การปลูกผลึกระดับนาโนเมตรของอลูมินัมไนไตรด์ โดยอาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง แบบควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา

GROWTH OF AlN NANOCRYSTAL BY REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING

วิน บรรจงปรุ
WIN BUNJONGPRU

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-241-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปลูกผลึกระดับนาโนเมตรของอลูมินัมไนไตรด์ โดยอาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง แบบควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา

GROWTH OF AlN NANOCRYSTAL BY REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING



วิน บรรจงปรุ
WIN BUNJONGPRU

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49612
วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-241-4

GROWTH OF AlN NANOCRYSTAL BY REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING

WIN BUNJONGPRU

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2003

ISBN 974-324-241-4

COPYRIGHT 2003
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปลูกผลึกระดับนาโนเมตรของอลูมินัมไนไตรด์โดยอาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริงแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

GROWTH OF AIN NANOCRYSTAL BY REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING

ชื่อนักศึกษา นายวิน บรรจงปรุ

รหัสประจำตัว 43065006

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วราวุฒิ	เถาลัดดา	
รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
ผศ.วิชาญ	เตชิตธีระ	
ผศ.ดร.รัชภาคย์	จิตต์อารี	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 28 กุมภาพันธ์ 2546 เวลา 13.00-16.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ 2 ชั้น 1 ห้อง 110

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 21 **เดือน** มีนาคม **พ.ศ.** 2546

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปลูกผลึกระดับนาโนเมตรของอลูมินัมไนไตรด์ โดยอาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา
นักศึกษา	นายวิน บรรจงปรุ
รหัสประจำตัว	43065006
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริง ด้วยเทคนิคควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาไนโตรเจน จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางพบการจัดเรียงตัวผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ในระนาบ (111) และระนาบ (200) จากการศึกษาภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดพบว่าขนาดเม็ดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตร และเมื่อลดอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนที่เข้าทำปฏิกิริยา ค่าคงที่แลตทิซและขนาดเม็ดผลึกจะลดลง ทำการศึกษาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปีที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนลดลง นำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกได้ประดิษฐ์เป็นโฟโตดีเทคเตอร์และสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ใหม่หัววัดค่าความเป็นกรด-เบสชนิดของแข็ง

Thesis Title	Growth of AlN Nanocrystal by Reactive Gas-timing rf Magnetron Sputtering
Student	Mr. Win Bunjongpru
Student ID.	43065006
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jiti Nukeaw

ABSTRACT

The objective of this research is growth of cubic-AlN nanocrystal by Gas-timing reactive RF magnetron sputtering. The X-ray diffraction patterns of all deposited films show orientation of cubic zincblende structure in (111) and (200) planes. Scanning electron microscope was used to observe the surface morphology that shows all deposited films have the grain size in nanoscale. The lattice constant and grain size decreased with decreasing flow rate of N_2. Band-gap energy of AlN thin films was investigated by room-temperature photoreflectance spectroscopy. The band-gap transition energies increased with decreasing flow rate of N_2. AlN thin films were applied to photodetector devices and new-function device of solid-state pH sensor.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีได้นั้น ต้องขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ รศ. ดร. จิติ หนูแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาซึ่งเป็นผู้มอบโอกาส ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และมอบความทรงจำที่แสนสนุกในการทำงาน

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัยระดับปริญญาเอก ของคุณ นิศาพร พรธีรภัทร (พี่หน่อง) ขอขอบคุณพี่หน่อง สำหรับคำชี้แนะในการทำงานวิจัย ขบวนการแก้ปัญหา และสำนึกในการทำงานเพื่อส่วนรวม

ขอขอบคุณรุ่นพี่ QosLab. ทุกท่าน (พี่โม พี่หนอ พี่ชาติ) ที่ช่วยสร้างความเข้มแข็งและวางแนวทางการทำงานอย่างเป็นระบบแก่ QosLab. ของเรา

ขอขอบคุณน้ำใสใจจริงจาก เพื่อนปริญญาโททุก ๆ ท่าน จึงทำให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรคในการเรียนมาได้โดยตลอดรอดฝั่ง

ขอขอบใจคุณลลิตา เจริญวุฒิวงษา (น้องย้ง) ที่ทำให้การทำงานทุก ๆ วันมีความหมาย

สุดท้ายขอขอบคุณความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจอันอบอุ่นเสมอมาจากครอบครัว บรรจงปรุ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้ ซึ่งเกิดจากความวิริยะอุตสาหะของชาว QosLab. ทุกท่านฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการแก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อยครับ

วิน บรรจงปรุ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 การดำเนินงานวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....4

2.1 สมบัติทางกายภาพของสารประกอบอลูมินัมไนไตรด์.....4.

2.1.1 สมบัติทางโครงสร้างของสารอลูมินัมไนไตรด์.....5

2.1.2 สมบัติทางแสงของอลูมินัมไนไตรด์.....7

2.2 ผลึกระดับนาโนเมตร.....9

2.2.1 แบบจำลองมวลประสิทธิผล.....11

2.2.2 ผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม.....13

2.3 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอริง.....14

2.3.1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....15

2.3.2 ค่ายีลด์ของสปัตเตอริง 16

2.3.3 ขบวนการกาซดิสชาร์จ 17

2.3.4 ระบบปลูกฟิล์มบางอาร์ เอฟ สปัตเตอริง.....18

2.4 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....19

2.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....19

2.4.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3 หลักการของโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....26

2.5 โครงสร้างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ.....30

2.5.1 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบชอตต์กี.....30

2.5.2 รอยต่อโครงสร้างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ.....35

2.5.3 รอยต่อโครงสร้างอิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ.....36

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....38

3.1 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง.....38

3.1.1 ห้องสุญญากาศสูง.....39

3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ.....39

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....43

3.2.1 ระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....43

3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....44

3.2.3 ระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี.....45

3.3 การทำความสะอาดกระจกสไลด์.....46

3.4 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง.....47
แบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

3.4.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มกับ.....47
ปริมาณอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

3.4.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มกับอัตราการปล่อย.....48
กาซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน

3.5 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง.....48
แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

3.5.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....50
โดยควบคุมช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอนและช่วงเวลาในการ
ปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

3.5.2 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....50
ที่ความหนาต่าง ๆ

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.3 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....50
โดยเปลี่ยนอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน
3.5.4 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....51
ที่กำลังของคลื่นอาร์ เอฟค่าต่าง ๆ
3.5.5 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....51
ที่ความหนาของฟิล์มต่าง ๆ
3.6 กระบวนการสร้างและวัดสมบัติเฉพาะของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....52
โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ
3.7 กระบวนการสร้างและวัดสมบัติเฉพาะของหัววัดค่าค่าเป็นกรด-เบส 55
โครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....56
4.1 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง.....56
แบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา
4.1.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มกับ 56
ปริมาณกาซอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ
4.1.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มกับอัตราการปล่อย.....57
กาซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน
4.2 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง.....59
แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา
4.2.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....59
โดยควบคุมช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอนและช่วงเวลาในการ
ปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ
4.2.2 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....60
ที่ความหนาต่าง ๆ
4.2.3 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....62
โดยเปลี่ยนอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....67
ที่กำลังของคลื่นอาร์ เอฟค่าต่าง ๆ
4.2.5 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา.....70
ที่ความหนาต่าง ๆ
4.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....73
โครงสร้างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ
4.4 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดค่า ความเป็นกรด-เปส 75
โครงอิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....76

