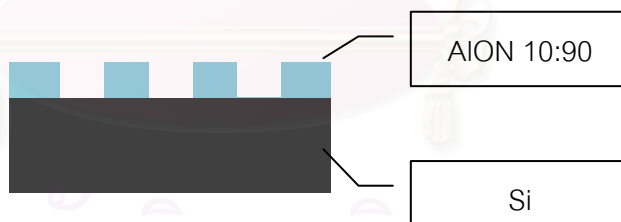
โดย T_m คือ ความหนาของฟิล์มที่วัดได้จริง
 T_{ind} คือ ความหนาของฟิล์มที่อ่านได้จาก Thickness monitor

7. เมื่อทำการปรับค่า Tooling factor ของ Thickness monitor แล้ว ทำการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรต์หนา 100 nm ลงบนแผ่นซิลิคอนอีกครั้ง เพื่อใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของค่า Tooling Factor ที่คำนวณได้ว่าสามารถทำให้ความหนาของฟิล์มที่อ่านได้จาก Thickness monitor ตรงกับความหนาของฟิล์มที่วัดได้จริงหรือไม่ โดยเตรียมตัวอย่างตามข้อที่ 1-4 และใช้ภาวะในการปลูกฟิล์มดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะในการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์

Ar Flow Rate (sccm)	12
N ₂ Flow Rate (sccm)	7
Timing [Ar (sec) : N ₂ (sec)]	10:90
Power (W)	200
Thickness (nm)	100
Deposition Rate (nm/sec)	0.94

8. ศึกษาความหนาของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนดังรูปที่ 3.8 จำนวน 3 แผ่นในการปลูกครั้งเดียวกัน โดยนำฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนทั้งหมดมาตรวจสอบความสูงต่ำของผิวหน้าด้วยเครื่อง Surface profiler



รูปที่ 3.8 ลักษณะของฟิล์มที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอนด้วยภาวะในตารางที่ 3.2

3.1.2 ความสม่ำเสมอของฟิล์ม

การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค แมกนีตรอน สเปตเตอริง มีจุดเด่นมากกว่าการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคอื่น เพราะการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคนี้จะสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่งได้ (Uniformity)

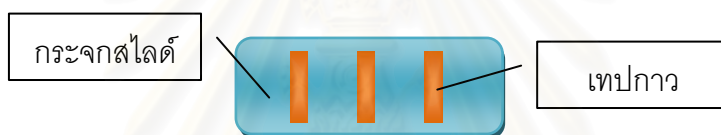
ความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่ง เมื่อปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไว้ปฏิบัติการ

ตรวจสอบได้จากความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกบนกระจกสไลด์ 9 แผ่น ในการปลูก 1 ครั้ง โดยศึกษาความหนาด้วย Surface profiler แผ่นละ 9 ตำแหน่ง

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำ (Repeatable) โดยศึกษาจากความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกบนกระจกสไลด์ 27 แผ่น ในการปลูก 3 ครั้ง โดยศึกษาความหนาด้วย Surface profiler แผ่นละ 9 ตำแหน่ง

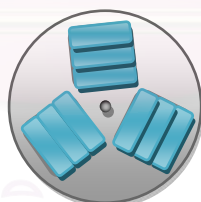
การศึกษาศักยภาพในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่งและความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมกระจกสไลด์ดังรายละเอียดในภาคผนวก ก และติดเทปกาวลงบนกระจกสไลด์ดังรูปที่ 3.9



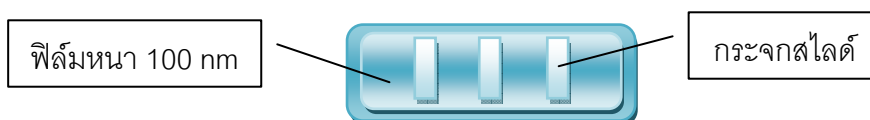
รูปที่ 3.9 กระจกสไลด์ก่อนปลูกฟิล์ม

2. วางกระจกสไลด์ลงในแชมเบอร์ดังรูปที่ 3.10

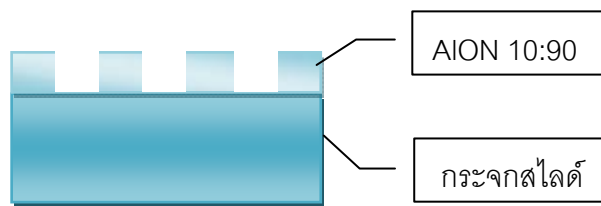


รูปที่ 3.10 การวางกระจกสไลด์ภายในภาชนะ

3. ปลูกฟิล์มหนา 100 nm ที่ภาวะดังตารางที่ 3.2
4. ลอกเทปกาวบนกระจกสไลด์ (รูปที่ 3.11) จะได้ฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 กระจกสไลด์หลังปลูกฟิล์ม



รูปที่ 3.12 ลักษณะของฟิล์มที่ปลูกบนกระจกสไลด์ด้วยภาวะในตารางที่ 3.2

5. พิจารณาความสูงต่ำของผิวหน้าของฟิล์มด้วยเครื่อง Surface profiler และบันทึกข้อมูล
6. เตรียมตัวอย่างและปลูกฟิล์มตามข้อที่ 1-5 อีก 2 ครั้ง เพื่อศึกษาความสม่ำเสมอของฟิล์มเมื่อทำการปลูกซ้ำ

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม

การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง นอกจากจะสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อปลูกซ้ำได้แล้ว ยังสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อปลูกซ้ำได้เช่นกัน

องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มและความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้คงที่เมื่อปลูกซ้ำ สามารถศึกษาได้จากฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 100 nm ที่ปลูกบนแผ่นซิลิคอน 5 แผ่น ที่ได้จากการปลูก 5 ครั้ง โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มด้วยเครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES) (Ulvac-phi รุ่น Phi 700) ดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

1. เตรียมแผ่นซิลิคอนดังรายละเอียดในภาคผนวก ก
2. ปลูกฟิล์มหนา 100 nm ที่ภาวะดังตารางที่ 3.2
3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile คือศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มตั้งแต่ที่ผิวฟิล์มลึกลงไปที่มีความหนาต่างๆ จนถึงฐานรอง และบันทึกผล
4. เตรียมตัวอย่าง ปลูกฟิล์ม และวิเคราะห์ตามข้อที่ 1-3 อีก 4 ครั้ง เพื่อศึกษาความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้คงที่เมื่อปลูกซ้ำ



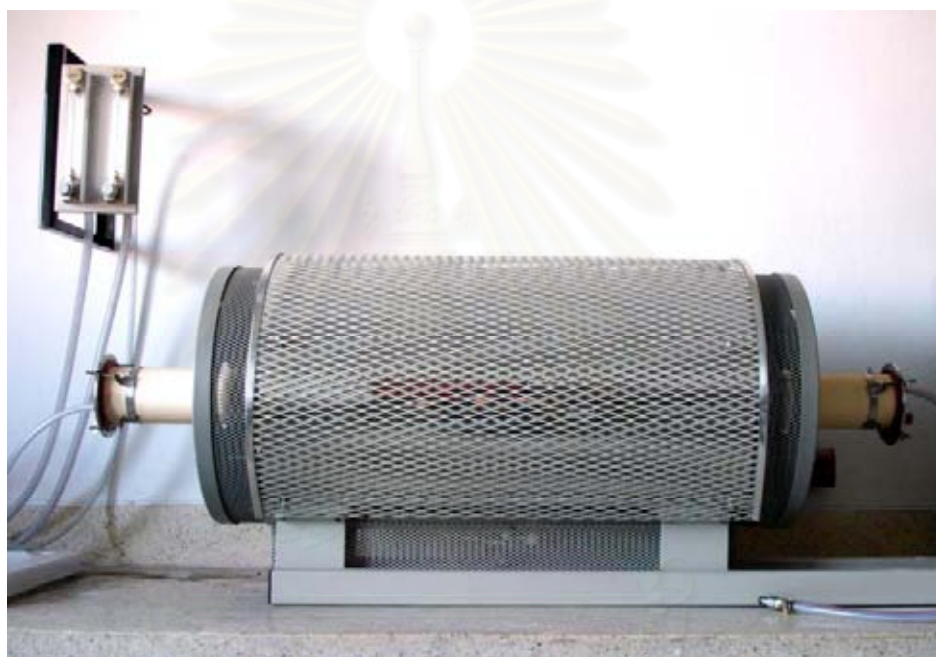
รูปที่ 3.13 ภายนอกเครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES)



รูปที่ 3.14 ภายในเครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES)

3.2 การแอนนัลฟิล์ม

แอนนัลฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่ปลูกลงบนแผ่นซิลิคอนโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา โดยแอนนัลที่อุณหภูมิ 300, 500 และ 800°C ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการแอนนัลที่มีต่อโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม โดยทำการแอนนัลในเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) (Carbolite รุ่น 2416CG) ดังรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 เตาเผาแบบท่อ



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ควบคุมเตาเผาแบบท่อ

1. เตรียมแผ่นซิลิคอนดั่งรายละเอียดในภาคผนวก ก
2. ปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดในไตรด์หนา 500 nm ที่ภาวะดังตารางที่ 3.3
3. แอนนีสฟิล์มที่ภาวะดังตารางที่ 3.4 แล้วทำการศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาค

ตารางที่ 3.3 ภาวะที่ใช้ในปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดในไตรด์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ

Ar Flow Rate (sccm)	12
N ₂ Flow Rate (sccm)	7
Timing [Ar (sec) : N ₂ (sec)]	10:90
Power (W)	200
Thickness (nm)	500
Deposition Rate (nm/sec)	0.94

ตารางที่ 3.4 ภาวะที่ใช้ในการแอนนีสฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดในไตรด์

Annealing Temperature	300, 500 and 800 °C
Soaking Time (min)	60
Ramp Up (°C/min)	5
Ramp Down (°C/min)	5

3.2.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม

ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่ปลูกด้วยเทคนิคอาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยาลงบนแผ่นซิลิคอนเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 500 และ 800°C ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) (JEOL รุ่น JDX-3530) ดังรูปที่ 3.17 ที่มุม 2θ ตั้งแต่ 20 ถึง 80 องศา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน JCPDS

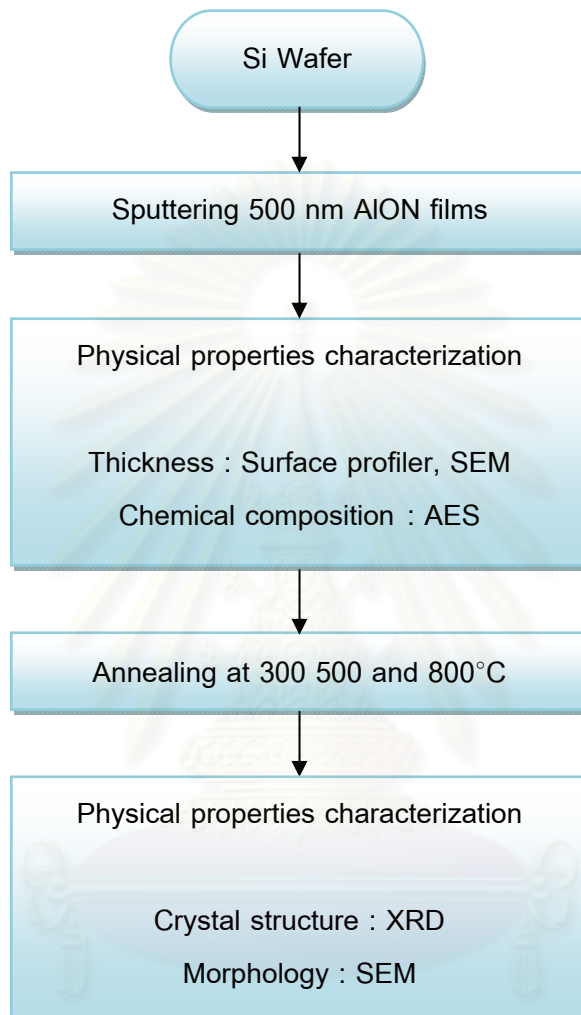


รูปที่ 3.17 เครื่อง X-Ray Diffractometer

3.2.2 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม

ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่ปลูกด้วยเทคนิคอาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยาลงบนแผ่นซิลิคอนเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 500 และ 800°C ด้วยเครื่อง SEM (S-4700) ดังรูปที่ 3.5

ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง แบบควบคุมเวลา แก๊สไวปฏิกิริยา และการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มก่อนและหลังแอนนีย์ลสามารถสรุปได้ ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนผังแสดงขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไนไตรต์ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา และการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 โครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เป็นฉนวน

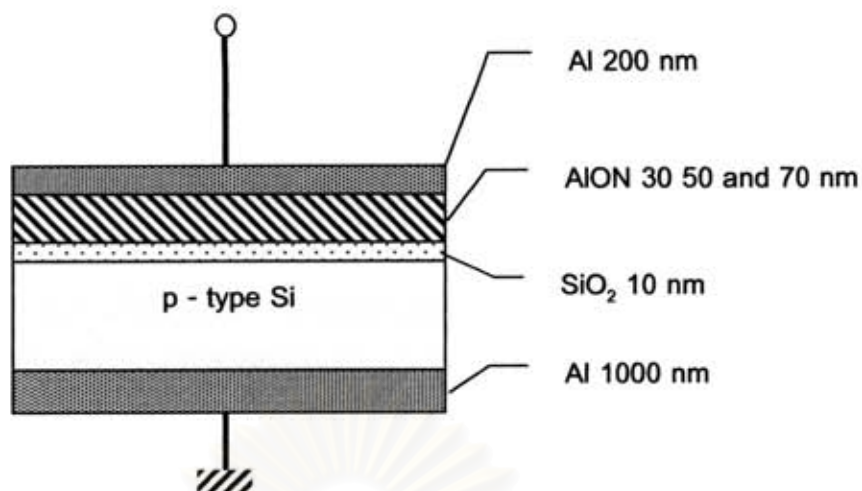
โครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์เฟต ที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้าง EIS ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้หาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสสำหรับงานวิจัยนี้ ดังนั้นเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ที่จะนำฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์มาใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของโครงสร้าง EIS ที่ซับซ้อน จึงได้ทำการทดสอบในโครงสร้าง MIS ก่อนโดยนำฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์มาใช้เป็นฉนวนในโครงสร้าง MIS และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า นอกจากนี้โครงสร้าง MIS ยังสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการต่ออุปกรณ์ที่ใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้า ใช้พิจารณาความหนาที่เหมาะสมของฉนวนที่ไม่ทำให้เกิดกระแสรั่ว และใช้ศึกษาชนิดของประจุที่เกิดขึ้นภายในฉนวนได้ด้วย

3.3.1 การสร้างโครงสร้าง MIS

ใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา โดยใช้ภาวะดังตารางที่ 3.5 เพื่อเป็นฉนวนในโครงสร้าง MIS สำหรับใช้ในการศึกษาสมบัติ I-V (Current-voltage characteristic) และสมบัติ C-V (Capacitance-voltage characteristic) โดยมีอะลูมิเนียมหนา 200 nm เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่ง มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ความหนา 30 50 และ 70 nm ทำหน้าที่เป็นฉนวนอยู่บนฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์หนา 10 nm ซึ่งอยู่บนสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนชนิดพี และมีอะลูมิเนียมหนา 1000 nm เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 3.20

ตารางที่ 3.5 ภาวะที่ใช้ในการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เพื่อใช้เป็นฉนวนของโครงสร้าง MIS

Ar Flow Rate (sccm)	12
N ₂ Flow Rate (sccm)	7
Timing [Ar (sec) : N ₂ (sec)]	10:90
Power (W)	200
Thickness (nm)	30 50 and 70
Deposition Rate (nm/sec)	0.94



รูปที่ 3.19 โครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์เป็นฉนวน

3.3.2 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง MIS

ศึกษาสมบัติ I-V (Current-voltage characteristic) เพื่อพิจารณาปริมาณกระแสรั่ว (Leak current) ของฉนวนในโครงสร้าง MIS โดยใช้เครื่อง Hewlett packard 4156B precision semiconductor parameter analyzer ดังรูปที่ 3.20 โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 2 V ให้แก่โครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์หนา 30, 50 และ 70 nm เป็นฉนวนดังรูปที่ 3.19 แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 3.20 HP 4156B precision semiconductor parameter analyzer

3.3.3 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS

ศึกษาสมบัติ C-V (Capacitance-voltage characteristic) ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของโครงสร้าง MIS โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการใช้วงจรแบบขนาน ศึกษาสมบัติ C-V ด้วยเครื่อง Hewlett packard 4284 LCR meter ดังรูปที่ 3.21 ของโครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 3.19 ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นชั้นฉนวน โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -5 ถึง 2 V แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ โดยพิจารณาที่ความถี่ 1 10 50 และ 100 kHz ตามลำดับ

จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ (ϵ_{AlON}) จากค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอคคิวเมชัน (C_{ox}) ที่ทุกๆ ค่าความถี่โดยใช้สมการ

$$\frac{1}{C_{ox}} = \frac{1}{C_{SiO_2}} + \frac{1}{C_{AlON}} \quad 3.2$$

$$\frac{1}{C_{ox}} = \frac{d_{SiO_2}}{\epsilon_0 \epsilon_{SiO_2} A} + \frac{d_{AlON}}{\epsilon_0 \epsilon_{AlON} A} \quad 3.3$$

โดย

$$d_{SiO_2} = 10 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{SiO_2} = 3.9$$

$$A = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$d_{AlON} = 30 \text{ 50 และ } 70 \times 10^{-9} \text{ m}$$



รูปที่ 3.21 เครื่อง HP 4284 LCR meter

3.3.3.1 ความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่

เมื่อพิจารณาสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้น โดยพิจารณาที่ความถี่แตกต่างกัน พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าไม่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าคงที่ไดโพลีทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ ที่คำนวณจากค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอคคิวเมชันมีค่าไม่เท่ากันด้วย จึงศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เป็นชั้นฉนวน และคำนวณหาค่าคงที่ไดโพลีทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์จากค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่ได้

ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวน สามารถคำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จาก 2 ความถี่ที่แตกต่างกัน ดังสมการที่ 2.1 โดยพิจารณาที่ความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz จากนั้นศึกษาสมบัติ C-V จากค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณได้ แล้วเปรียบเทียบกับกรณีที่พิจารณาความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz

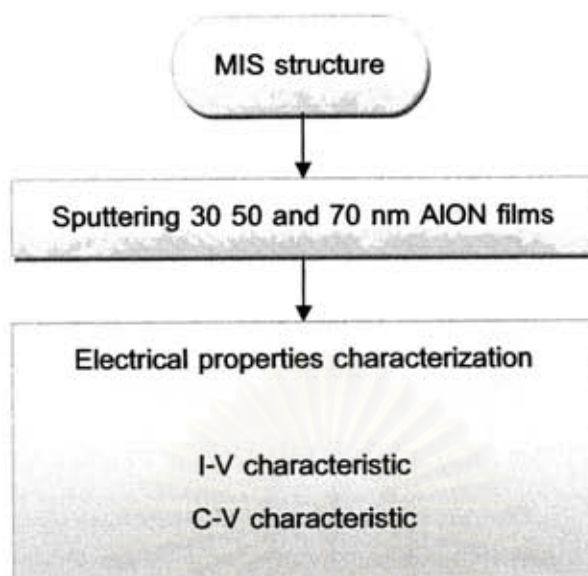
คำนวณค่าคงที่ไดโพลีทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์จากค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณได้จากความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz โดยใช้สมการที่ 3.3

3.3.3.2 ประจุไฟฟ้าภายในชั้นฉนวน

ภายในโครงสร้าง MIS ประกอบไปด้วยประจุไฟฟ้าหลายชนิด เช่น ประจุที่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ ในชั้นของฉนวน ประจุนิ่งในชั้นฉนวน ประจุกับดักในชั้นฉนวน และประจุกับดักที่ผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประจุต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติ C-V ไปจากอุดมคติ การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติ C-V จะใช้ในการศึกษานิดของประจุที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง MIS

ศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p/C เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100 kHz และ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณจากความถี่ 50 กับ 100 kHz สำหรับโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวนตามลำดับ จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติ C-V ดังกล่าวที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100 kHz และเปรียบเทียบที่ความถี่เท่ากับ 1 กับ 100 kHz

ขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เป็นฉนวนและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังแผนผังที่แสดงดังรูปที่ 3.22



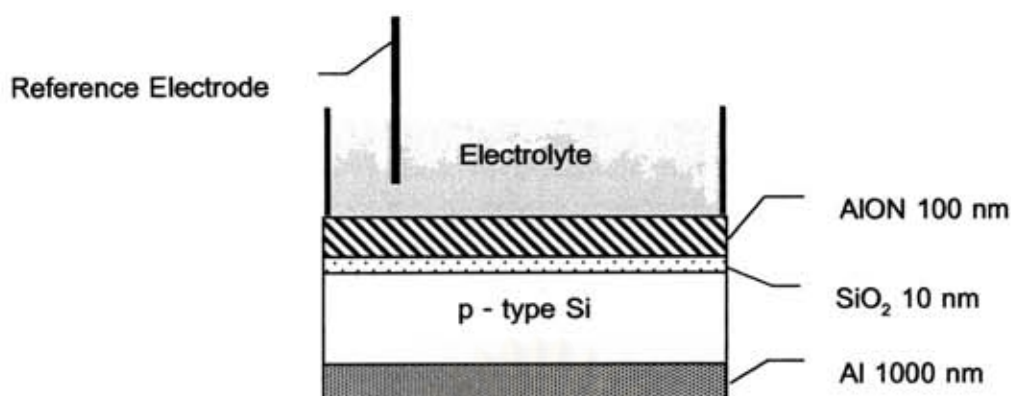
รูปที่ 3.22 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง MIS และการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

3.4 โครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยาและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่ใช้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์เป็นฉนวน ทำให้ได้ภาวะที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มเพื่อใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของโครงสร้าง EIS ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการหาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสจากการศึกษาสมบัติ C-V โดยเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อโครงสร้างอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน

3.4.1 การสร้างโครงสร้าง EIS

ใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ที่ปลูกโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา โดยใช้ภาวะดังตารางที่ 3.2 มาสร้างเป็นโครงสร้าง EIS สำหรับการศึกษาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส โดยมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ที่ความหนา 100 nm ทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนอยู่บนฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์หนา 10 nm บนสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนชนิดพี โดยมีแท่งเงิน/เงินคลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง ด้านสารกึ่งตัวนำมีอะลูมิเนียมหนา 1000 nm เป็นขั้วไฟฟ้าและปิดรอยต่อต่างๆ ด้วยเรซินสังเคราะห์ (Epoxy) ให้เหลือแต่บริเวณเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเท่านั้นที่สัมผัสกับสารละลายดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 โครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

3.4.2 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS

ศึกษาสมบัติ I-V เพื่อพิจารณาปริมาณกระแสรั่ว (Leak current) ของเมมเบรนที่ไวต่อไอออนภายในโครงสร้าง EIS โดยใช้เครื่อง Hewlett packard 4156B precision semiconductor parameter analyzer ดังรูปที่ 3.20 โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -8 ถึง -2 V ให้แก่โครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนดังรูปที่ 3.23 แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ โดยพิจารณาจากสารละลาย (Buffer solution) ที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4.7 และ 10 (Labchem)

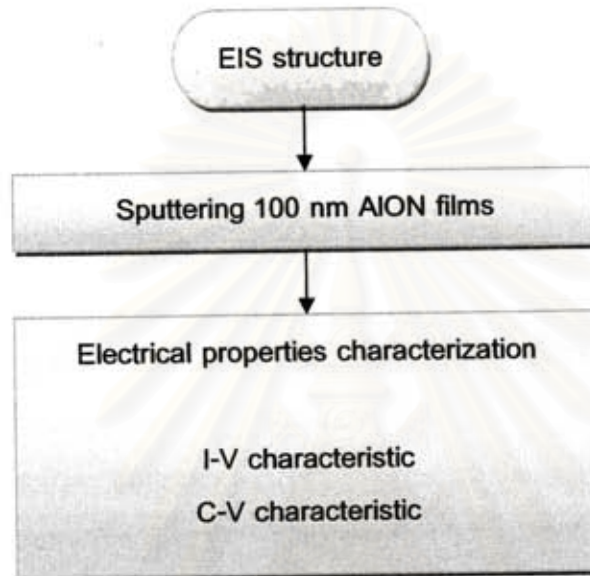
3.4.3 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS

ศึกษาสมบัติ C-V ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของโครงสร้าง EIS ด้วยเครื่อง Hewlett packard 4284 LCR meter ดังรูปที่ 3.21 ของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนดังรูปที่ 3.23 โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -8 ถึง -1 V แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ โดยพิจารณาที่ความถี่ 1 10 50 และ 100 kHz ตามลำดับ

คำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของโครงสร้าง EIS จากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จาก 2 ความถี่ที่แตกต่างกัน ดังสมการที่ 2.1 โดยพิจารณาที่ความถี่ 10 กับ 100 kHz จากนั้นศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p/C เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100 kHz และ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณจากความถี่ 10 กับ 100 kHz โดยพิจารณาที่สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4.7 และ 10 จากนั้นศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่เมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4.7 และ 10 และหาค่าการตอบสนองต่อค่าความ

เป็นกรด-เบส โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ค่า C_p/C เท่ากัน

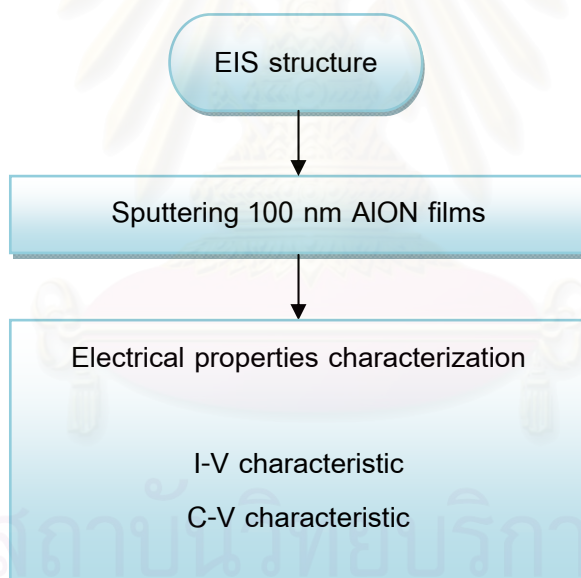
ขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังแผนผังที่แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง EIS และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

คำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของโครงสร้าง EIS จากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จาก 2 ความถี่ที่แตกต่างกัน ดังสมการที่ 2.1 โดยพิจารณาที่ความถี่ 10 กับ 100 kHz จากนั้นศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p/C เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100 kHz และ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณจากความถี่ 10 กับ 100 kHz โดยพิจารณาที่สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10 จากนั้นศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่เมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10 และหาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบส โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ค่า C_p/C เท่ากัน

ขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังแผนผังที่แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แผนผังแสดงขั้นตอนการสร้างโครงสร้าง EIS และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์จากเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

จากการศึกษาการปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ ที่ปลูกโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไอปฏิกิริยาลงบนแผ่นซิลิคอนและกระจกสไลด์ ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1.1 ความหนาของฟิล์ม

จากการศึกษาความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไอปฏิกิริยาที่ภาวะดังตารางที่ 3.1 ลงบนแผ่นซิลิคอน ด้วย Surface profiler (P-10) และ SEM (S-4700)

เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของ Thickness monitor ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และพบว่าค่าความหนาที่อ่านได้จาก Thickness monitor ไม่ตรงกับค่าความหนาจริงที่ศึกษาจาก Surface profiler และ SEM โดยค่าความหนาที่อ่านได้จาก Thickness monitor มีค่าเท่ากับ 100 nm/layer ส่วนค่าความหนาจริงที่ศึกษาจาก Surface profiler และ SEM มีค่าประมาณ 150 nm/layer เมื่อคำนวณค่า Tooling Factor โดยใช้สมการที่ 3.1 จะได้ว่า

$$T_m \text{ (ความหนาจริงที่ศึกษาจาก Surface profiler และ SEM)} = 150 \text{ nm/layer}$$

$$T_{ind} \text{ (ความหนาที่อ่านได้จาก Thickness Monitor)} = 100 \text{ nm/layer}$$

$$\text{ได้ว่าค่า Tooling factor} = 1.5$$

$$\text{และจากเดิมมีค่า Tooling factor} = 1.52$$

$$\text{ดังนั้นค่า Tooling factor ที่ต้องปรับใหม่} = 1.5 \times 1.52 = 2.28$$

หลังจากปรับ Tooling factor และปลูกฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรต์หนา 100 nm ที่ภาวะดังตารางที่ 3.2 ได้ค่าความหนาของฟิล์มบางที่ปลูกลงบนแผ่นซิลิคอนทั้ง 3 แผ่นดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาที่อ่านจาก Thickness monitor มีค่าเท่ากับ 100 nm และค่าความหนาจริงที่ศึกษาจาก Surface profiler มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 101.52 nm คลาดเคลื่อนจากค่าที่ตั้งไว้ 1.52% ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่า 10% อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าค่า Tooling factor ที่ปรับเพื่อให้ Thickness monitor อ่านค่าตรงกับความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ที่วัดได้จริงมีความเหมาะสม

ตารางที่ 4.1 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์ก่อนปรับ Thickness monitor

ตำแหน่ง	Thickness monitor (nm)	Surface profiler (nm)	SEM (cross-section)
1	400	570.8	
2	400	573.5	
3	400	621.2	
4	400	625.4	
5	400	674.6	
6	400	602.9	
7	400	513.5	
8	400	424.0	
9	400	400.6	

ตารางที่ 4.2 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์หลังปรับ Thickness monitor

ตำแหน่ง	Thickness monitor (nm)	Surface profiler (nm)		
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
1	100	93.3	99.6	103.9
2	100	103.9	111.4	125.3
3	100	88.6	110.0	105.8
4	100	105.2	110.6	126.2
5	100	100.0	104.8	120.9
6	100	113.7	102.4	92.7
7	100	85.6	114.1	90.1
8	100	82.9	96.7	95.8
9	100	96.1	69.7	91.8
ค่าเฉลี่ย = 101.52 nm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 13.02				

4.1.2 ความสม่ำเสมอของฟิล์ม

การศึกษาความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่ง (Uniformity) และความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำได้ (Repeatable) เมื่อปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไอพฏิกิริยา ศึกษาได้จากความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ที่ปลูกที่ภาวะดังตารางที่ 3.2 ลงบนกระจกสไลด์ 27 แผ่น ในการปลูก 3 ครั้ง ศึกษาความหนาแผ่นละ 9 ตำแหน่ง จากการพิจารณาความสูงต่ำของผิวหน้าของฟิล์มด้วยเครื่อง Surface profiler ได้ค่าความหนาแสดงดังตารางที่ 4.3 ถึง ตารางที่ 4.5

ความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่ง จะพิจารณาจากความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์เมื่อปลูกครั้งที่ 1 ดังตารางที่ 4.3 พบว่าความหนาของฟิล์มที่วัดได้ทั้ง 81 ตำแหน่งนั้น ทุกๆ ตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนจากความหนาเฉลี่ยต่ำกว่า 15 % และมีเพียง 11 ตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนจากความหนาเฉลี่ยสูงกว่า 10% แสดงให้เห็นว่าการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่งได้

ความสามารถในการควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำได้ จะพิจารณาจากความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์เมื่อปลูกซ้ำ 3 ครั้ง ดังตารางที่ 4.3 ถึง ตารางที่ 4.5 พบว่าความหนาโดยเฉลี่ยของฟิล์มมีค่าเท่ากับ 104.63 107.73 และ 104.42 nm และมีความคลาดเคลื่อนจากค่าความหนาที่ตั้งไว้ 4.63% 7.73% และ 4.42% ตามลำดับ นั่นคือความหนาของฟิล์มที่ปลูกได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 10% แสดงให้เห็นว่าการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อปลูกครั้งที่ 1

ตำแหน่งที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 1	102.0	112.4	109.1	98.8	100.6	111.3	96.7	100.6	98.5
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 2	100.7	107.5	102.0	101.3	102.8	113.5	108.1	105.3	100.5
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 3	97.3	95.2	98.5	105.2	102.8	115.2	99.7	102.1	110.0
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 1	91.5	103.4	100.3	110.7	116.5	118.6	98.6	99.3	101.1
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 2	92.9	101.3	104.1	109.8	109.7	116.2	100.4	104.5	108.4
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 3	104.2	109.3	103.7	108.2	112.8	114.2	110.2	98.5	116.0
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 1	101.3	98.2	100.7	106.5	94.4	100.2	109.0	98.8	98.4
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 2	94.5	106.6	119.2	96.6	113.2	120.1	104.9	120.0	100.8
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 3	99.6	98.2	101.0	111.4	100.2	97.0	99.5	103.5	119.4
ค่าเฉลี่ย = 104.63 nm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 6.93										

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อปลูกครั้งที่ 2

ตำแหน่งที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 1	116.6	128.4	106.4	96.6	103.2	104.4	99.5	113.7	119.6
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 2	110.9	109.4	117.7	116.8	118.4	114.1	117.8	116.5	117.5
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 3	129.9	117.6	116.4	112.9	109.8	104.5	110.5	112.4	119.7
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 1	99.8	108.1	98.1	100.8	100.5	92.1	119.0	105.5	110.9
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 2	100.9	91.2	108.3	116.5	108.3	100.4	104.8	118.6	111.5
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 3	128.8	116.0	118.3	109.1	112.0	110.2	119.2	116.7	118.0
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 1	98.5	101.2	99.5	93.8	100.4	102.1	94.8	101.6	96.8
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 2	101.3	99.2	98.0	102.1	99.3	101.6	104.4	103.9	100.6
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 3	100.8	111.2	98.8	97.5	101.2	101.8	100.7	112.4	97.6
ค่าเฉลี่ย = 107.73 nm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 8.84										

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

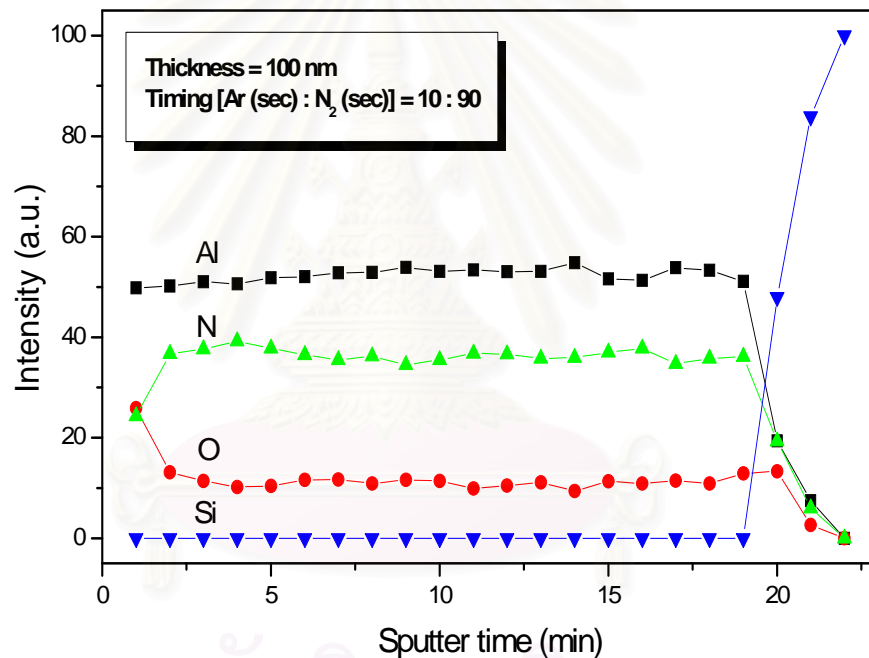
ตารางที่ 4.5 ความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อปลูกครั้งที่ 3