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....81

เอกสารอ้างอิง.....82

ประวัติผู้เขียน.....83

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์
ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ.....63

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอทไซท์.....5

2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....6

2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบร็อคซอลท์.....7

2.4 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์.....8

2.5 แสดงการลูมิเนสเซนส์ของแสงจากย่านสีน้ำเงินถึงสีแดงจาก ควอนตัมดอทของ.....9
CdSe ที่เป็นฟังก์ชันของขนาดของเม็ดผลึกที่เพิ่มขึ้น(1.5-8 นาโนเมตร)

2.6 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำผลึกในระดับนาโนมาประยุกต์ใช้งาน.....10

2.7 แสดงการจำลองด้านพื้นผิวของฟิล์มบางที่มีเม็ดผลึกระดับนาโนเมตร.....13
เปรียบเทียบเป็นโครงสร้างบ่อควอนตัมที่มีศักย์สูงอนันต์

2.8 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของขนาดเม็ดผลึกระดับนาโนเมตร.....14
กับค่าแถบพลังงานต้องห้าม

2.9 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ.....15

2.10 แสดงลักษณะแผนภาพในระบบ อาร์ เอฟ สปัตเตอริง.....18

2.11 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....19

2.12 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer 20

2.13 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer.....20

2.14 แสดงค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....22

2.15 แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....23

2.16 แสดงรูปแบบของการมอดูเลทภายนอก.....26

2.17 แสดงรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบชอตต์กี.....30

2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะสารกึ่งตัวนำ.....33

2.19 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำเมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอส.....34

2.20 แสดงโครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....35

2.21 แสดงรอยต่อโครงสร้างอิเล็กโทรไลด์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ.....36

2.22 แสดงลักษณะการพินของระดับเฟอร์มิที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำ.....37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.23 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของระดับเฟอร์มิที่พื้นผิวเมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นเบส-กลาง-กรด 37
3.1 แสดงลักษณะของระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง 38
3.2 แสดงลักษณะภายในห้องสุญญากาศ 39
3.3 แสดงลักษณะปั๊มกลโรตารี ของบริษัท EDWARDS รุ่น RV12 39
3.4 แสดงลักษณะปั๊มไอฟุ้งกระจาย รุ่น E04K 40
3.5 แสดงลักษณะของเกจพิรานิของบริษัท EDWARDS รุ่น PRM10K 41
3.6 แสดงลักษณะของเกจเพ็นนิ่งของบริษัท EDWARDS รุ่น CP25K 41
3.7 แสดงระบบสุญญากาศของระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง 42
3.8 แสดงลักษณะของระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ของบริษัท Bruker รุ่น D8 43
3.9 แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด 44
3.10 แสดงระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี ที่ QOSLab. 45
3.11 การใช้แสงที่ผ่านจากตัวตัดแสงไปกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่ 45
3.12 แสดงรูปเครื่องอัลทราโซนิกส์ 46
3.13 แสดงไดอะแกรมในการป้อนกาซอาร์กอนและกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยเทคนิคปลูกฟิล์ม แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา 49
3.14 แสดงลักษณะพลาสมาในขบวนการสปัตเตอริงแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา 49
3.15 แสดงลักษณะฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่เตรียมได้ 51
3.16 ลักษณะแผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอน 52
3.17 แสดงลักษณะเครื่องเคลือบขั้วโลหะทองและตัวอย่างโฟโตดีเทคเตอร์ที่เคลือบขั้วทองแล้ว 53
3.18 แสดงลักษณะเตาอบ 53
3.19 แสดงลักษณะของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ 54
3.20 แสดงลักษณะหัววัดค่า pH โครงสร้าง อิเล็กโทรไลด์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการป้อนกาซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ 56

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน 57

4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ความหนา 500 นาโนเมตรที่ปลูกแบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา 58

4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยใช้ $t_{Ar} : t_{N_2}$ ต่าง ๆ 59

4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ 60

4.6 แสดงสเปกตรัม โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา 60

4.7 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา 61

4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ 62

4.9 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจาก SEM ขยาย 50,000 เท่า ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ 65

4.10 แสดงสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ 66

4.11 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซจากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟค่าต่าง ๆ 67

4.12 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจาก SEM ขยาย 50,000 เท่า ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟค่าต่าง ๆ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์.....70
ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ
4.14 แสดงภาพถ่ายพื้นผิว SEM ขยาย 50,000 เท่า ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์.....72
ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้น.....73
4.16 แสดงสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของโฟโตดีเทคเตอร์.....74
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารละลายที่มีค่า pH ต่าง ๆ.....75
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนกับค่าคงที่แลตทิซ 77
ในระนาบ (111)
4.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ 78
กับอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สารประกอบไนไตรด์ของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V (III-V nitrides) นั้นสามารถประยุกต์ใช้เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มากมาย โดยเฉพาะในย่านความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินและอัลตราไวโอเลตทั้งนี้เพราะสมบัติเด่นที่มีแถบพลังงานต้องกว้าง (Wide bandgap) ตัวอย่างสารประกอบในกลุ่มนี้ได้แก่ แกลเลียมไนไตรด์ (GaN), อลูมินัมไนไตรด์ (AlN) และ อินเดียมไนไตรด์ (InN) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเวอทไซท์ (Wurtzite) สารประกอบดังกล่าวนั้นมีลักษณะเป็นแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง (Direct band gap) มีแถบพลังงานต้องห้าม 3.4 eV, 6.2 eV และ 1.9 eV ตามลำดับ จากค่าแถบพลังงานต้องห้ามเห็นได้ว่าสารกลุ่ม III-V ไนไตรด์มีศักยภาพที่จะนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางแสง (Optical devices) ที่สามารถทำงานได้ตั้งแต่ย่านความยาวคลื่นแดงไปจนถึงย่านอัลตราไวโอเลต

เทคโนโลยีความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินและอัลตราไวโอเลตนับได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญมาก เป็นผลทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมากมายกล่าวได้ว่า สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่มีแพร่หลายอยู่ในปัจจุบันนั้นสามารถทำงานได้อย่างดีเยี่ยมในความยาวคลื่นย่านอินฟราเรดถึงเขียว หากสามารถขยายการทำงานให้ถึงย่านสีน้ำเงินแล้ว สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำก็จะมีความสามารถทั้งการบ่ลดปล่อยและตรวจวัดได้ทั้ง น้ำเงิน เขียว แดง ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากในการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีภาพและกราฟิก รวมทั้งด้านการสื่อสาร สิ่งแวดล้อม และ อวกาศ ดังนั้นในจำพวกสารกึ่งตัวนำประเภทแถบพลังงานต้องห้าม กลุ่ม III-V ไนไตรด์จึงเป็นที่คาดหวังและดึงดูดความสนใจของนักวิจัยทั่วทั้งโลก ขณะเดียวกันก็ถูกเปรียบเทียบอย่างหนักกับสารประกอบกลุ่ม GaAs และ Si ช่วงระยะเวลาประมาณ 30 กว่าปีที่ผ่านมา

การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ให้มีโครงสร้างเป็นผลึก สามารถปลูกได้โดยวิธีการจัดเรียงอะตอมด้วยระบบปลูกฟิล์มบางที่มีคุณภาพสูง เช่นระบบ Molecculai Beam Epitaxy (MBE) Chemical Vapor Deposition (CVD) และ Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์โดยใช้ระบบอาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริง โดยนำเสอนเทคนิคใหม่คือ เทคนิคการควบคุมเวลาของกาซไวปฏิกิริยา (Reactive Gas-timing) ที่เข้าสู่ระบบ วิธีนี้ทำให้สามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ได้โครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ (Zincblende) ได้ง่าย และเม็ดผลึกที่ปลูกได้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร จากการทดลองเปรียบเทียบการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ด้วยระบบเดียวกันนี้ แต่ไม่มี

การควบคุมเวลาของกาซที่เข้าสู่ระบบพบว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ด้วยระบบอาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง

1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ให้มีคุณภาพสูง

1.2.3 ศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านโครงสร้างของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์โดย การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

1.2.4 ศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านแสงโดยระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี (Photoreflectance Spectroscopy: PR) เพื่อประยุกต์ทำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง

1.2.5 เพื่อนำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกได้มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสงหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ

1.3 การดำเนินงานวิจัย

เริ่มต้นจากการเรียนรู้การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบอาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริงให้มีความชำนาญโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของเครื่องและผู้ใช้งาน จากนั้นพัฒนาเทคนิคขบวนการการปลูกฟิล์มบางให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถทดลองซ้ำได้ผลลัพธ์เหมือนเดิม ทดลองปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ในเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

1.3.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยควบคุมช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอนและ ช่วงเวลาในการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

1.3.2 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ

1.3.3 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน

1.3.4 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟค่าต่าง ๆ

1.3.5 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่ความหนาต่าง ๆ

เมื่อปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ได้แล้วนำไปตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD และ SEM ศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านแสงด้วยระบบ โฟโตรีเฟลกแทนซ์ จากผลการตรวจวัดมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงเทคนิคขบวนการปลูกฟิล์มบางเพื่อให้ได้ฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์คุณภาพสูงต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 มีความรู้และสามารถใช้งานระบบอาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริงได้อย่างชำนาญและมีประสิทธิภาพ

1.4.2 มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่อง XRD, PR, SEM

1.4.3 สามารถพัฒนาเทคนิดการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์คุณภาพสูงได้ด้วยระบบอาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริงซึ่งค่าใช้จ่ายไม่สูงต่างกันกับระบบปลูกสารแบบจัดเรียงอะตอมในต่างประเทศ

1.4.4 สามารถปลูกฟิล์มบางที่มีเม็ดผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตรซึ่งสามารถแสดงปรากฏการณ์ทางควอนตัม

1.4.5 สามารถนำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์คุณภาพสูงที่ปลูกได้ มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สมบัติทางกายภาพของสารประกอบอลูมินัมไนไตรด์

อลูมินัมไนไตรด์เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V ที่ดึงดูดความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกมากที่สุด เนื่องจากมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามกว้างและมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่โดดเด่นหลายประการ เช่น ความแข็ง (Hardness) การนำความร้อนได้สูง (High thermal conductivity) มีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง ๆ (Resistance to high temperature) และ ทนต่อการกัดกร่อนของสาร (Resistance to chemical) ทำให้อลูมินัมไนไตรด์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้าน บรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic packaging) ทำเป็นชั้นฉนวน (Insulator) ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องด้วยมีแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง มีสมบัติทางด้านเพียโซอิเล็กตริก (Piezoelectric effect) ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์เซอเฟสอะคูสติก (Surface acoustic devices)

ในอดีตการสังเคราะห์อลูมินัมไนไตรด์ให้มีความบริสุทธิ์นั้น เป็นเรื่องที่ทำได้ยากมาก เนื่องด้วยสารอลูมินัมเองมีความไวในการทำปฏิกิริยาหรือรวมตัวกับกาซออกซิเจน (O_2) และคาร์บอน (C) ที่ปนเปื้อนอยู่ในระบบปลูกสาร ซึ่งการปนเปื้อนของออกซิเจนและคาร์บอนในฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าแถบพลังงานต้องห้าม และ ค่าคงที่แลตทิซที่วัดได้ผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง

ปัจจุบันนักวิจัยสามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ให้มีคุณภาพสูง โดยใช้เทคนิค Molecular Beam Epitaxy (MBE) และ Organo Metallic Vapor-Phase Epitaxy (OMVPE) ทำให้สามารถวัดสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของ อลูมินัมไนไตรด์ได้แต่ก็ค่อนข้างยุ่งยากและปนเปื้อนจากสารคาร์บอนได้ง่าย

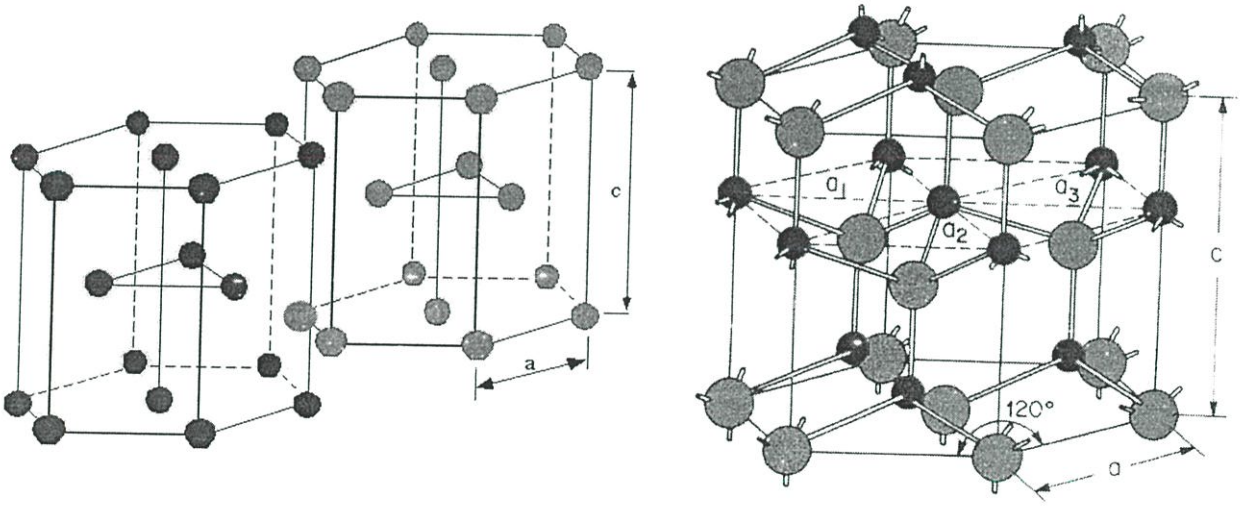
อลูมินัมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวอทไซท์ (Wurtzite) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 20.495 gm/mol จากรายงานพบว่า ค่าคงที่แลตทิซ (a) มีค่าอยู่ในช่วง 3.110 - 3.113 อังสตรอมและ ค่าคงที่แลตทิซ (c) มีค่าอยู่ในช่วง 4.978 – 4.982 อังสตรอม อัตราส่วนของ c/a จึงอยู่ในช่วง 1.000 – 1.602 (อัตราส่วนของ c/a ในอุดมคติเท่ากับ 1.333 อังสตรอม) ในสภาวะกึ่งเสถียรภาพ (Metastable) ของอลูมินัมไนไตรด์พบว่า ค่าคงที่แลตทิซ a ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zincblende) เท่ากับ 4.38 อังสตรอม และค่าคงที่แลตทิซ a ของโครงสร้างผลึกแบบร็อคซอลท์ (Rocksalt) อยู่ในช่วง 4.043 – 4.045 อังสตรอมที่อุณหภูมิห้อง