ตำแหน่งที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 1	117.1	121.6	124.0	105.3	103.8	111.9	119.5	111.5	98.0
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 2	103.5	98.8	107.1	117.1	122.2	122.0	125.4	107.9	98.5
	แถวที่ 1 แผ่นที่ 3	97.6	101.8	100.6	122.4	111.5	98.8	104.4	104.6	110.5
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 1	105.4	103.5	108.0	109.1	115.0	109.3	98.5	102.7	101.8
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 2	113.0	115.9	116.7	97.5	101.4	109.3	85.5	107.3	104.5
	แถวที่ 2 แผ่นที่ 3	111.9	102.0	99.8	117.1	112.6	104.5	98.6	103.5	112.2
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 1	98.5	88.8	102.5	101.0	97.5	82.8	77.3	97.5	78.9
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 2	101.2	87.3	86.5	99.6	98.0	89.8	111.0	98.4	110.6
	แถวที่ 3 แผ่นที่ 3	98.4	105.0	89.2	100.3	110.0	101.4	110.2	102.8	99.4
ค่าเฉลี่ย = 104.42 nm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน = 6.40										

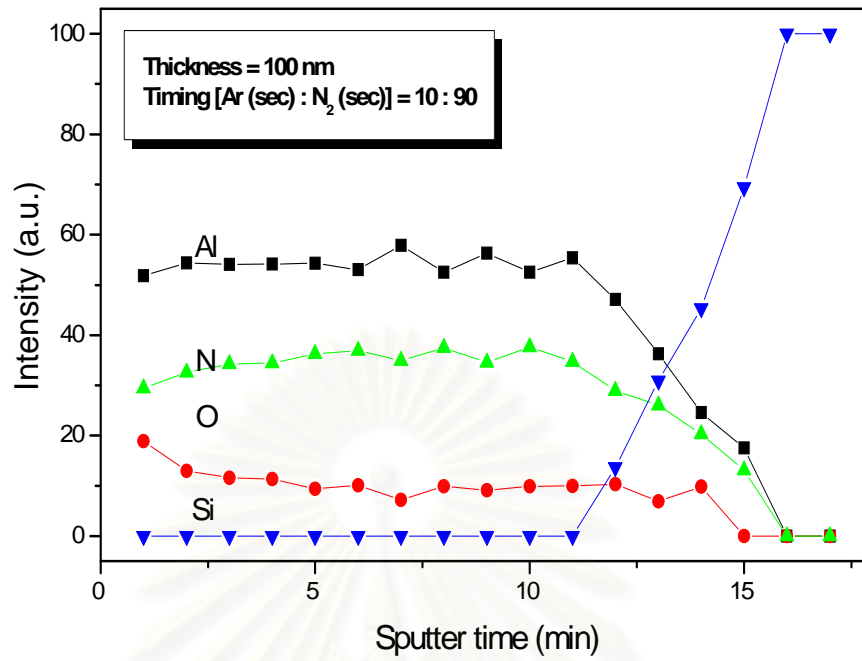
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์ม

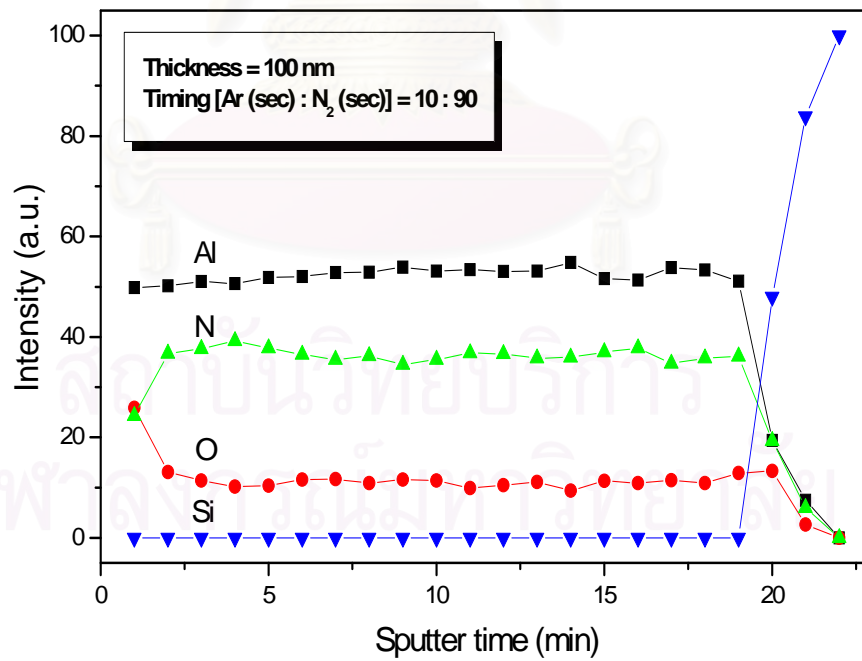
การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์และความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้คงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำ เมื่อปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอรिंग แบบควบคุมเวลาแก๊สไอปฏิกิริยา ที่ภาวะดังตารางที่ 3.2 โดยใช้เครื่อง AES (Phi 700) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีจากฟิล์มที่ปลูกลงบนแผ่นซิลิคอน 5 แผ่นที่ได้จากการปลูก 5 ครั้ง โดยพิจารณาจากผลของ Depth profile ซึ่งบอกองค์ประกอบของฟิล์มเริ่มต้นตั้งแต่ที่ผิวฟิล์มลึกลงไปที่มีความหนาต่างๆ จนถึงฐานรองที่มีปริมาณซิลิคอนอยู่ 100% แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.5



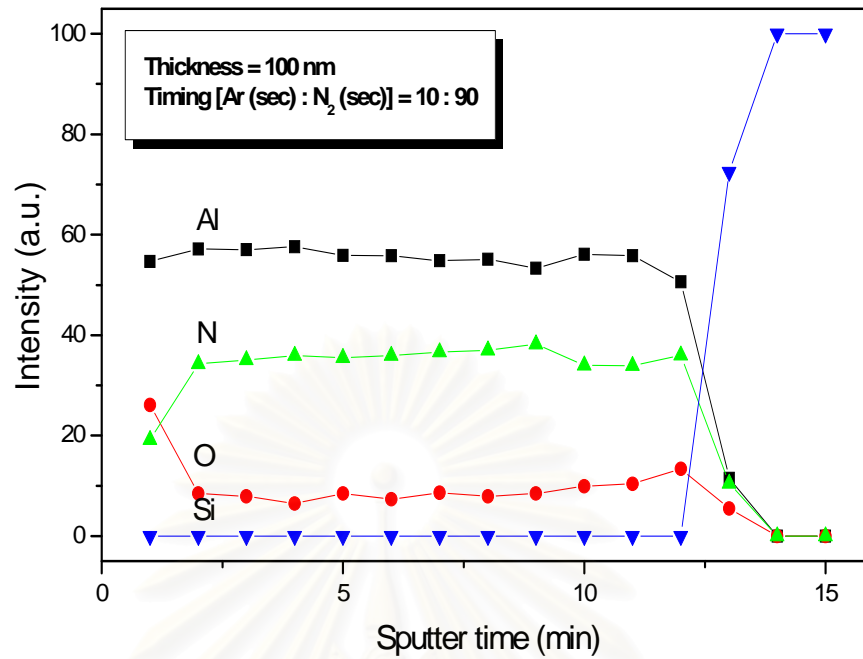
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 1



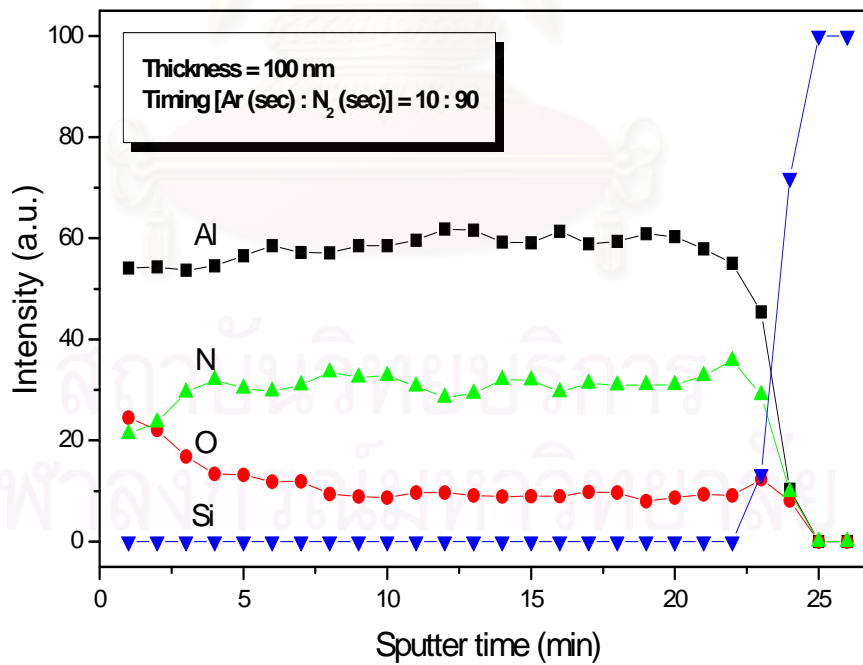
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 2



รูปที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 3



รูปที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 4



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มแบบ Depth profile เมื่อทำการปลูกฟิล์มครั้งที่ 5

องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดร์จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่ปลูกครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 5 ดังตารางที่ 4.6 พบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดร์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมแก๊สไวปฏิกิริยา มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยอะลูมิเนียม $54.84 \pm 1.75\%$ ไนโตรเจน $35.28 \pm 1.36\%$ และออกซิเจน $9.88 \pm 0.85\%$

ความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำจะพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่ได้จากการปลูกครั้งที่ 1 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มที่ได้จากการปลูกครั้งที่ 2-5 ดังตารางที่ 4.6 พบว่าความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดร์มีค่า 1.90% 0.61% 0.59% และ 4.35% ตามลำดับ นั่นคือในการปลูกฟิล์มแต่ละครั้งจะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันต่ำกว่า 10% จึงสามารถสรุปได้ว่าการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมแก๊สไวปฏิกิริยาสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำได้

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดร์

ธาตุ	Al (Atomic %)	N (Atomic %)	O (Atomic %)	คลาดเคลื่อน (%)
ครั้งที่ 1	54.65	35.90	9.45	-
ครั้งที่ 2	52.43	36.43	11.14	1.90
ครั้งที่ 3	54.47	35.38	10.15	0.61
ครั้งที่ 4	55.38	35.76	8.86	0.59
ครั้งที่ 5	57.28	32.95	9.77	4.35
ค่าเฉลี่ย Al = $54.84 \pm 1.75\%$, N = $35.28 \pm 1.36\%$, O = $9.88 \pm 0.85\%$				

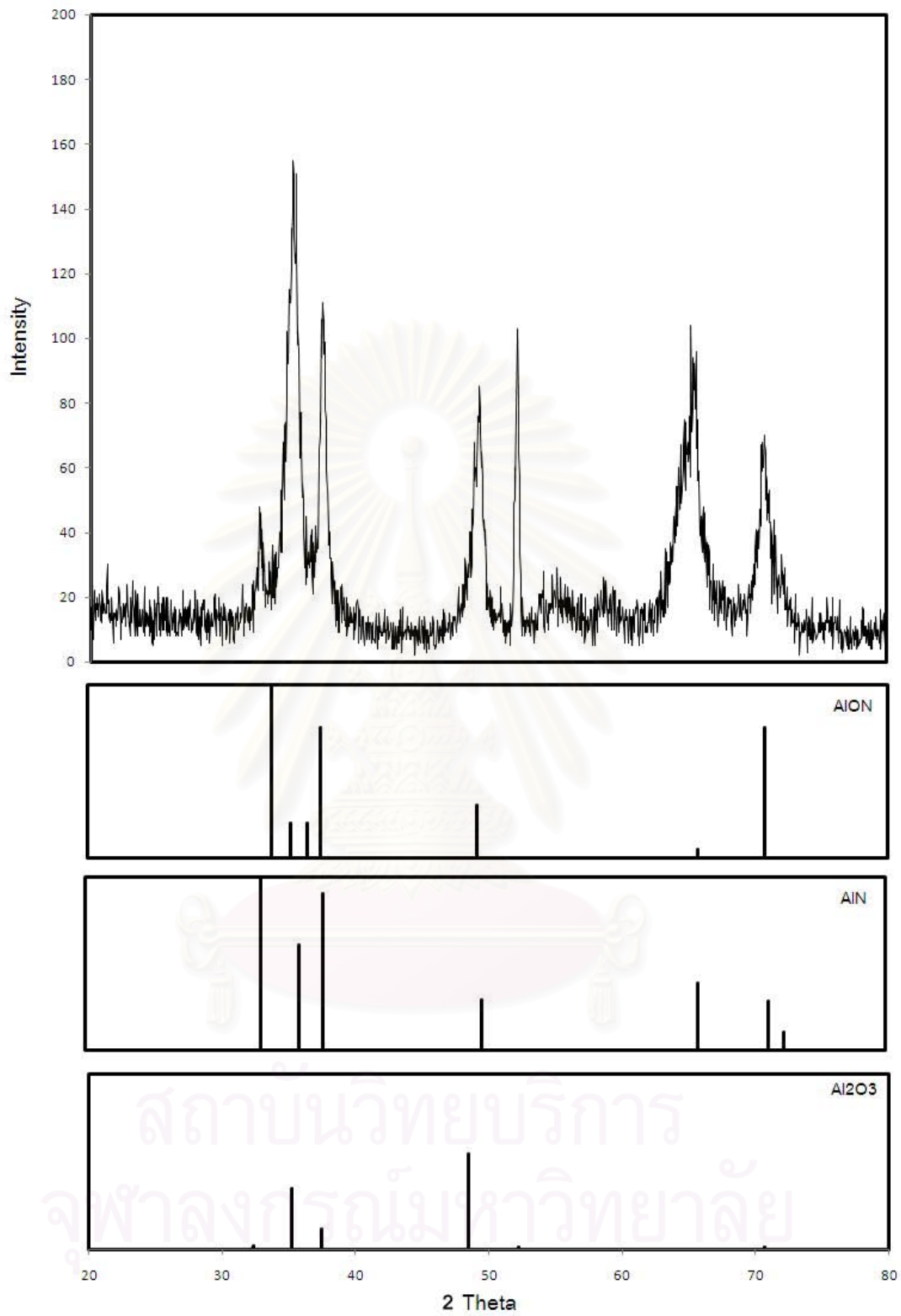
4.2 ผลของการแอนนัลต่อสมบัติของฟิล์ม

แอนนัลฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดร์ที่ปลูกลงบนแผ่นซิลิคอนโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยาที่ภาวะดังตารางที่ 3.3 โดยแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 500 และ 800°C ที่ภาวะดังตารางที่ 3.4 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการแอนนัลที่มีต่อโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มผลจากการศึกษามีดังต่อไปนี้

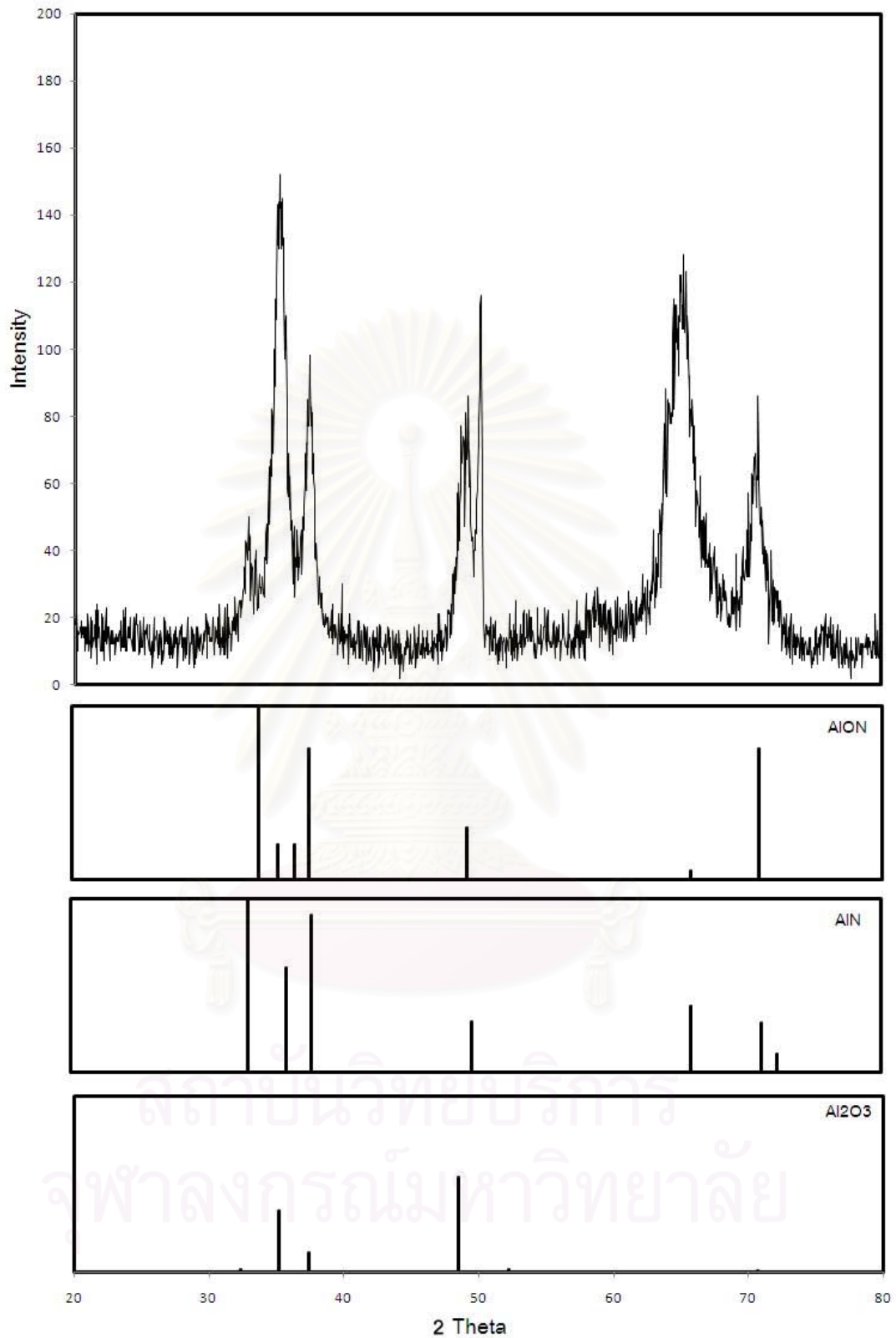
4.2.1 โครงสร้างผลึกของฟิล์ม

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปตเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไอปฏิบัติyalงบนแผ่นซิลิคอน ได้ผลการศึกษาจากเครื่อง XRD (JDX-3530) เป็นดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.9