2.1.1 สมบัติทางโครงสร้างของสารอลูมินัมไนไตรด์

วัสดุกลุ่ม III ไนไตรด์มีโครงสร้างผลึกพื้นฐานอยู่สามแบบด้วยกัน คือ เวอทไซท์ ซิงค์เบลนด์ และ ร็อคซอลท์ ภายใต้ความดันบรรยากาศ และอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนโครงสร้างผลึกของก้อนสาร AlN, GaN และ InN จะเป็นแบบเวอทไซท์

งานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมาสามารถปลูกฟิล์มบาง AlN, GaN และ InN ให้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ สามารถทำได้ด้วยวิธีจัดเรียงอะตอม (Epitaxy) บนฐานรองรับระบบลูกบาศก์ เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความดันสูงมาก ๆ AlN, GaN และ InN จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ ร็อคซอลท์หรือเป็นโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันกับ NaCl นั้นเอง

โครงสร้างผลึกแบบเวอทไซท์ เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal Close – packed: hcp) ที่มีอะตอมต่างชนิดกันมาซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 2.1

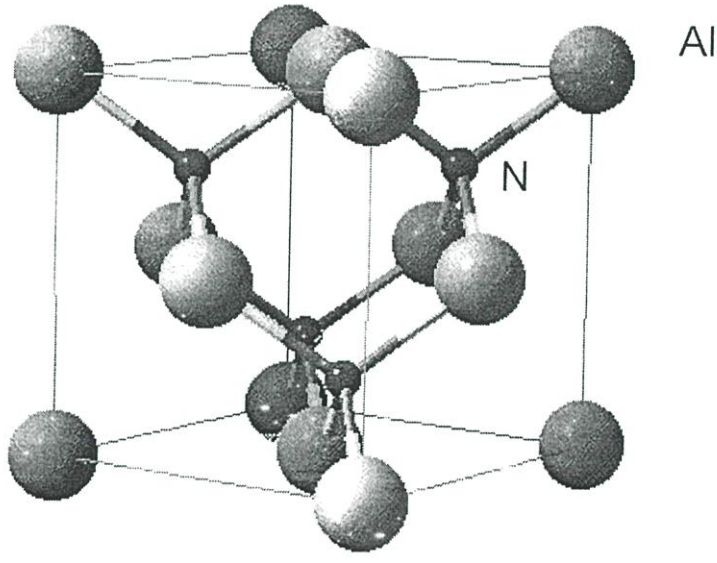


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ที่มีอะตอมต่างชนิดกันมาซ้อนกันในแบบเดียวกับโครงสร้างแบบเพชร ซึ่งผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ได้แก่ ผลึกสารกึ่งตัวนำของสารประกอบเชิงคู่ ในกลุ่ม II-VI และ III-V ดังนั้นในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีอะตอมอยู่สองชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น อลูมินัมไนไตรด์ ดังรูปที่ 2.2 มีตำแหน่งของอะตอมดังนี้

อะตอม Al อยู่ที่ 0 0 0, 0 ½ ½, ½ 0 ½, ½ ½ 0

อะตอม N อยู่ที่ ¼ ¼ ¼, ¼ ¾ ¾, ¾ ¼ ¾, ¾ ¾ ¼

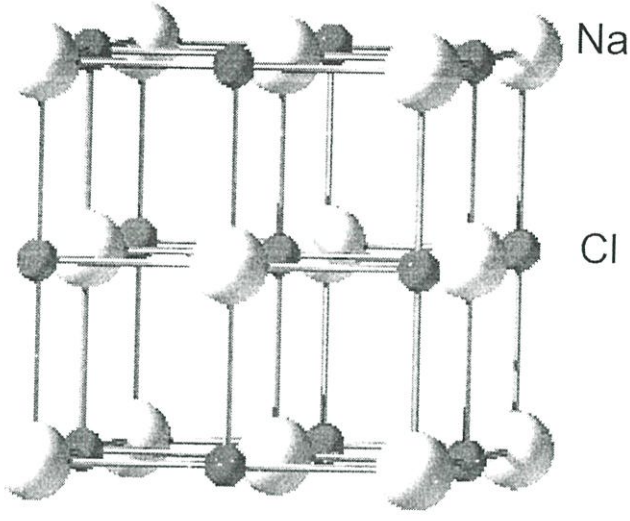


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบร็อคซอลท์ มีบราเวส์แลตทิซ (Bravais lattice) แบบลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ แต่ละอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมต่างชนิดกันอีก 6 อะตอมดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีตำแหน่งของอะตอมดังนี้

อะตอม Na อยู่ที่ $000;\ \frac{1}{2}\frac{1}{2}0;\ \frac{1}{2}0\frac{1}{2};\ 0\frac{1}{2}\frac{1}{2};$

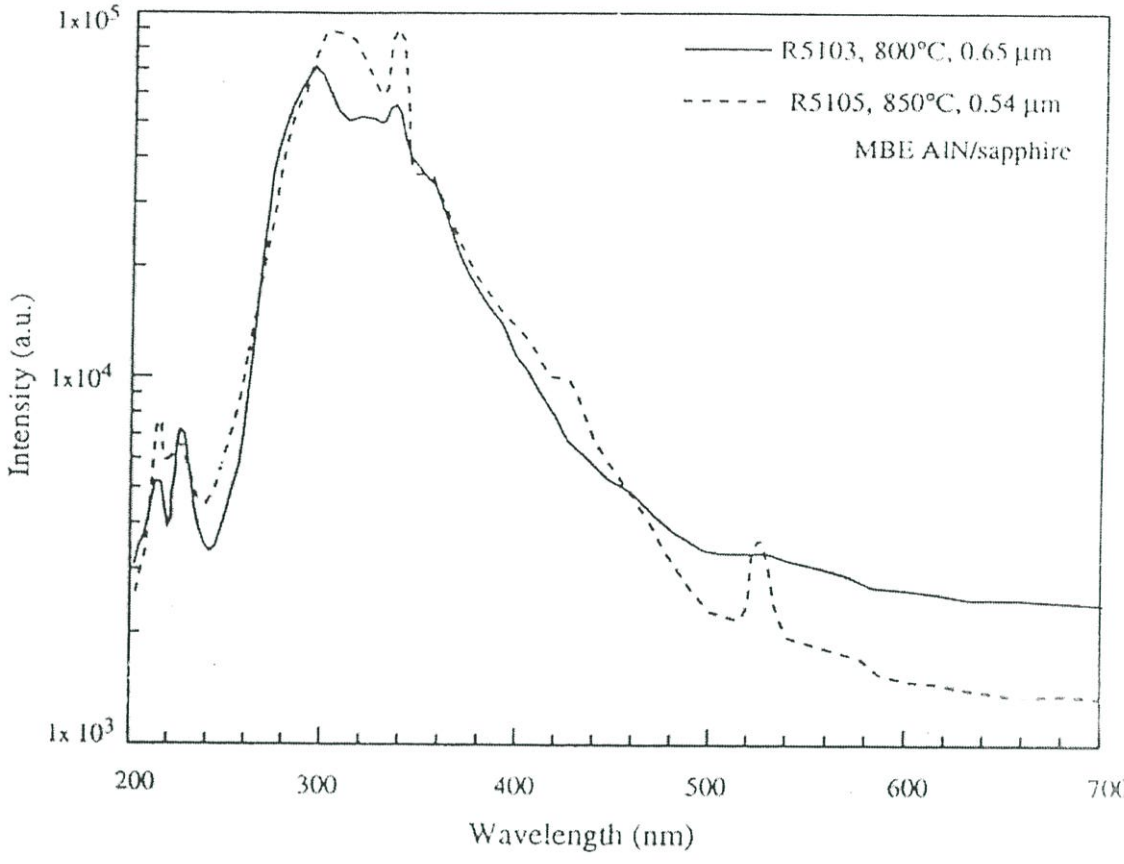
อะตอม Cl อยู่ที่ $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2};\ 00\frac{1}{2};\ 0\frac{1}{2}0;\ \frac{1}{2}00;$



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบร็อคซอลท์

2.1.2 สมบัติทางแสงของอลูมินัมไนไตรด์

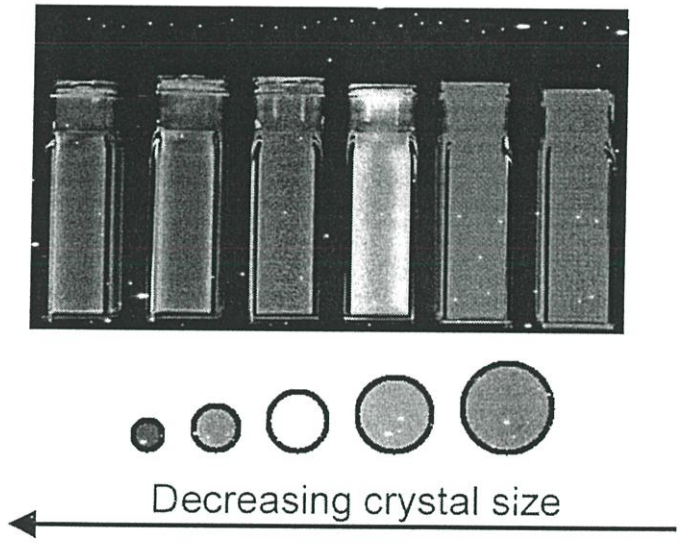
มีรายการการวิเคราะห์ฟิล์มบาง อลูมินัมไนไตรด์โครงสร้างแบบเวอทไซท์ ที่มีคุณภาพสูง โดยดูสมบัติการดูดกลืนแสงและมีค่า แถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 6.2 eV และนักวิจัยคนอื่นๆ ก็ได้รายงานค่าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่ง Slack และ McNelly ได้กล่าวว่าเป็นสมบัติจากความไม่บริสุทธิ์เนื่องจากออกซิเจน จากการทดลองทำการดูดกลืนแสงที่ขึ้นกับอุณหภูมิ วัดแถบพลังงานต้องห้าม ได้ค่าเท่ากับ 6.28 eV ที่ 5 K เปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิห้องซึ่งได้ค่า 6.2 eV $\pm$ 0.1 eV Karel และผู้ร่วมงานก็ได้เพียงแต่ศึกษาสมบัติการลูมิเนสเซนส์ของฟิล์ม อลูมินัมไนไตรด์ ที่ไม่บริสุทธิ์จากการผสม Mg และธาตุ rare earth อื่นๆ เท่านั้น มีรายงานจากนักวิจัยหลายกลุ่มว่าค่าดัชนีหักเหแสงของ อลูมินัมไนไตรด์ อยู่ระหว่าง 1.99-2.25 มีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสำหรับความยาวคลื่นยาวได้ค่าจาก ε_0=8.3-11.5 แต่ส่วนใหญ่ก็ได้ค่าอยู่ภายใน ε_0=8.5$\pm$0.2 มีเพียงสองกลุ่มที่รายงานเกี่ยวกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูงได้เท่ากับ ε=4.68 และ ε=4.84 โครงสร้างโฟนอน ของ อลูมินัมไนไตรด์ ได้ถูกนำเสนอ โดยพบโหมด LO และ TO ปรากฏที่ 905 $\pm$ 12 cm^{-1} และ 667 cm^{-1} ตามลำดับ และยังพบโหมด E_2 ที่ 665 cm^{-1} มีการรายงานการศึกษาถึง Synchroton radiation ของผลึกเดี่ยวของ อลูมินัมไนไตรด์ ที่ 40 eV และเมื่อไม่นานมานี้ Morkoc และทีมวิจัยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ จากฟิล์มบาง AlN ปลูกด้วยวิธี MBE ที่อุณหภูมิ 800°C และ 850°C โดยใช้ excimer-laser เป็นตัวกระตุ้น พบยอดสเปกตรัมการลูมิเนสเซนส์ที่ 320 นาโนเมตร (nm) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ [1]