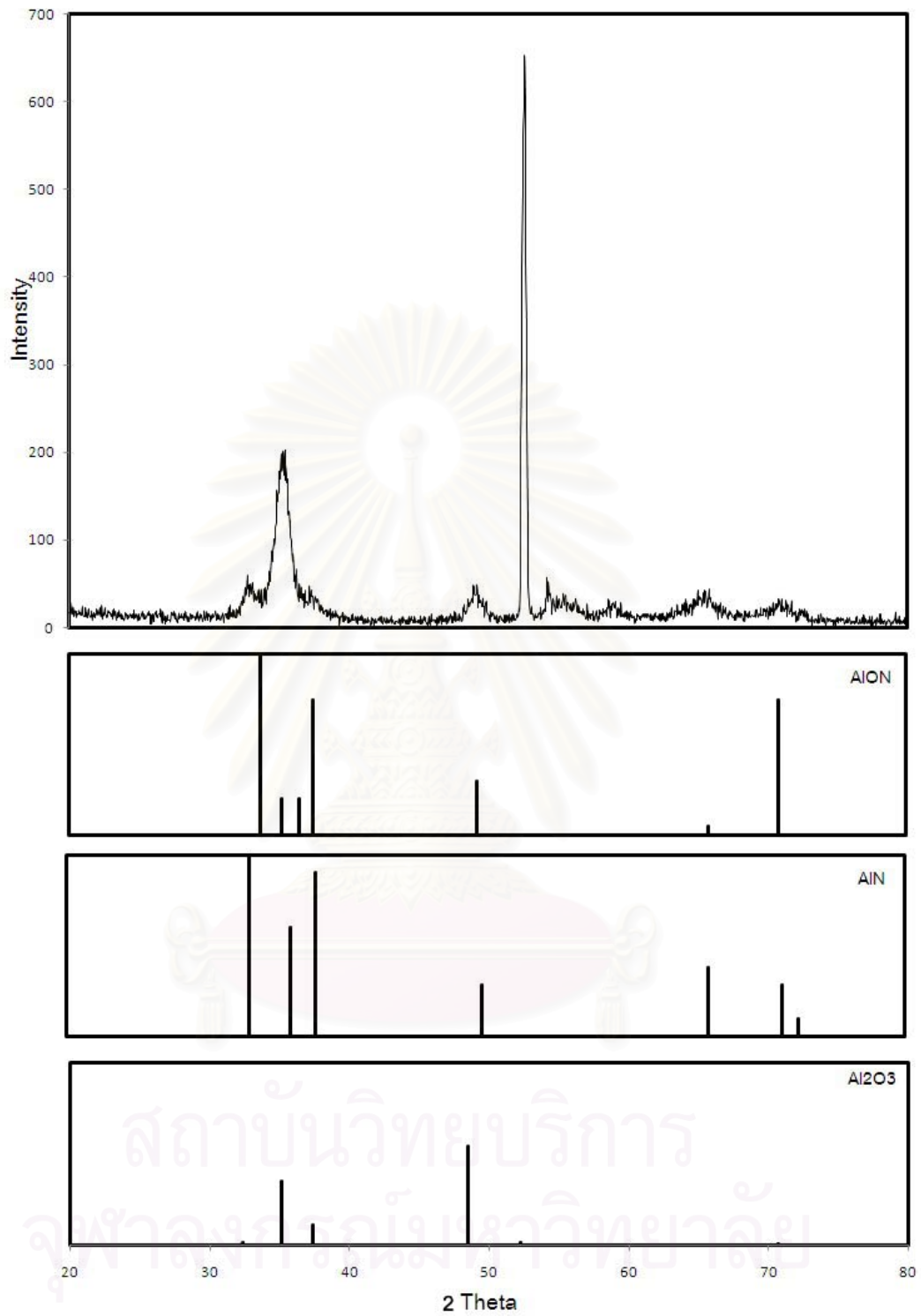
โครงสร้างผลึกของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์จะพิจารณาจากรูปแบบ XRD ที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน JCPDS ดังภาพผนวก ข พบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ก่อนแอนนัลประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์ (89-3446) อะลูมิเนียมออกไซด์ (73-1199) และอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ (48-1582) ดังรูปที่ 4.6 เมื่อแอนนัลฟิล์มที่อุณหภูมิ 300°C ได้รูปแบบ XRD ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดของรูปแบบ XRD จากฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ก่อนแอนนัล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลเป็น 500 และ 800°C พบว่าฟิล์มยังคงประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมไนไตรด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เช่นเดิมแต่รูปแบบของ XRD มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นโดยที่บางตำแหน่งของค่า 2θ มีค่าความเข้มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากเมื่อฟิล์มได้รับอุณหภูมิในการแอนนัลที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างผลึกภายในฟิล์มเกิดการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างมีระเบียบมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่บางตำแหน่งของรูปแบบ XRD ของฟิล์มที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 800 °C มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของฟิล์มที่แอนนัลที่อุณหภูมิดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลง



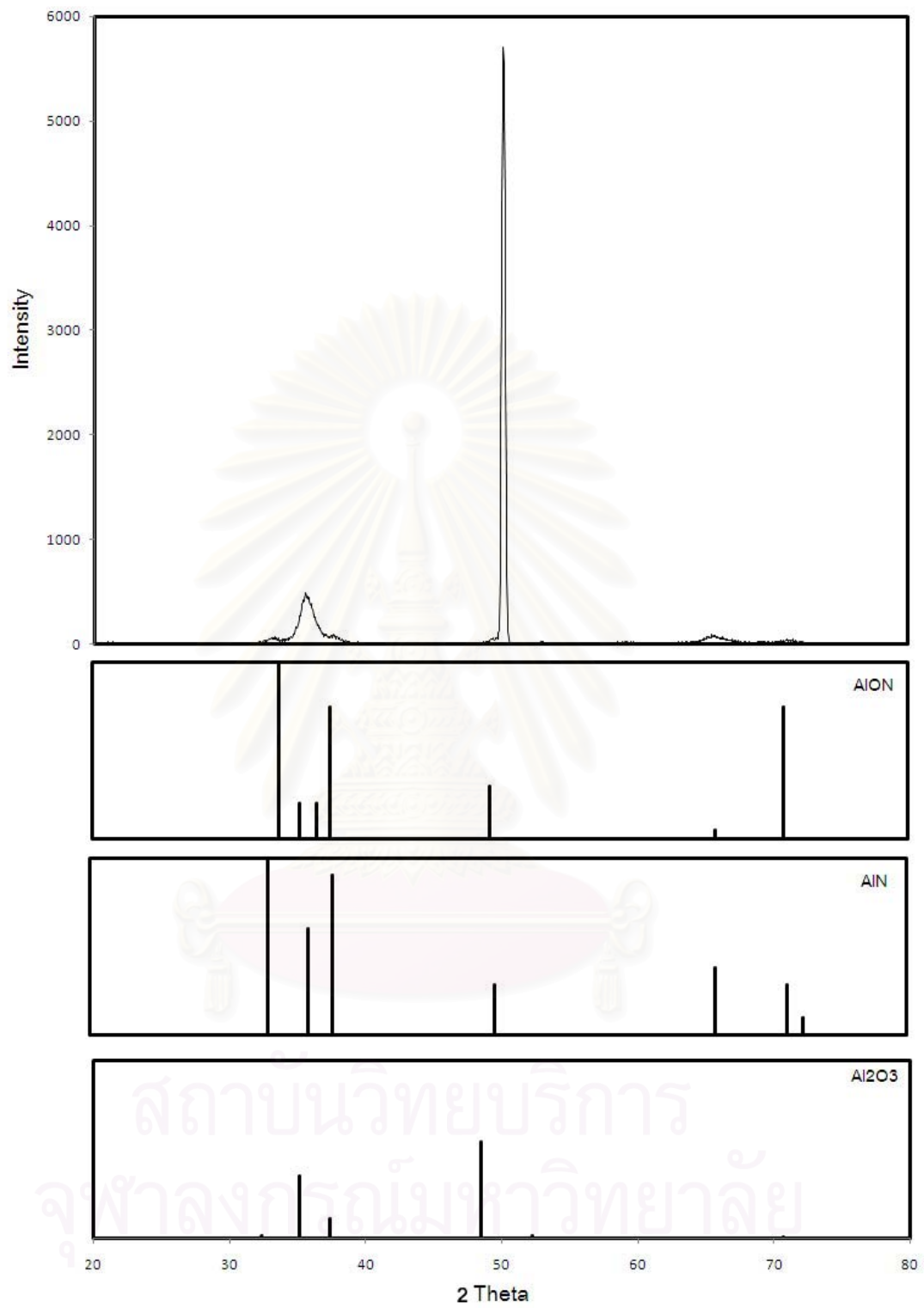
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ก่อนแอนนิง



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C



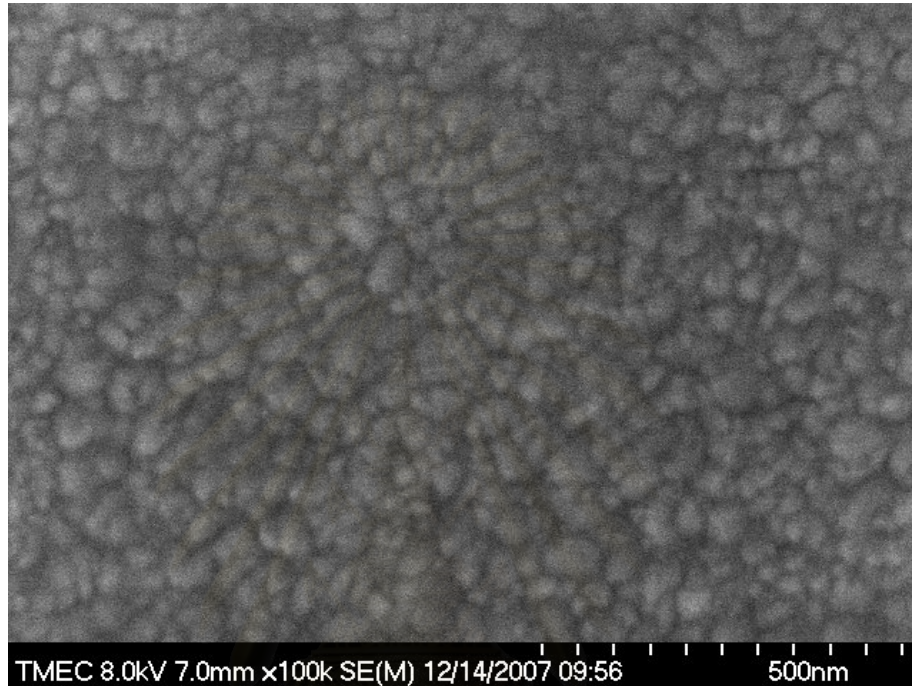
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C



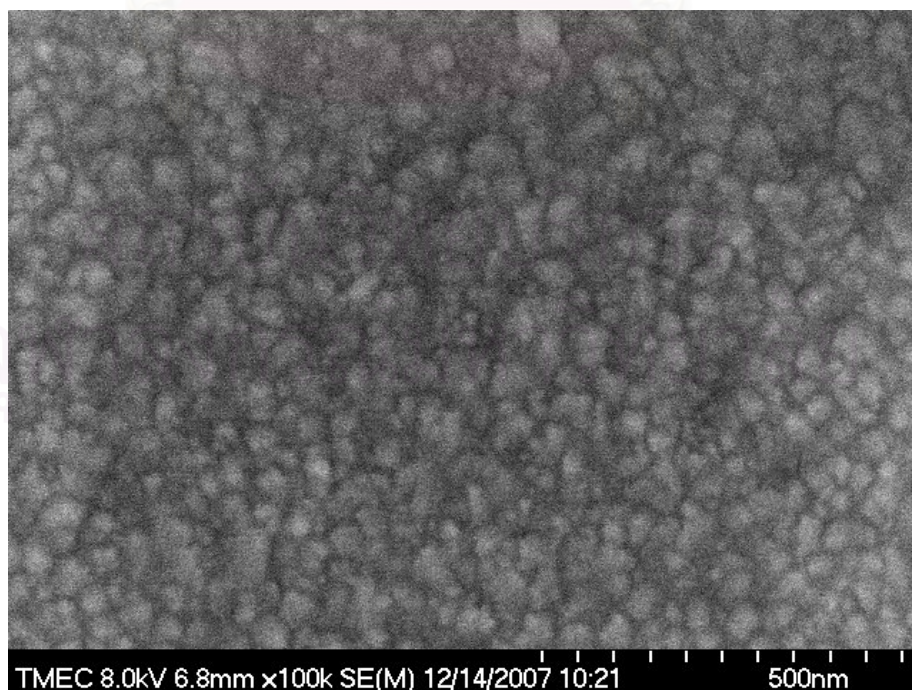
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 800°C

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม

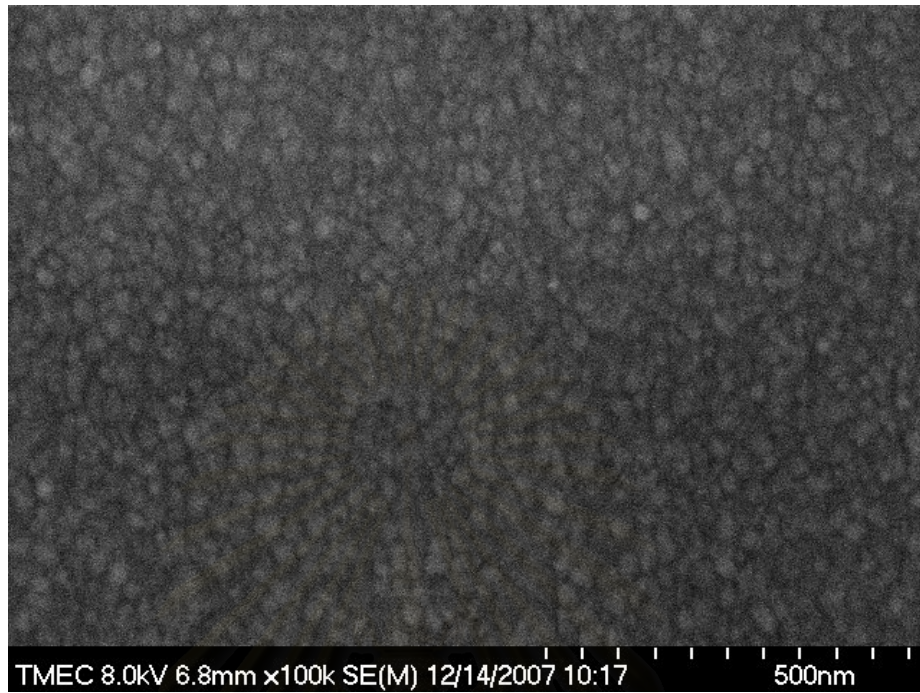
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิคอาร์เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไว้ปฏิกิริยาบนแผ่นซิลิคอน เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 300 500 และ 800 °C ด้วยเครื่อง SEM (S-4700) เป็นดังรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.13



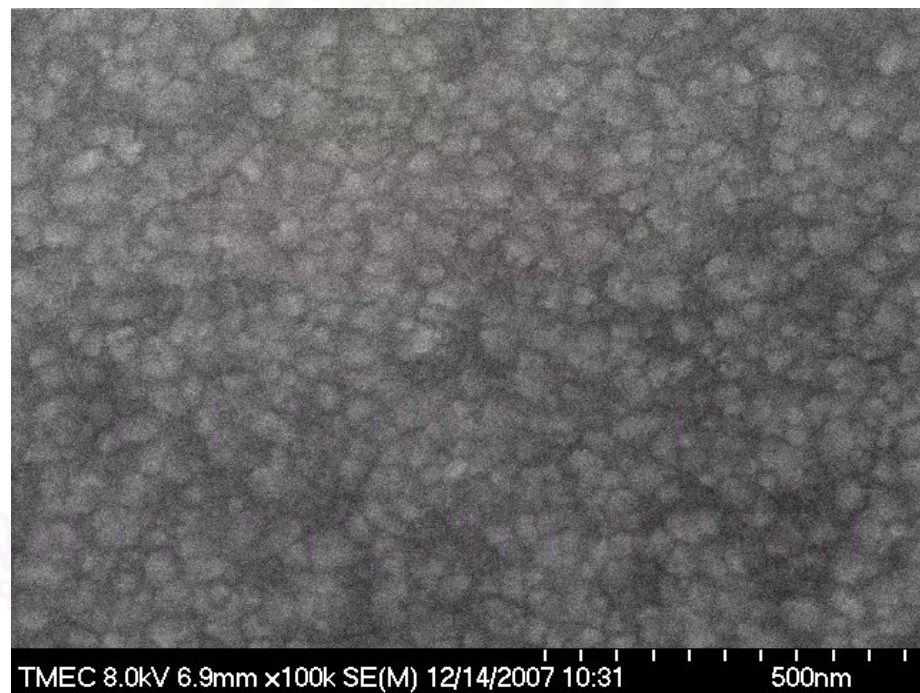
รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ก่อนแอนนัล