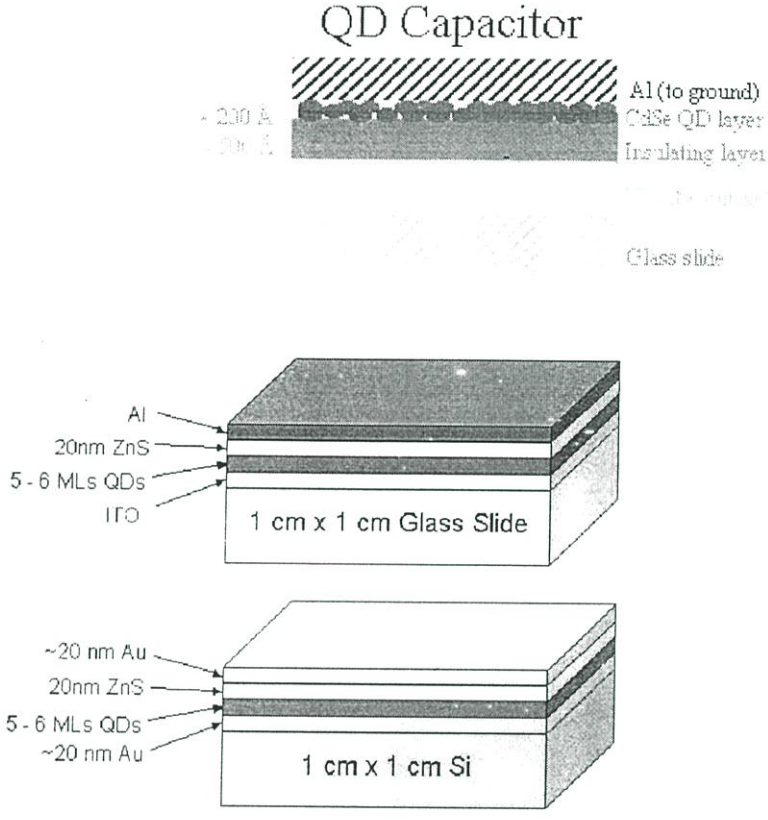
2.2 ผลึกระดับนาโนเมตร (Nanocrystal)

เม็ดผลึกระดับนาโนเมตรหรือควอนตัมด็อท (Nanocrystal quantum dots: NCs) ของสารกึ่งตัวนำหมายถึง ส่วนที่มีขนาดเล็ก ๆ ระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) ของก้อนสสาร (Bluk material) สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าที่ปรากฏออกมาเป็นผลอย่างมากจากฟังก์ชันของขนาดของส่วนเล็ก ๆ นี้ตัวอย่างเช่น ผลกระทบเนื่องจากขนาดของควอนตัมด็อท (Quantum Dots : QDs) ของสารแคดเมียมซิลิไนด์ (CdSe) สามารถสังเกตได้ง่ายจากการเปล่งแสงลูมิเนสเซนส์ (Luminescence) ที่ขึ้นกับฟังก์ชันของขนาด [2] จะเห็นว่าขนาดของเม็ดผลึกในระดับนาโนเมตรที่ต่างกันให้การเปล่งแสงต่างกันซึ่งทำให้เกิดความคิดในการนำไปประยุกต์สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงในระดับนาโนเมตรขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงการลูมิเนสเซนส์ของแสงจากย่านสีน้ำเงินจนถึงสีแดงจาก ควอนตัมดอทของ CdSe ที่เป็นฟังก์ชันของขนาดของเม็ดผลึกที่เพิ่มขึ้น (1.5 - 8 นาโนเมตร)

เม็ดผลึกระดับนาโนเมตรหรือควอนตัมด็อทมีสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวหลายประการ ซึ่งอาจเป็นโอกาสมากมายในนวตกรรม วิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงโครงสร้างแบบหลายรอยต่อในระดับนาโนเมตร (Heterostructure) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 เป็นสิ่งประดิษฐ์โครงสร้างหลายรอยต่อในระดับนาโนเมตรของสารแคดเมียมซิลิไนด์ ซึ่งสามารถหาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงได้



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของอุปกรณ์ที่นำผลึกในระดับนาโนมาประยุกต์ใช้งาน

จะเห็นว่าการสร้างหรือปลูกผลึกในระดับนาโนเมตร การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า การศึกษาสมบัติทางแสง การประยุกต์ทำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง เป็นเรื่องที่กำลังศึกษาอันอยู่อย่างมากมายในขณะนี้ เนื่องจากขนาดของผลึกที่กล่าวถึงอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังนั้นผลกระทบที่จะมีต่อสมบัติของสารกึ่งตัวนำจึงเป็นผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม (Quantum confinement effect)

2.2.1 **แบบจำลองมวลประสิทธิผล** (The Effective Mass Model)

แบบจำลองมวลประสิทธิผลสร้างขึ้นเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในสนามพลังงานศักย์ของผลึก เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก (E) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง [3] ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\hbar^2}\left(\frac{d^2E}{dk^2}\right)qE \tag{2.1}$$

ความเร่งของอิเล็กตรอนมวล m ในกรณีอยู่ในอวกาศอิสระ (Free space) ที่ไม่มีสนามพลังงานศักย์ใด ๆ

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{m}qE \tag{2.2}$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.1) กับ (2.2) ได้ข้อสรุปว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในสนามพลังงานศักย์แบบเป็นคาบในผลึก จะมีพฤติกรรมที่แสดงให้เห็นว่ามวลของอิเล็กตรอนมีค่าเป็น

$$m^* = \hbar^2 \Big/ \left(\frac{d^2E}{dk^2}\right) \tag{2.3}$$

นิยาม m^* คือ มวลประสิทธิผล (Effective mass) ซึ่งสามารถทำการทดลองวัดได้จากปรากฏการณ์ Cyclotron resonance

จากนั้นใช้แบบจำลองของมวลประสิทธิผล เพื่อประมาณค่าโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยเริ่มจากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิเล็กตรอนอิสระกับ เวกเตอร์คลื่น

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \tag{2.4}$$

ในสมการที่ (2.4) m เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดความโค้งของแถบพลังงาน

สมมุติให้สารกึ่งตัวนำมีแถบพลังงานแบบตรง ซึ่งแถบพลังงานต้องห้าม อยู่ที่ k=0 เขียนสมการได้ดังนี้

$$E \approx E_0 + \frac{1}{2}\sum_{i,j} \frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}\Big|_{k=0} k_i k_j \tag{2.5}$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.5) ด้วยมวลประสิทธิผลจากสมการที่ (2.3) เราสามารถหาพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่เหนือขอบต่ำสุดของชั้นแถบความนำ ที่ k ใด ๆ ได้ดังนี้

$$E_e(k) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \tag{2.6}$$

E_C คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของชั้นแถบความนำ

m_e คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน

เช่นเดียวกันสามารถหาพลังงานของโฮลที่อยู่ต่ำกว่าขอบสูงสุดของชั้นแถบวาเลนซ์ ที่ k ใด ๆ ได้ดังนี้

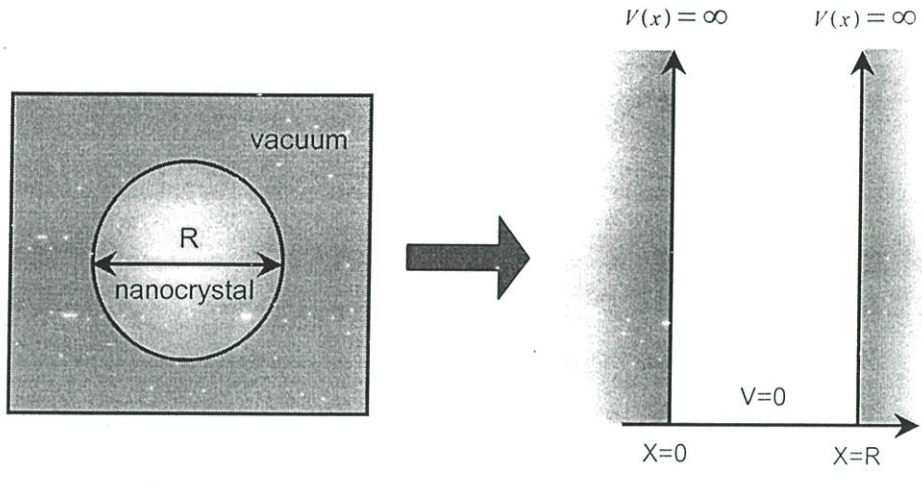
$$E_h(k) = E_c - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} \tag{2.7}$$