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อแอนนีสลที่อุณหภูมิ 500°C



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อแอนนีสลที่อุณหภูมิ 800°C

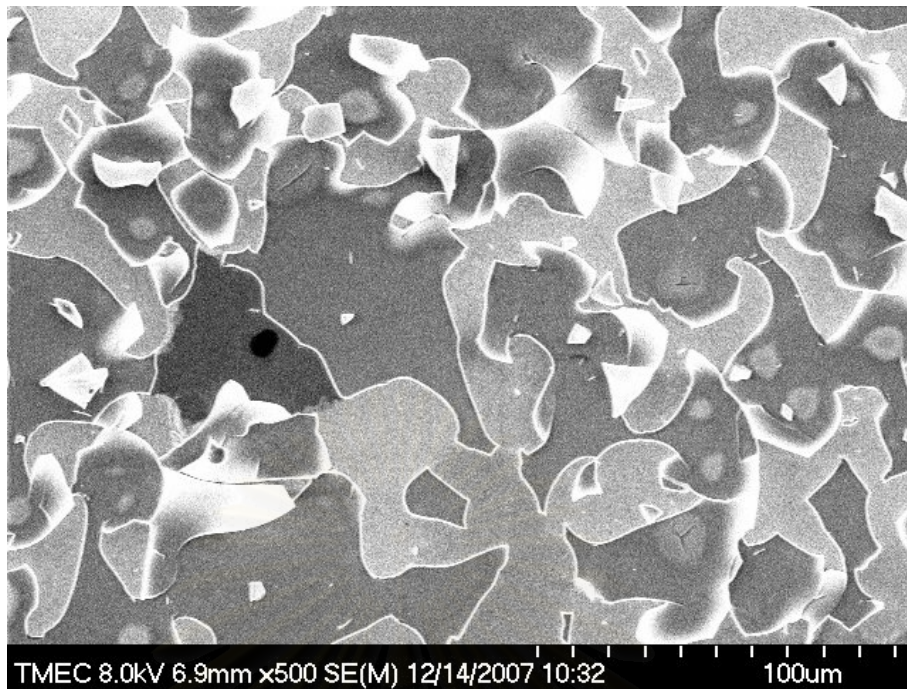
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าฟิล์มที่ผ่านการแอนนีสที่อุณหภูมิ 300°C มีขนาดของเกรนอยู่ในช่วง 20–40 nm และไม่มีลักษณะของเกรนที่เปลี่ยนแปลงจากฟิล์มที่ไม่ได้แอนนีส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนีสสูงขึ้นเป็น 500°C มีโครงสร้างจุลภาคเป็นดังรูปที่ 4.12 พบว่าลักษณะของเกรนเป็นเหมือนก้อนกรวด (pebble-like) และขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยภายในฟิล์มเล็กคือมีขนาดเกรนประมาณ 20 nm ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองก่อนหน้านี้ของ S.N. Ghosh [21] ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากการเกิด Nucleating site จำนวนมากภายในฟิล์มเมื่อฟิล์มได้รับอุณหภูมิในการแอนนีสที่สูงขึ้น [22] นอกจากนี้ที่บางตำแหน่งของฟิล์มสังเกตได้ว่ามีรอยแตกที่เกิดขึ้นจากความเค้นเนื่องจากความร้อน (Thermal stress) ดังแสดงในรูปที่ 4.14

และเมื่ออุณหภูมิในการแอนนีสเพิ่มสูงขึ้นเป็น 800°C โครงสร้างจุลภาคจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.13 พบว่านิวเคลียสของเกรนที่เกิดขึ้นจะถูกกระตุ้นจากอุณหภูมิในการแอนนีสที่สูงขึ้นทำให้เกรนเกิดการขยายขนาด (Grain growth) โดยความสัมพันธ์ระหว่างการขยายขนาดของเกรนกับอุณหภูมิตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.1 [23] นอกจากนี้ยังพบว่ารอยแตกจากความเค้นเนื่องจากความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้นทั่วทั้งตัวอย่าง

$$D^n - D_0^n = Kt \exp(-Q/RT) \quad 4.1$$

โดย	D	คือขนาดเกรนหลังแอนนีส
	D_0	คือขนาดเกรนเริ่มต้น
	n	คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกการขยายขนาดของเกรน
	K	คืออัตราการขยายขนาดของเกรน
	t	คือเวลาในการแอนนีส
	Q	คือพลังงานกระตุ้นในกลไกการขยายขนาดของเกรน
	R	คือค่าคงที่ของ Boltzmann
	T	คืออุณหภูมิในการแอนนีส

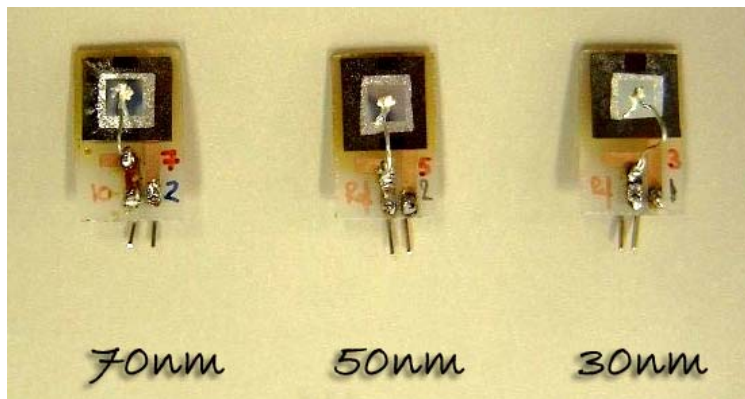


รูปที่ 4.14 รอยแตกที่เกิดขึ้นบนฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิสูง

ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง โดยศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มพบว่าสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C นั้นมีผลเช่นเดียวกับฟิล์มที่ไม่ได้แอนนัล แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัลเป็น 500 และ 800°C พบว่าเกิด Nucleating site เป็นจำนวนมากภายในฟิล์ม มีการขยายขนาดของเกรน และมีรอยแตกที่เกิดจากความเค้นเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์ที่ไม่ได้แอนนัลมาเป็นฉนวนของโครงสร้าง MIS และเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของโครงสร้าง EIS

4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์เป็นชั้นฉนวน

นำฟิล์มบางอะลูมินัมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเปคเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา ที่ภาวะดังตารางที่ 3.5 โดยฟิล์มมีขนาด 0.5x0.5 cm หนา 30 50 และ 70 nm มาประกอบเป็นฉนวนของโครงสร้าง โดยปลูกลงบนฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์หนา 10 nm ที่อยู่บนสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนชนิดพี จากนั้นปลูกฟิล์มอะลูมินัมหนา 200 nm เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านฉนวน และขั้วไฟฟ้าด้านสารกึ่งตัวนำเป็นอะลูมินัมหนา 1000 nm ได้โครงสร้าง MIS บนแผ่นวงจรรูปที่ 4.15



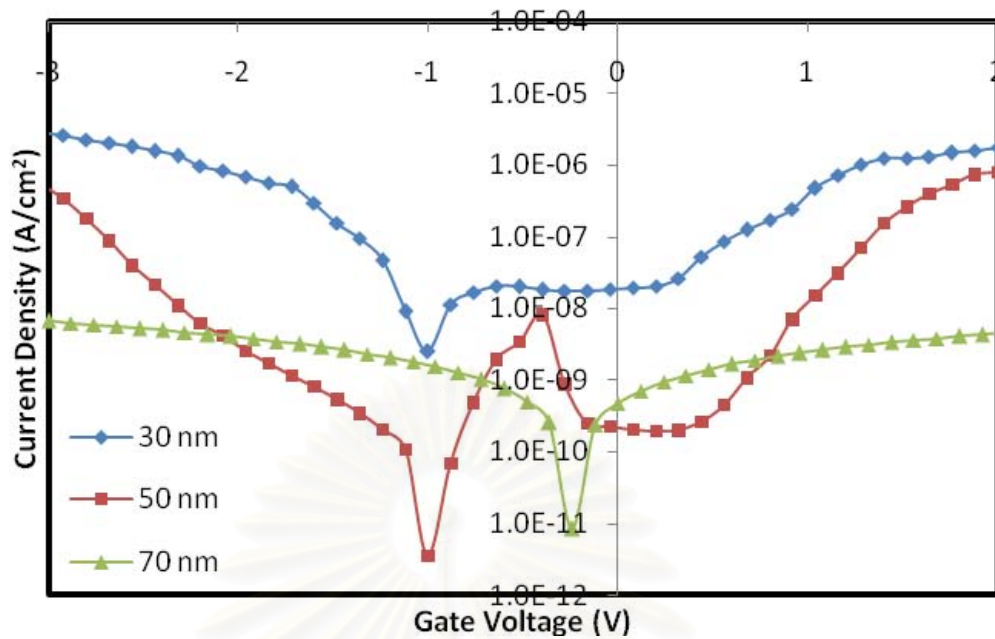
รูปที่ 4.15 โครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์ที่ความหนาต่างๆ เป็น
ฉนวน

4.3.1 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง MIS

จากการศึกษาสมบัติ I-V เพื่อพิจารณาปริมาณกระแสรั่วภายในโครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวนดังรูปที่ 4.15 ด้วยเครื่อง Hewlett packard 4156B precision semiconductor parameter analyzer โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -3 ถึง 2 V ให้แก่โครงสร้าง MIS แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.16

พบว่าแนวโน้มของปริมาณกระแสรั่วจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฉนวนมีค่ามากขึ้น โดยโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์หนา 30 nm มีกระแสรั่วในฉนวนมากที่สุดคือมีกระแสรั่ว 1×10^{-6} A/cm² และโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไนไตรด์หนา 70 nm มีกระแสรั่วในฉนวนน้อยที่สุดคือต่ำกว่า 1×10^{-8} A/cm² ซึ่งสามารถนำมาใช้งานเป็นฉนวนของโครงสร้าง MIS ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

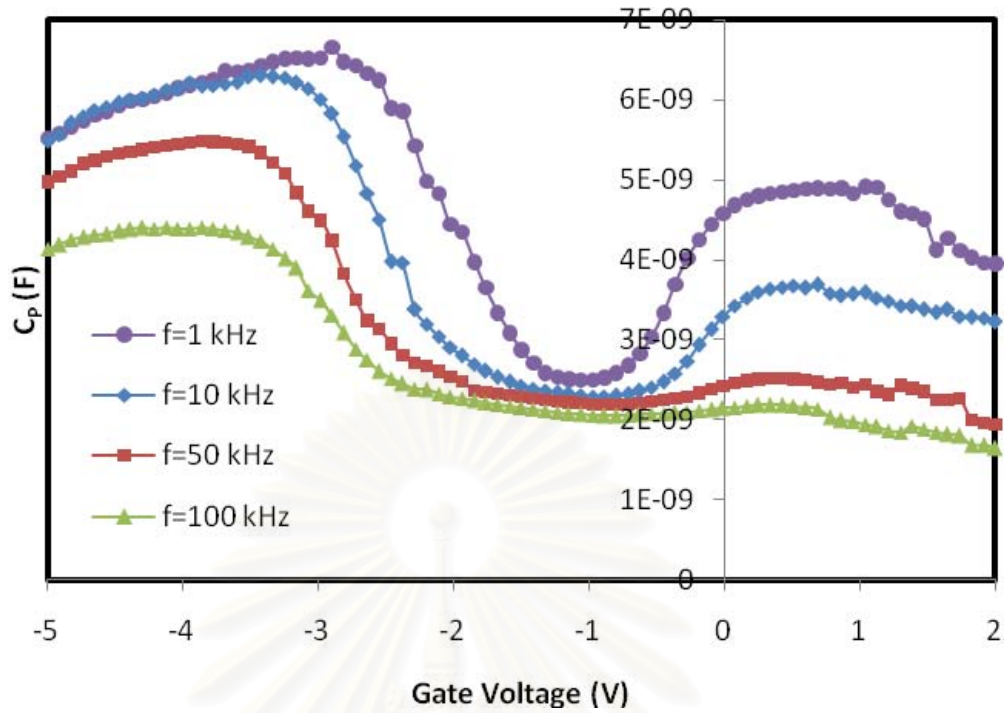


รูปที่ 4.16 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง MIS ที่มีความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ต่างกัน

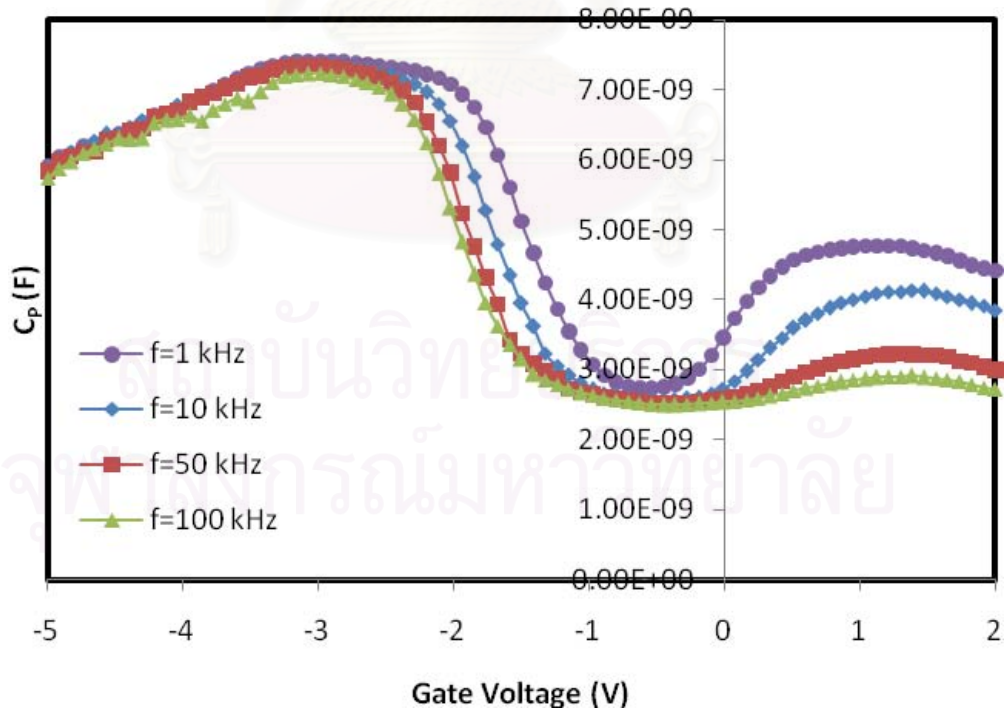
4.3.2 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS

สมบัติ C-V ที่ใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการใช้วงจรแบบขนาน ของโครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.15 เมื่อศึกษาด้วยเครื่อง Hewlett packard 4284 LCR meter โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -5 ถึง 2 V แล้ววัดค่าความจุไฟฟ้าที่แรงดันกระแสตรงค่าต่างๆ พิจารณาที่ความถี่ 1 10 50 และ 100 kHz เมื่อใช้ฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวน ได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.19 ตามลำดับ

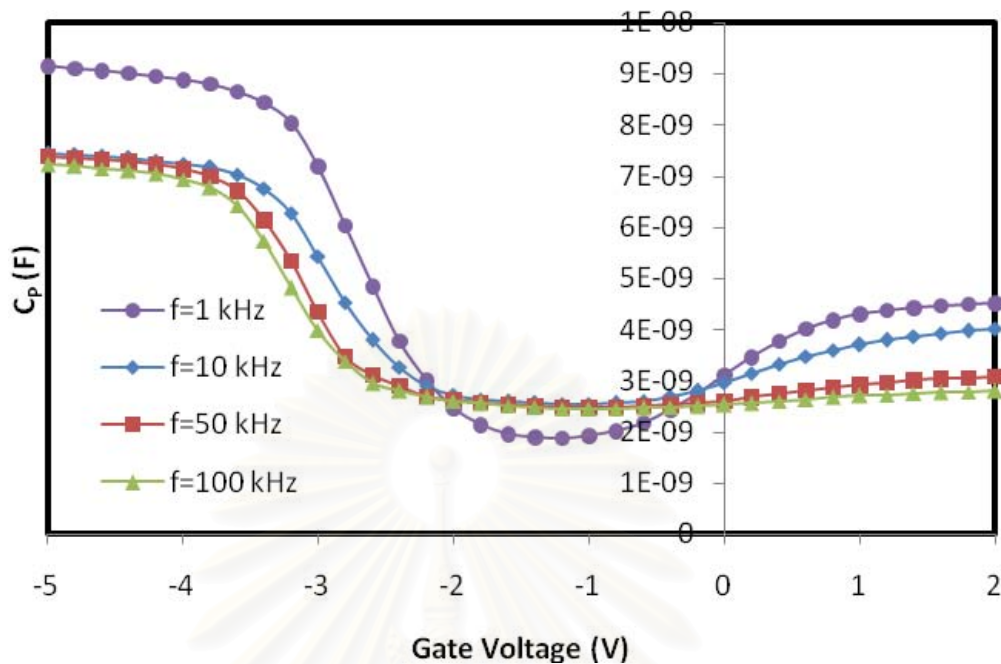
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ไนไตรด์หนา 30 nm เป็นฉนวน



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ไนไตรด์หนา 50 nm เป็นฉนวน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์หนา 70 nm เป็นฉนวน

พบว่าสมบัติ C-V ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.19 เป็นไปตามทฤษฎีคือเมื่อมีการให้ไฟฟ้ากระแสตรงแก่โครงสร้าง MIS จะทำให้โครงสร้าง MIS มีการทำงานเข้าสู่ภาวะแอดคิวิตูเลชันดีพลีทชัน และ อินเวอร์ชัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าความจุไฟฟ้ารวมของโครงสร้าง MIS ที่มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการกระจายของประจุไฟฟ้าในโครงสร้าง MIS จะมีค่าต่างกันในแต่ละภาวะ

เมื่อพิจารณาลักษณะกราฟสมบัติ C-V ในช่วงแรกหรือในภาวะแอดคิวิตูเลชันพบว่าโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์หนา 30 และ 50 nm มีค่าความจุไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในภาวะแอดคิวิตูเลชันจนเข้าสู่ภาวะดีพลีทชัน แตกต่างจากกราฟสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์หนา 70 nm ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าคงที่ในภาวะดังกล่าว ลักษณะของกราฟในภาวะแอดคิวิตูเลชันที่มีค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่ภาวะดีพลีทชันนั้น เกิดจากการมีกระแสรั่วเกิดขึ้นภายในฉนวนของโครงสร้าง MIS [17] จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมินัมออกไซด์ไนไตรด์หนา 30 และ 50 nm จะเกิดกระแสรั่วภายในฉนวน

เมื่อพิจารณาสมบัติ C-V ร่วมกับสมบัติ I-V จะพบว่าได้ข้อมูลที่สอดคล้องกัน นั่นคือ โครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์หนา 30 และ 50 nm มีกระแสรั่วเกิดขึ้นมากกว่าโครงสร้าง MIS ที่มีฉนวนเป็นฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์หนา 70 nm ซึ่งมีกระแสรั่วเกิดขึ้นน้อยมาก

สามารถสรุปได้ว่าความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์ต้องมีค่าอย่างน้อย 70 nm จึงจะสามารถนำมาใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของโครงสร้าง EIS ได้ อย่างไรก็ตามหากความหนาของฉนวนมีมากเกินไป แรงดันไฟฟ้าจะไม่สามารถเหนี่ยวนำประจุผ่านฉนวนได้

สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์สามารถคำนวณได้จากค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอดคิวิตีวูเลชันโดยใช้สมการที่ 3.3 โดยกำหนดให้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่า 10 nm และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.9 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอดคิวิตีวูเลชันและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์ที่คำนวณได้ เมื่อพิจารณาที่ความถี่แตกต่างกัน และความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์เป็น 30 50 และ 70 nm เป็นดังตารางที่ 4.7 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกันเมื่อพิจารณาที่ความถี่แตกต่างกัน เนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้าในภาวะแอดคิวิตีวูเลชันที่วัดได้มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์จากค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่

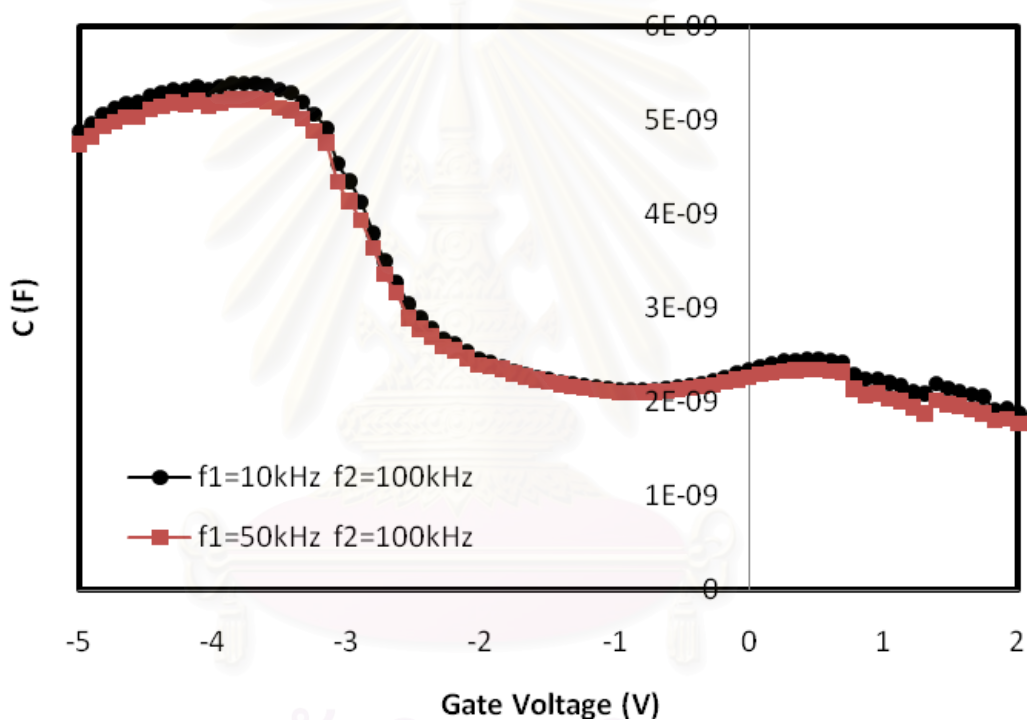
จากการพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะพบว่าเมื่อฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์มีความหนามากขึ้นจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความหนาของฟิล์มจะทำให้เกิดปริมาณกระแสรั่วที่น้อยลง ดังนั้นปริมาณประจุที่สะสมภายในฟิล์มจึงมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.7 ค่าความจุไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดส์ในไตรด์

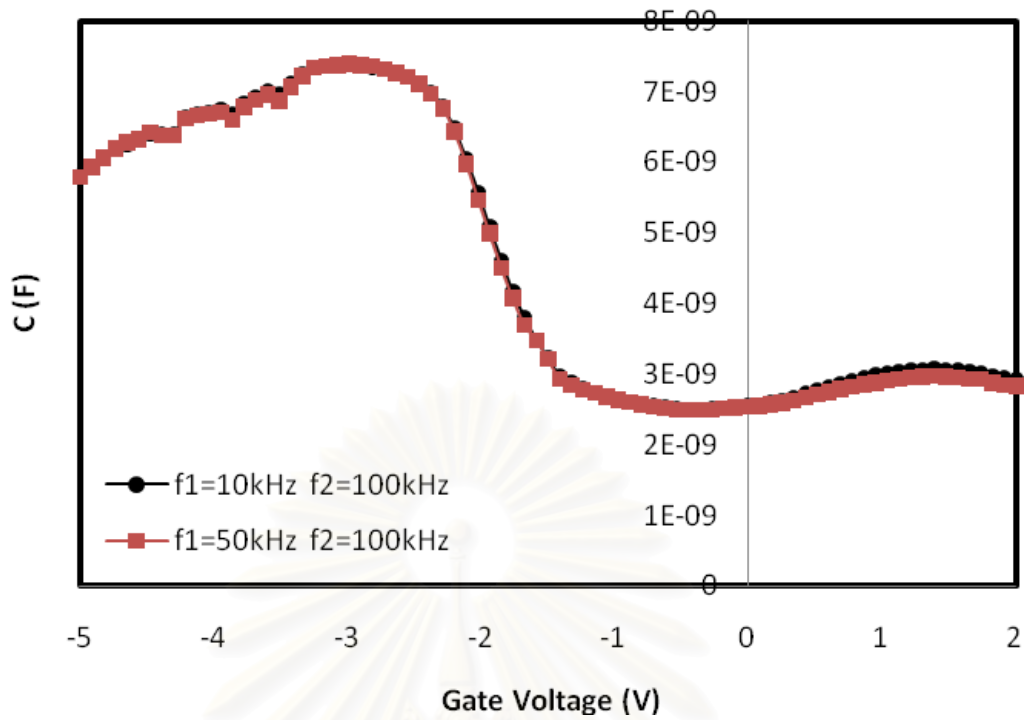
d_{AION} (m)	C_{ox} (F)				ϵ_{AION}			
	1 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	1 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz
30×10^{-9}	5.52×10^{-9}	5.48×10^{-9}	4.97×10^{-9}	4.14×10^{-9}	0.80	0.79	0.72	0.59
50×10^{-9}	5.91×10^{-9}	5.89×10^{-9}	5.84×10^{-9}	5.74×10^{-9}	1.43	1.43	1.42	1.39
70×10^{-9}	9.15×10^{-9}	7.44×10^{-9}	7.39×10^{-9}	7.22×10^{-9}	3.24	2.58	2.56	2.49

4.3.2.1 ความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่

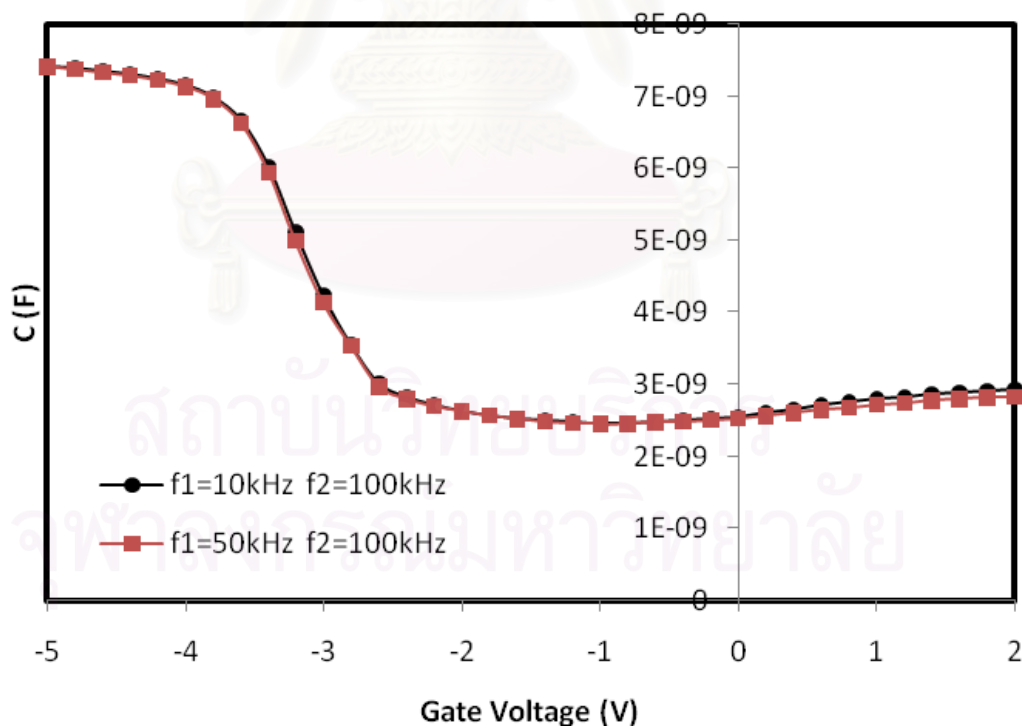
จากการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ (C) ของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวน จากค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จาก 2 ความถี่ที่แตกต่างกันดังสมการที่ 2.1 โดยพิจารณาที่ความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz และศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณได้ แล้วเปรียบเทียบกรณีที่พิจารณาความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz สำหรับโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวน พบว่าได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 30 nm เป็นฉนวน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 50 nm เป็นฉนวน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 70 nm เป็นฉนวน

จากการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์เป็นฉนวน โดยใช้ความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz พบว่าทั้ง 2 กลุ่มของความถี่ทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS เท่ากันในภาวะแอดคิวิตูเลชัน ดีพลีทชัน และอินเวอร์ชัน ซึ่งส่งผลให้กราฟสมบัติ C-V ของทั้ง 2 กลุ่มความถี่มีลักษณะเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้เป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่จริง ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่นี้สามารถคำนวณได้ที่ความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ทั้ง 30 50 และ 70 nm

เมื่อนำค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ในภาวะแอดคิวิตูเลชันที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ โดยใช้ความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz ดังสมการที่ 3.3 และกำหนดให้ความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่า 10 nm และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 3.9 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ในภาวะแอดคิวิตูเลชันและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์ที่คำนวณได้ เมื่อพิจารณาทั้ง 2 กลุ่มความถี่แตกต่างกัน และความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรต์เป็น 30 50 และ 70 nm เป็นดังตารางที่ 4.8 พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มที่คำนวณได้จากความหนาเดียวกันมีค่าเท่ากัน เมื่อพิจารณาที่ความถี่ 50 กับ 100 kHz และความถี่ 10 กับ 100 kHz

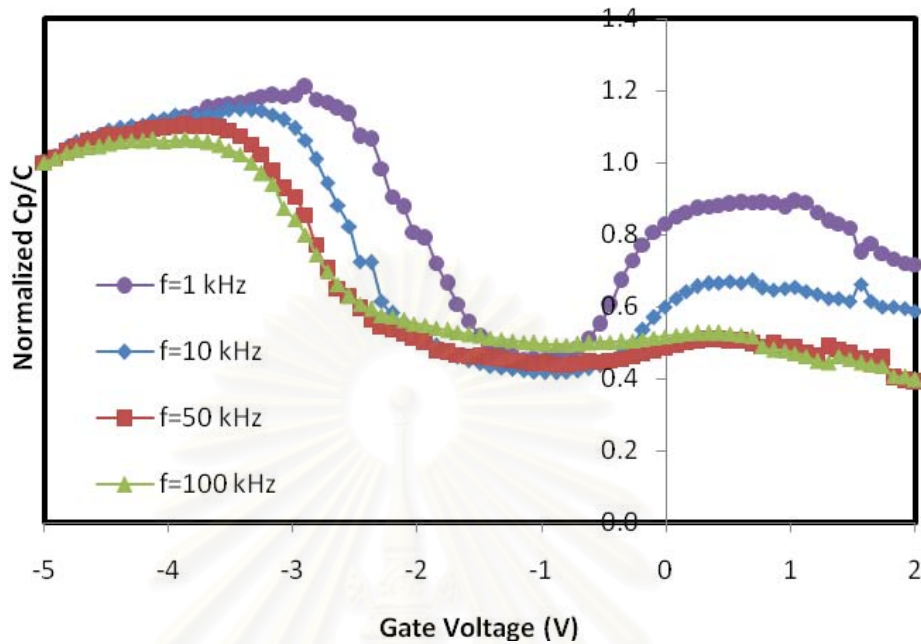
ตารางที่ 4.8 ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

d_{AlON} (m)	C_{ox} (F)		ϵ_{AlON}	
	f1 = 50 kHz, f2 = 100 kHz	f1 = 10 kHz, f2 = 100 kHz	f1 = 50 kHz, f2 = 100 kHz	f1 = 10 kHz, f2 = 100 kHz
30×10^{-9}	4.75×10^{-9}	4.87×10^{-9}	0.68	0.69
50×10^{-9}	5.80×10^{-9}	5.81×10^{-9}	1.40	1.40
70×10^{-9}	7.41×10^{-9}	7.42×10^{-9}	2.56	2.56

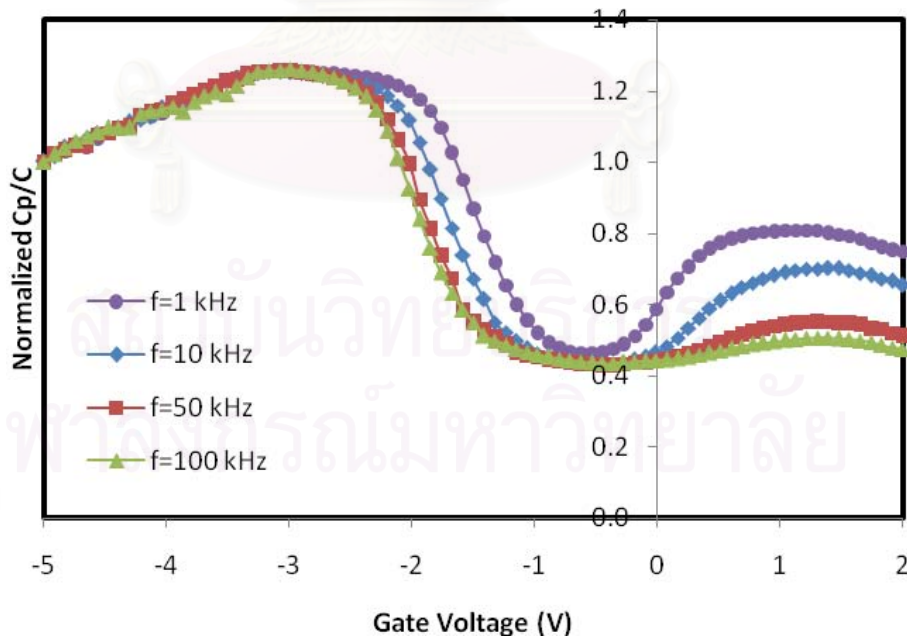
4.3.2.2 ประจุไฟฟ้าภายในฉนวน

การเปลี่ยนแปลงของสมบัติ C-V จากอุดมคติสามารถบ่งบอกถึงชนิดของประจุที่สะสมอยู่ภายในโครงสร้าง MIS ได้ โดยสมบัติ C-V ในอุดมคติจะมีภาวะแอดคิวิตูเลชันคงที่และเริ่มเข้าสู่ภาวะดีพลีทชันที่ตำแหน่งค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ จากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.25 แสดงสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p/C เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100

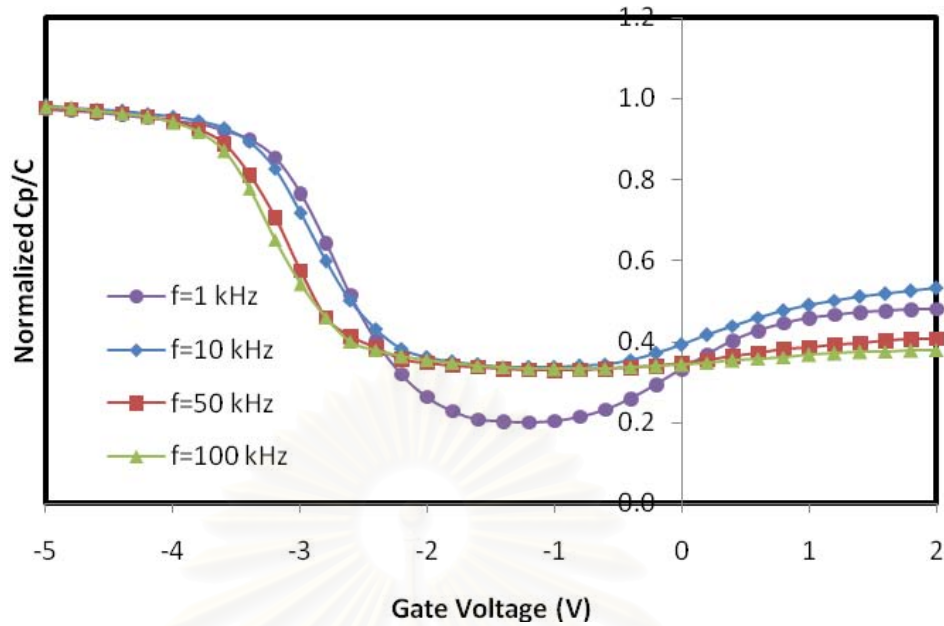
kHz และ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณจากความถี่ 50 ถึง 100 kHz ของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70nm เป็นฉนวนตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 30 nm เป็นฉนวน