E_V คือ ระดับพลังงานสูงสุดของชั้นแถบวาเลนซ์

m_h คือ มวลประสิทธิผลของโฮล

2.2.2 ผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม (Quantum confinement effects)

ฟิล์มบางที่มีเม็ดผลึกขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร จะเกิดผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม คือเมื่อพิจารณาที่พื้นผิวด้านบนของฟิล์มบางเม็ดผลึกระดับนาโนเมตรจะประพฤติตัวเหมือนบ่อศักย์ความสูงอนันต์ เนื่องจากรอบ ๆ เม็ดผลึกเป็นสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจำลองด้านพื้นผิวของฟิล์มบางที่มีเม็ดผลึกระดับนาโนเมตร เปรียบเทียบเป็นโครงสร้างบ่อควอนตัมที่มีศักย์สูงอนันต์

ในกรณีของบ่อควอนตัมกว้าง R มีความสูงอนันต์จะได้ว่า

$$k = \frac{n\pi}{R} \qquad \text{เมื่อ } n = 1,2,3$$

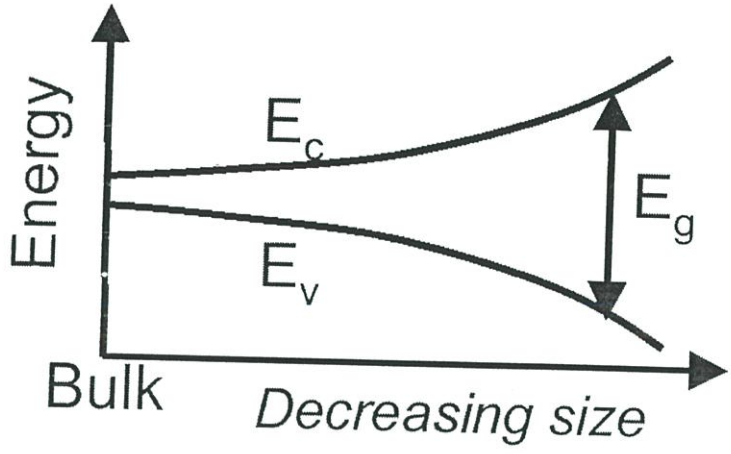
พิจารณาที่ n = 1 จะได้ว่า

$$k^2 = \frac{\pi^2}{R^2} \qquad (2.8)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.6) - (2.7) แล้วแทนค่า k^2 จากสมการที่ (2.8) จะได้

$$E_{g,cluster} = E_e(k) - E_h(k) = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2\pi^2}{2R^2\mu} \qquad (2.9)$$

เมื่อ $\mu = \left(\frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_h} \right)$



รูปที่ 2.8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของขนาดเม็ดผลึกระดับนาโนเมตร กับค่าแถบพลังงานต้องห้าม

จากการนำความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.9) เขียนกราฟดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดของเม็ดผลึกเล็กลงเข้าสู่ระดับนาโนเมตร ค่าแถบพลังงานต้องห้ามมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อลดขนาดของเม็ดผลึกลดลงจนถึงค่า ๆ หนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) จากโครงสร้างผลึก (Crystal) เป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งไม่สามารถหาค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามได้

2.3 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบสปัตเตอริง

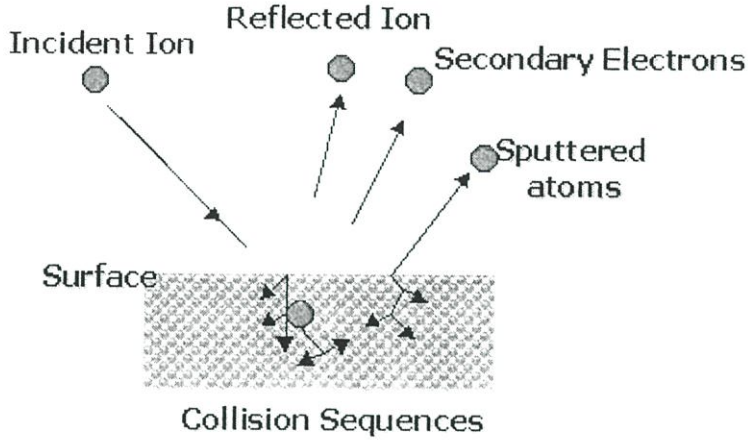
การสปัตเตอริง [4] คือ ขบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ การสปัตเตอริงมีขบวนการที่สำคัญดังนี้

-อาศัยการดิสชาร์ตไฟฟ้าของกาซอาร์กอน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน

-จากนั้นทำการเร่งไอออน ให้วิ่งเข้าชนแผ่นสารเคลือบ (Target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง

-สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของกาซ จะหลุดออกจากเป้าสารเคลือบ และวิ่งด้วยความเร็วสูงมายังแผ่นรองรับในทุกทิศทุกทาง พบว่าพลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมานั้นสูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกมาด้วยวิธีการระเหยมาก ดังนั้นเมื่ออนุภาคสารเคลือบที่ได้จากการสปัตเตอริง ตกกระทบฐานรองรับจะเกิดการฝังตัวลงในเนื้อฐานรองรับ

2.3.1 **อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ**



รูปที่ 2.9 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

- ไอออนสะท้อนกลับจากผิวหน้า ส่วนใหญ่เป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากการรวมตัวกันกับอิเล็กตรอน บริเวณผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ

- การชนของไอออนทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป้าสารเคลือบ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ

- ไอออนฝังตัวลงในผิวสารเคลือบ (Ion implantation) มีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 KeV สำหรับไอออนของกาซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง

- การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า altered surface layers

2.3.2 **ค่ายีลด์ของสปัตเตอริง** (Sputtering yield: S)

ค่ายีลด์ของสปัตเตอริงคือ ค่าเฉลี่ย ปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบ ต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค (มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน) ค่ายีลด์แปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่าง ๆ ในขบวนการสปัตเตอริง ดังนี้

2.3.2.1) ค่ายีลด์แปรเปลี่ยนไปตาม ค่าพลังงานของไอออน คือไอออนต้องมีพลังงานมากกว่า พลังงานเทรชโชลด์ (Threshold energies หมายถึง พลังงานที่เริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบในสภาวะที่มีการชนอย่างต่อเนื่องของไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคู่การชนของอนุภาค เมื่อทำการเพิ่มพลังงานของไอออนค่ายีลด์จะเพิ่มขึ้นแบบ เอกซ์โปเนนเชียล ในช่วงแรก ๆ และจะเปลี่ยนเป็นเชิงเส้น จากนั้นจะอิ่มตัวเมื่อพลังงานของไอออนมาก เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้ค่ายีลด์ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงมากขึ้น