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 50 nm เป็นฉนวน



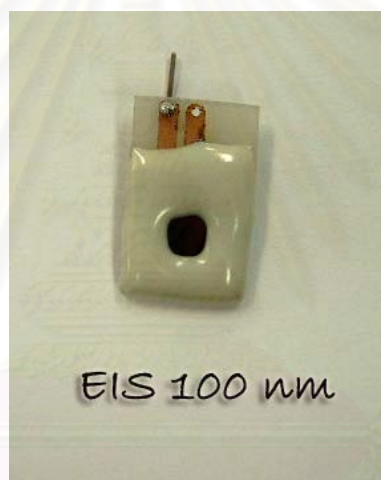
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มหนา 70 nm เป็นฉนวน

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติ C-V จาก C_p/C ของโครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวน กับสมบัติ C-V แบบอุดมคติพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติ C-V ไปจากในอุดมคติ โดยกราฟจะเลื่อนไปตามแกนของแรงดันไฟฟ้าทางค่าที่เป็นลบเมื่อได้รับความถี่สูงขึ้น แสดงว่าภายในโครงสร้าง MIS มีประจุหนึ่งที่เป็นประจุบวกสะสมอยู่ โดยประจุหนึ่งคือประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและอยู่ห่างจากผิวสัมผัสระหว่างฉนวนกับสารกึ่งตัวนำประมาณ 3 nm

เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความถี่ 1 และ 100 kHz พบว่ากราฟสมบัติ C-V ที่ความถี่สูงคือ 100 kHz จะเลื่อนออกจากกราฟสมบัติ C-V ที่ความถี่ต่ำคือ 1 kHz ไปตามแกนของแรงดันไฟฟ้าทางค่าที่เป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีประจุเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอนสะสมอยู่ในโครงสร้าง MIS ที่สร้างขึ้น

4.4 สมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

นำฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไว้ปฏิกิริยาที่ภาวะดังตารางที่ 3.2 โดยฟิล์มมีขนาด 0.5×0.5 cm หนา 100 nm มาทำหน้าที่เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนของโครงสร้าง EIS สำหรับใช้ในการศึกษาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส โดยฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์อยู่บนฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์หนา 10 nm บนสารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนชนิดพี โดยมีแท่งเงิน/เงินคลอไรด์ (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง ต่อขั้วไฟฟ้าด้านสารกึ่งตัวนำซึ่งมีอะลูมิเนียมหนา 1000 nm และปิดรอยต่อต่างๆ ด้วยเรซินสังเคราะห์ให้เหลือแต่บริเวณเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเท่านั้นที่สัมผัสกับสารละลายดังรูปที่ 4.26

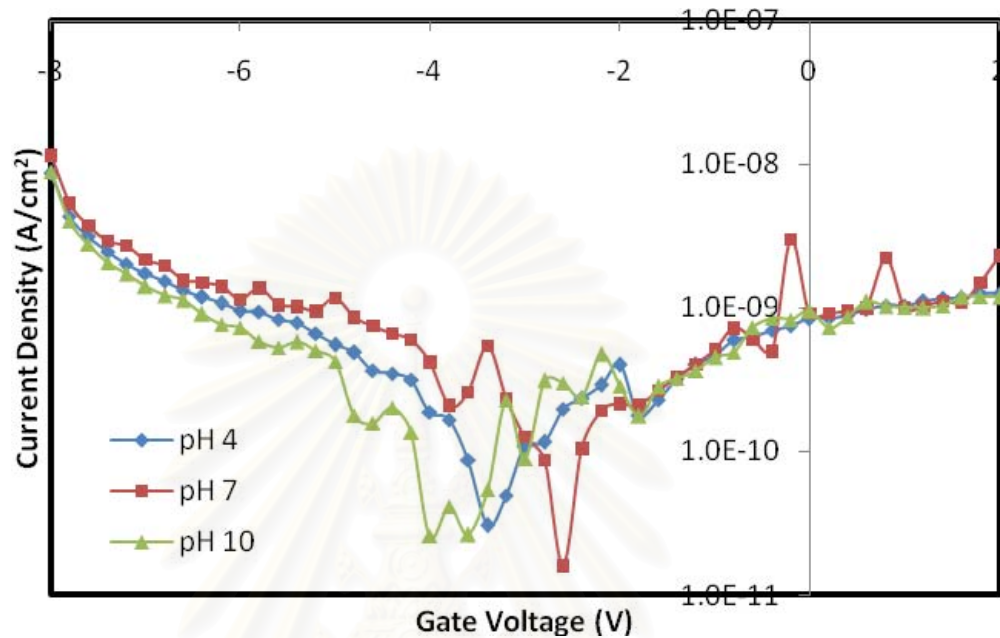


รูปที่ 4.26 โครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้นโดยมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน

4.4.1 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS

จากการศึกษาสมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยใช้เครื่อง Hewlett packard 4156B precision semiconductor parameter analyzer โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า -8 ถึง -1 V ให้แก่โครงสร้าง แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันค่าต่างๆ เมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4.7 และ 10 ได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.27

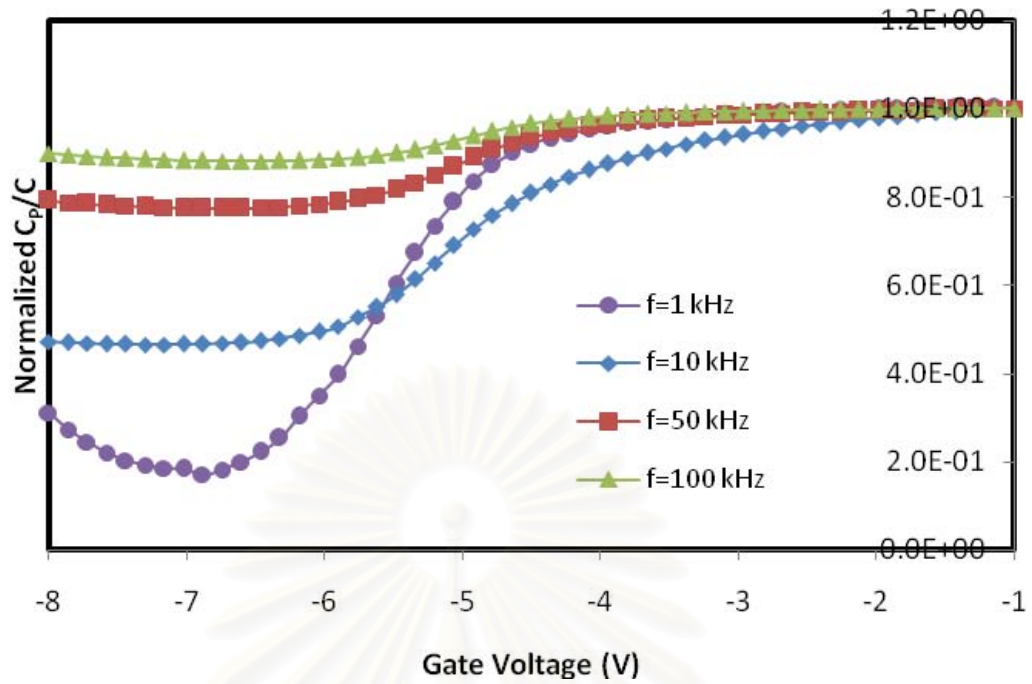
พบว่าโครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วเพียงเล็กน้อยคือ 1×10^{-8} A/cm² แสดงว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิไดรด์หนา 100 nm ที่ใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนนั้นมีความหนาอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมบัติ I-V จากโครงสร้าง MIS



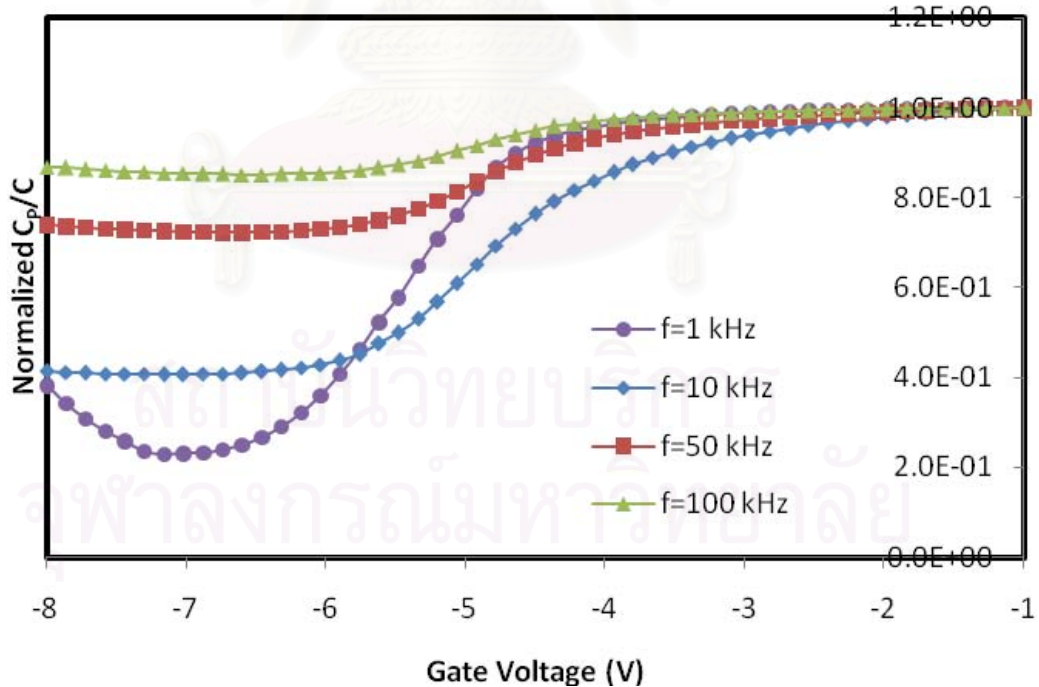
รูปที่ 4.27 สมบัติ I-V ของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10

4.4.2 สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS

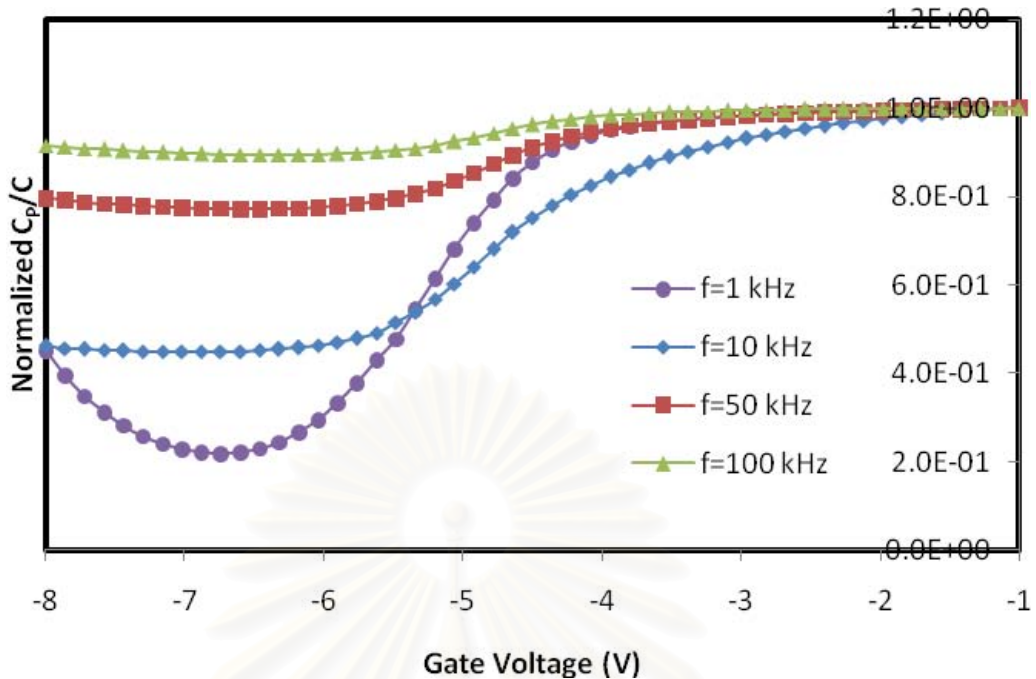
จากการศึกษาสมบัติ C-V โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p/C เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100 kHz และ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณจากความถี่ 10 กับ 100 kHz ดังสมการที่ 2.1 ด้วยเครื่อง Hewlett packard 4284 LCR meter โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -8 ถึง -1 V ให้แก่โครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิไดรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน ได้ข้อมูลดังรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาที่สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 7



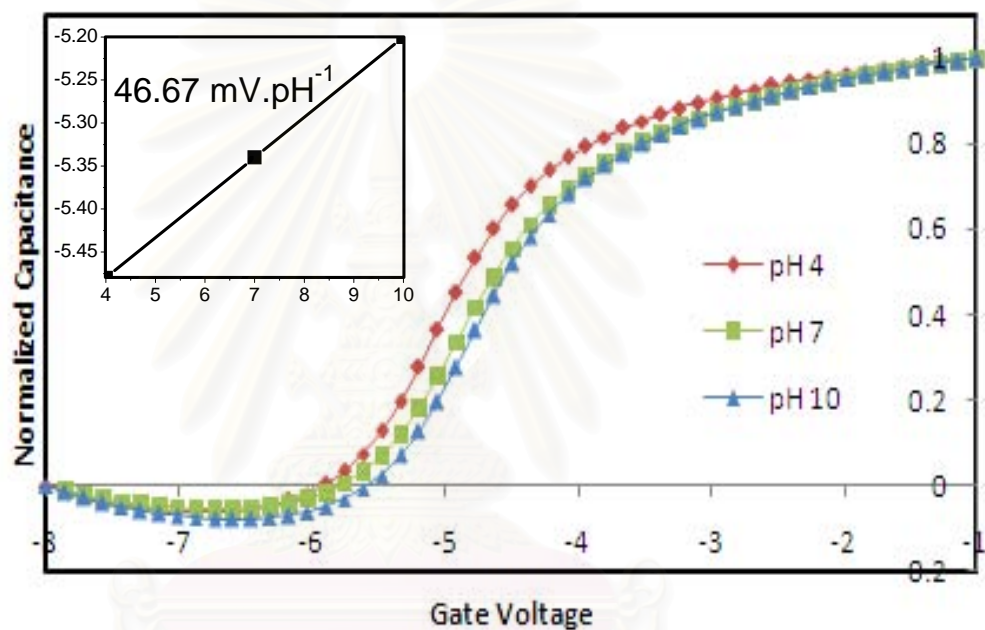
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ C_p/C และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 10

จากผลการทดลองพบว่าสมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS มีการทำงานเข้าสู่ภาวะแอคทีฟมากขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -1 V และเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นลบมากขึ้นจะเข้าสู่ภาวะดีพลิตชันและเริ่มมีแนวโน้มว่าจะเกิดภาวะอินเวอร์ชันที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า -8 V ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใกล้เคียงค่า Breakdown voltage จึงไม่สามารถลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำกว่า -8 V เพื่อศึกษาภาวะอินเวอร์ชันได้ นอกจากนี้สมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS มีลักษณะของกราฟที่กลับด้านจากสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS คือภาวะแอคทีฟเกิดขึ้นที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นลบน้อยกว่าที่ภาวะดีพลิตชันและอินเวอร์ชัน ซึ่งไม่ทราบถึงสาเหตุ จะต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

เมื่อพิจารณาลักษณะกราฟในภาวะแอคทีฟพบว่าการวัดค่าความจุไฟฟ้าคงที่ แสดงให้เห็นว่ามีกระแสรั่วเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมบัติ I-V นั่นคือฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรดอทนา 100 nm ที่ใช้เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนนั้นมีความหนาอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ดังที่ได้ศึกษาจากโครงสร้าง MIS ก่อนหน้านี้

เมื่อพิจารณาสมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็น C_p/C เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่เท่ากับ 1 10 50 และ 100 kHz และ C คือค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่ที่คำนวณจากความถี่ 10 กับ 100 kHz โดยพิจารณาที่สารละลาย pH 4 7 และ 10 ดังรูปที่ 4.31 เพื่อใช้ในการหาค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบส โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อโครงสร้าง EIS อยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน โดย

กำหนดให้ค่าอนุกรมลัด C_p/C เท่ากัน พบว่าโครงสร้าง EIS ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน สามารถบอกความแตกต่างของค่าความเป็นกรด-เบสได้ และได้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 46.67 mV/pH ซึ่งมีค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่าโครงสร้าง EIS ที่มีทั้งสแตนไดรอกไซด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน (44.00 mV/pH) [20] แต่ต่ำกว่าโครงสร้าง EIS ที่มีทินออกไซด์ (58.00 mV/pH) [8] และเลดไทเทเนตเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน (56.70 mV/pH) [2] โดยค่าการตอบสนองในอุดมคติ (Nernstian sensitivity) มีค่า 59.20 mV/pH ที่อุณหภูมิ 25°C [19]



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าที่ไม่ขึ้นกับความถี่และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง EIS เมื่ออยู่ในสารละลายค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 พิล์มอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์ที่ปลูกด้วยเทคนิค อาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปีดเตอริง แบบควบคุมเวลาแก๊สไวปฏิกิริยา สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอในทุกๆ ตำแหน่ง และสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าคงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำได้

5.1.2 จากการศึกษาร่องรอยประกอบทางเคมีพบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์ประกอบด้วยอะลูมิเนียม $54.84 \pm 1.75\%$ ไนโตรเจน $35.28 \pm 1.36\%$ และออกซิเจน $9.88 \pm 0.85\%$ นอกจากนี้การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ยังสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มให้คงที่เมื่อทำการปลูกซ้ำได้เช่นกัน