2.3.2.2) ค่ายีลด์แปรเปลี่ยนไปตาม ระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ พบว่าค่ายีลด์สูงเมื่อไอออนชนเป้าในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่น ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป้าสารเคลือบ

2.3.2.3) ขึ้นอยู่กับมวลของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ คือจากที่เราทราบว่าอนุภาคสอง อนุภาคที่มีมวลเท่ากันจะสามารถถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีสุด แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลอะตอมเดี่ยว ๆ ดังนั้นเมื่อต้องการทำให้ค่ายีลด์สูงเราต้องใช้ไอออนที่มีมวล สูงกว่า มวลอะตอมของเป้า (จึงเลือกใช้ไอออนจากกาซเฉื่อย)

2.3.2.4) ค่ายีลด์แปรเปลี่ยนไปตาม มุมตกกระทบของไอออนที่ทำบนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ คือมุมตกกระทบยิ่งมากยิ่งมีค่ายีลด์สูงจนถึงมุมที่มากกว่า 45 องศาเล็กน้อย (เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ Back scattering เป็น Forward scattering) จากนั้นเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบค่ายีลด์จะลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อมุมตกกระทบมีค่า 90 องศา

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3.3 **ขบวนการกาซดิสชาร์จ** (Gas discharge process)

ขบวนการกาซดิสชาร์จคือ การทำให้กาซแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้สนามไฟฟ้ามีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

2.3.3.1) เริ่มให้แรงดันค่าน้อย ๆ พบว่ากระแสไหลในวงจรน้อยมาก ซึ่งเป็นกระแสอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอน และ ไอออนของกาซที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศซึ่งเกิดจาก การชนของรังสีคอสมิค (อัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสี)

2.3.3.2) เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้แรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) พลังงานของประจุ ที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า จะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของกาซให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและ ไอออนลบ ซึ่งไอออนพวกนี้ก็จะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้วิ่งชนโมเลกุลของกาซต่อไปอีกจึงเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสอง (Secondary electron)

2.3.3.3) เพิ่มแรงดันจนถึงค่าแรงดันพังทลาย จะเกิดขบวนการการถล่ม (Avalanche) ขึ้น คือ ไอออนบวกวิ่งไปชนขั้วคาโทด ทำให้เกิดการปลดปล่อย อิเล็กตรอนลำดับสอง (ของสารเคลือบ) แล้วอิเล็กตรอน ก็ถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้ไปชนโมเลกุลของกาซเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้นจนทำให้มีไอออนมากพอสำหรับ ผลิตอิเล็กตรอน ได้เป็นจำนวนที่คงที่ (ช่วงนี้ระบบรักษาสภาพดิสชาร์จ ได้ด้วยตัวเองไม่ต้องพึ่งแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก) ขบวนการช่วงนี้เรียกว่า ทาวน์เซนต์ดิสชาร์จ (Townsend discharge) จากนั้นเมื่อกระแสดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่า ๆ หนึ่งจึงเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมขั้วมีค่าลดลง กระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงนี้ว่า การเรืองแสงปกติ (Normal glow) ค่ายีลด์จะต่ำ ในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ และการชนของไอออนบนคาโทดไม่มีความสม่ำเสมอ โดยมักจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (Self-sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แนวการชนของไอออนจะค่อย ๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่ (ช่วงการเรืองแสงปกติที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงนี้เรานำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างหลอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ Voltage regulator tube)

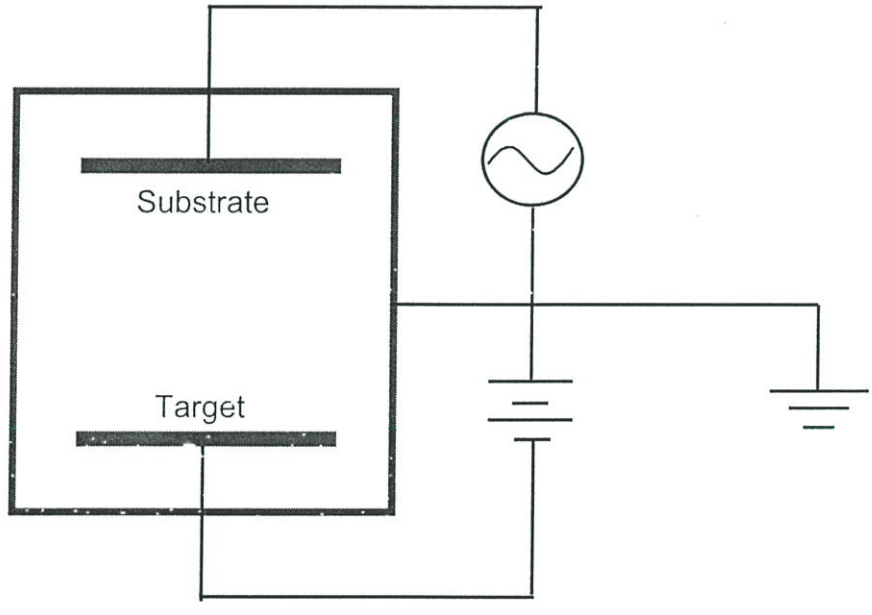
2.3.3.4) หลังจากที่การชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น การเรืองแสงจะจ้าขึ้นผิดปกติ เรียกช่วงนี้ว่า การเรืองแสงผิดปกติเปล่งแสงจ้าขึ้น (Abnormal glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้ในระบบสปัตเตอริงช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 แอมแปร์/ตารางเซ็นติเมตร ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบน

49612

ผิวคาโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบ เทอร์มิออนิค (Thermionic electron emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองและขบวนการอะวาลานช์ ทำให้ความนำไฟฟ้าของกาซในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดตกลงมาก ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและเปล่งแสงประกายจ้าของการอาร์ค (Arc discharge)

2.3.4 ระบบปลูกฟิล์มบางอาร์ เอฟ สปัตเตอริง (RF-Sputtering)

หลักการ คือ ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าสลับความถี่ 13.56 MHz เพื่อกระตุ้นให้กาซภายในระบบแตกตัวเป็นไอออนมากขึ้น ทำให้สามารถปลูกฟิล์มบางที่ความดันต่ำกว่าระบบปลูกฟิล์มบางแบบ ดี ซี สปัตเตอริง และยังสามารถเคลือบสารไดอิเล็กตริค (Dielectric) ได้ เนื่องจากถ้าเป็น ดี ซี สปัตเตอริง จะเกิดการสะสมประจุบวกที่เป้าจนที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับอาโนดจะทำให้ขบวนการสปัตเตอริงสิ้นสุด แต่ อาร์ เอฟ สปัตเตอริงอีกครึ่งไซเคิลต่อมาจะมีการพาอิเล็กตรอนเข้าสู่ผิวไดอิเล็กตริกทำให้ผิวหน้าเป็นกลางเหมือนเดิม



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะแผนภาพในระบบ อาร์ เอฟ สปัตเตอริง

2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) [5] ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1