5.1.3 จากการศึกษาร่องรอยผลึกพบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์ประกอบไปด้วยผลึกของอะลูมิเนียมไนไตรด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์

5.1.4 เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์ก่อนแอนนัลพบว่าขนาดของเกรนอยู่ในช่วง 20–40 nm และเมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C ไม่พบลักษณะที่เปลี่ยนแปลงจากฟิล์มก่อนแอนนัล ทั้งโครงสร้างผลึกและโครงสร้างจุลภาค

5.1.5 ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500°C พบว่าเกิด nucleating site ขึ้นภายในฟิล์มและขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยภายในฟิล์มเล็กลงคือมีขนาดประมาณ 20 nm ที่บางตำแหน่งของฟิล์มมีรอยแตกจากความเค้นเนื่องจากความร้อนเกิดขึ้น

5.1.6 ฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 800°C เกิดการขยายขนาดเกรนและรอยแตกที่เกิดจากความเค้นเนื่องจากความร้อนมีเพิ่มขึ้น

5.1.7 เมื่อศึกษาสมบัติ I-V และสมบัติ C-V ของโครงสร้าง MIS ที่มีฟิล์มอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์หนา 30 50 และ 70 nm เป็นฉนวน พบว่าฉนวนอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์ของโครงสร้าง MIS ควรมีความหนาอย่างน้อย 70 nm จึงสามารถนำมาใช้งานเป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนได้ นอกจากนี้ยังพบว่าฉนวนมีประจุหนึ่งที่เป็นประจุบวกสะสมอยู่และมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอนอีกด้วย

5.1.8 เมื่อศึกษาสมบัติ I-V และสมบัติ C-V ของโครงสร้าง EIS ที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกซิได์ในไตรด์หนา 100 nm เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออนเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบส 4 7 และ 10 พบว่ามีกระแสรั่วเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย โครงสร้าง EIS สามารถบอก

ความแตกต่างของค่าความเป็นกรด-เบสได้ และได้ค่าการตอบสนองต่อค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 46.67 mV/pH

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยและทดลองนี้สามารถทำการศึกษาการหาค่าการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสเพิ่มเติมโดยพิจารณาจากค่าแรงดันขีดเริ่มที่เปลี่ยนแปลงไป โดยศึกษาจากสมบัติ $I_{DS}-V_{GS}$ ของอุปกรณ์ไอสเฟตที่มีฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์เป็นเมมเบรนที่ไวต่อไอออน โดยอุปกรณ์ไอสเฟตอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสที่แตกต่างกัน และพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จริงเมื่ออุปกรณ์ไอสเฟตดังกล่าวอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสแตกต่างกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] P. Bergveld. Thirty years of ISFETOLOGY What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years. Sensors and Actuators. B 88 (2003): 1-20.
- [2] S.S. Jan, Y.C. Chen, J.C. Chou, P.J. Jan, C.C. Cheng. Preparation and properties of hydrogen ion-sensitive field effect transistors with sol-gel-derived Mg-modified lead titanate gate. Journal of Non-Crystalline Solids. 332 (2003): 11-19.
- [3] P. Bergveld. Future applications of ISFETs. Sensor and Actuators. B 4 (1991): 125-133.
- [4] T. Mikolajick, R. Kuhnhold, R. Schnupp, H. Rysse. The influence of surface oxidation on the pH-sensing properties of silicon nitride. Sensors and Actuators. B 58 (1999): 450-455.
- [5] J.C. Chou, C.Y. Weng. Sensitivity and hysteresis effect in Al_2O_3 gate pH-ISFET. Materials Chemistry and Physics. 71 (2001): 120-124.
- [6] T. Mikolajick, R. Kuhnhold, R. Schnupp, H. Rysse. The pH-sensing properties of tantalum pentoxide films fabricated by metal organic low pressure chemical vapor deposition. Sensors and Actuators. B 44 (1997): 262-267.
- [7] J.C. Chou, J.L. Chiang. Study on the amorphous tungsten trioxide ion-sensitive field effect transistor. Sensors and Actuators. B 66 (2000): 106-108.
- [8] H.K. Liao, J.C. Chou, W.Y. Chung, T.P. Sun, S.K. Hsiung. Study of amorphous tin oxide thin films for ISFET applications. Sensors and Actuators. B 50 (1998): 104-109.
- [9] P.K. Shin. The pH-sensing and light-induced drift properties of titanium dioxide thin films deposited by MOCVD. Applied Surface Science. 214 (2003): 214-221.
- [10] W. Xiao, X. Jiang. Optical and mechanical properties of nanocrystalline aluminum oxynitride films prepared by electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition. Journal of Crystal Growth. 264 (2004): 165-171.
- [11] N.J. Iammo, H. Enshashy, R.O. Dillon. Aluminum oxynitride coatings for oxidation resistance of epoxy films. Surface and Coating Technology. 155 (2002): 130-135.

- [12] W. Xidong, W. Fuming, L. Wenchao. Synthesis, microstructures and properties of γ -aluminum oxynitride. Materials Science and Engineering. A342 (2003): 245-250.
- [13] S. Dreer, R. Krismer, P. Wilhartitz, G. Friedbacher. Statistical evaluation of refractive index, growth rate, hardness and Young's modulus of aluminum oxynitride films. Thin Solid Films. 354 (1999): 43-49.
- [14] B. Wilson. Applying metal/sputtering [online]. Available from: <http://cnx.org/content/m1039/latest/>. (2007).
- [15] สุชาติ สุภาพ. ระบบเคลือบฟิล์มบางโดยเทคนิคสเป็คเตอรริง. ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2535).
- [16] รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2549).
- [17] K.J. Yang, C Hu. MOS capacitance measurements for high-leakage thin dielectrics. IEEE Transactions on electron devices. 46 (1999): 1500-1501.
- [18] S.M. Sze. Physics of Semiconductor Device. Wiley-Interscience, New York. (1981)
- [19] P. Bergveld. ISFET, Theory and Practice. IEEE sensor conference Toronto. (2003).
- [20] J.C. Chou, J.L. Chaing. Ion sensitive field effect transistor with amorphous tungsten trioxide gate for pH sensing. Sensors and Actuators.B 62 (2000): 81-87.
- [21] S.N. Ghosh, I.O. Parm, S.K. Dhungel, K.S. Jang, S.W. Jeong, J. Yoo, S.H. Hwang, J. Yi. Field-induced surface passivation of p-type silicon by using AION films. Renewable Energy. 33 (2008): 320-325.
- [22] L.K. The, W.K. Choi, L.K. Bera, W.K. Chim. Structural characterisation of polycrystalline SiGe thin film. Solid-State Electronics. 45 (2001): 1953-1966.
- [23] S.L. Semiatin, P.N. Fagin, M.G. Glavicic, I.M. Sukonnik, O.M. Ivasishin. Influence on texture on beta grain growth during continuous annealing of Ti-6Al-4V. Materials Science and Engineering. A299 (2001): 225-234.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ขั้นตอนการใช้เครื่อง อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ในการปลูกฟิล์ม อะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์

ขั้นตอนการใช้เครื่อง อาร์ เอฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง ในการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์มีดังต่อไปนี้

1. เปิดเครื่องและทำความสะอาดระบบ
2. เคลือบอะลูมิเนียมฟอยล์ที่อยู่ภายในแชมเบอร์ด้วยฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์ โดยภาวะที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเป็นดังตาราง

ตารางแสดงภาวะที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ในไตรด์

Ar Flow Rate (sccm)	12
N ₂ Flow Rate (sccm)	7
Timing [Ar (sec) : N ₂ (sec)]	10:90
Power (W)	200
Thickness (nm)	100
Deposition Rate (nm/sec)	0.94

sccm: standard cubic centimeter per minute

3. เตรียมตัวอย่างที่จะทำการสเป็คเตอริง โดยเตรียมฐานรองได้แก่แผ่นซิลิคอน (100) ขนาด กระจกสไลด์และกระจกสไลด์ ต้มในกรดปิรันยาซึ่งเป็นสารผสมของกรดซัลฟิวริกกับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ใช้ในการกำจัดอนุภาคปนเปื้อนที่เป็นสารอินทรีย์ออกจากพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 120 °C นาน 40 min ทิ้งไว้ 1 hr จากนั้นล้างในน้ำนาน 5 min เป่าลมให้แห้ง และให้ความร้อนโดย Hot plate นาน 40 min

4. นำแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้วางลงในแชมเบอร์แล้วปรับความดันให้เข้าสู่สุญญากาศ
5. เปิดและตั้งค่าความดันแก๊สโดยตั้งค่าอัตราการปล่อยแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจนเท่ากับ 12 sccm และ 7 sccm ตามลำดับ

6. ทำ Plasma cleaning โดยปิดชัตเตอร์บังเป้า ปล่องแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะ จากนั้นเปิด Power generator ปรับ RF power เป็น 50 100 150 200 และ 240 W โดยในแต่ละครั้งทิ้งไว้ 5 min แล้วปรับ RF power ลงมาที่ 200 W ปรับอัตราการปล่อยแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจนไปที่จุดทำงานเท่ากับ 12 และ 7 sccm ตามลำดับ แล้วปล่อยแก๊สออกจากระบบ

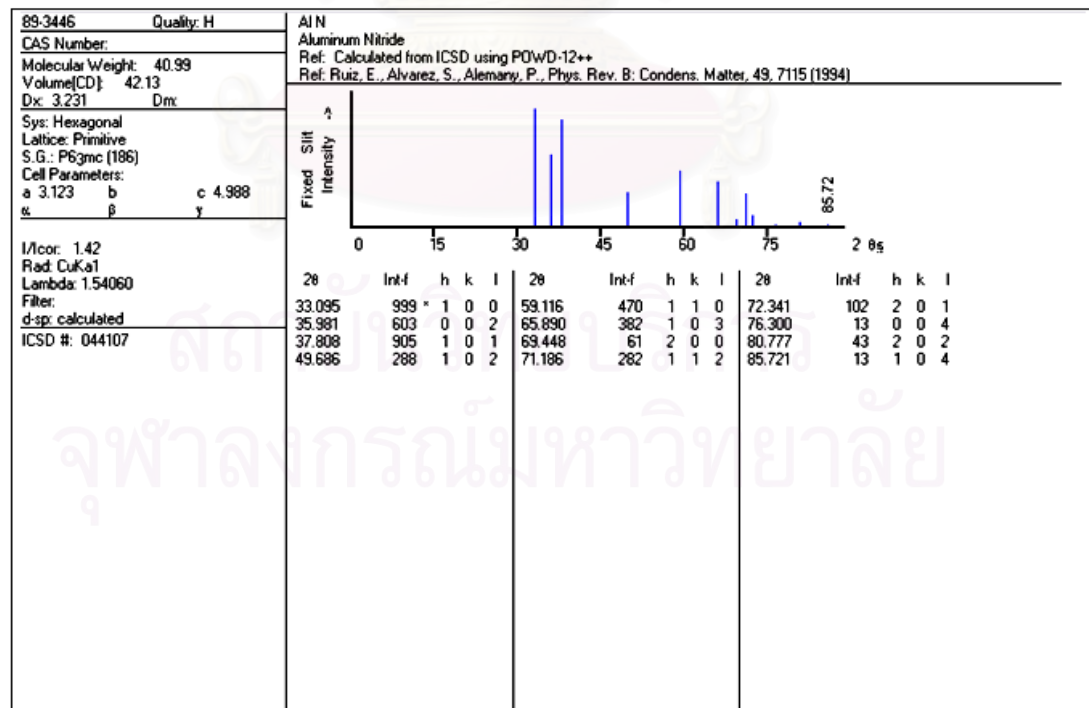
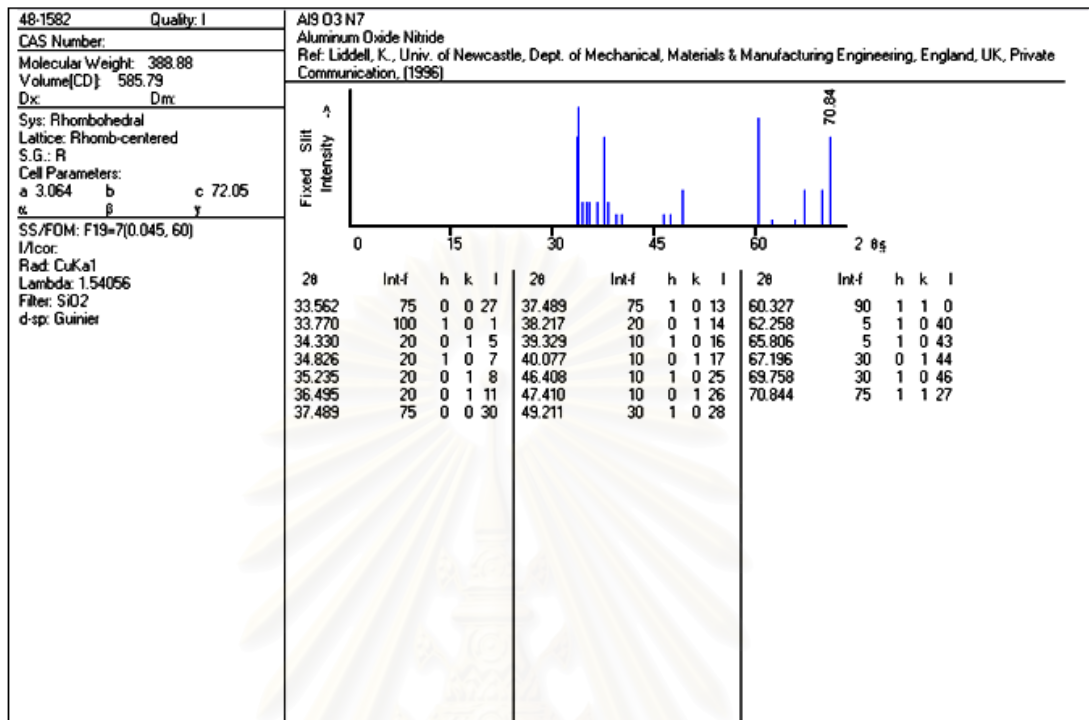
7. เริ่มกระบวนการ Reactive gas timing โดยปรับค่า RF power เป็น 200 W ปิดแก๊สอาร์กอนแล้วเปิดแก๊สไนโตรเจนสลับกัน เพื่อสร้างพลาสมาของแก๊สไนโตรเจน ปิดชัตเตอร์ แล้วเริ่มโปรแกรม

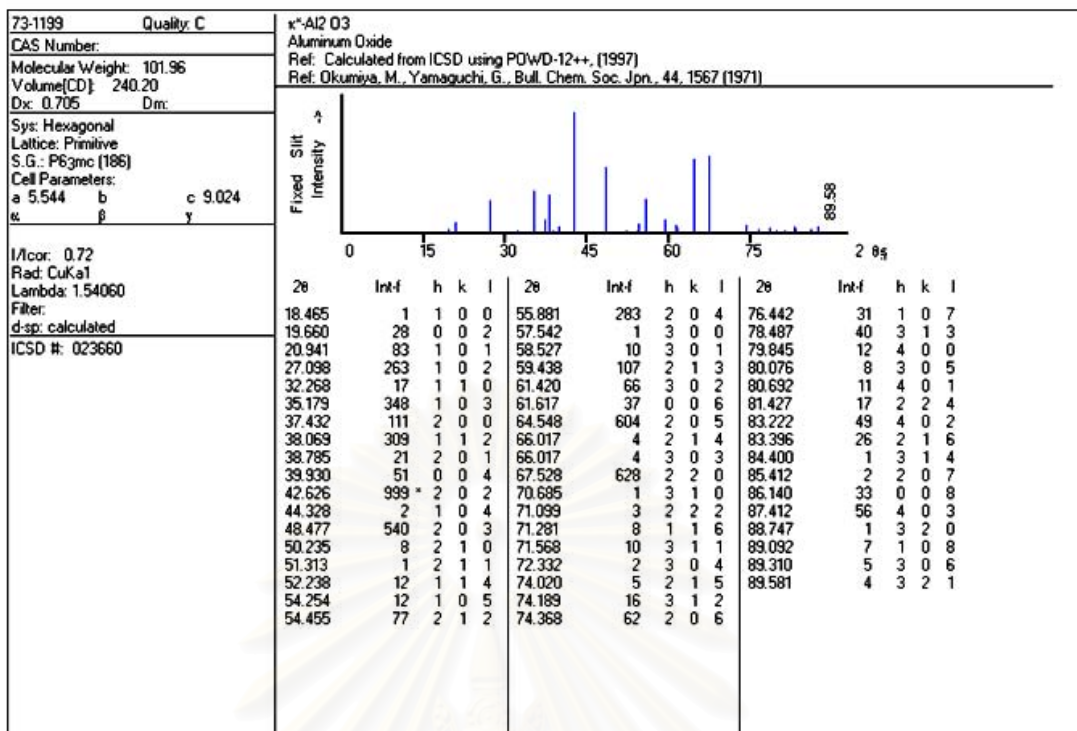
8. ปิดชัตเตอร์ (เมื่ออยู่ในช่วงปล่อยแก๊สอาร์กอน) ปิดแก๊สไนโตรเจน และออกจากโปรแกรม และปรับ RF Power ลดลงจนถึง 30 W แล้วปิดพลาสมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข การ์ดมาตรฐาน JCPDS





สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวน้ำผึ้ง ผังไพบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2526 สถานที่เกิด จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม เมื่อปีการศึกษา 2543 จากนั้นได้รับทุนโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อปีการศึกษา 2547 และระดับประกาศนียบัตรบัณฑิต หลักสูตรการสอนวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2548 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2550

ผลงานที่ตีพิมพ์

Nampueng Pangpaiboon, Win Bunjongpru, Opas Trithaveesak, Jiti Nukeaw, Nisanart Traiphol, Properties of Aluminum Oxynitride (AlON) Thin Film Grown by Reactive RF Magnetron Sputtering, วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ฉบับพิเศษ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย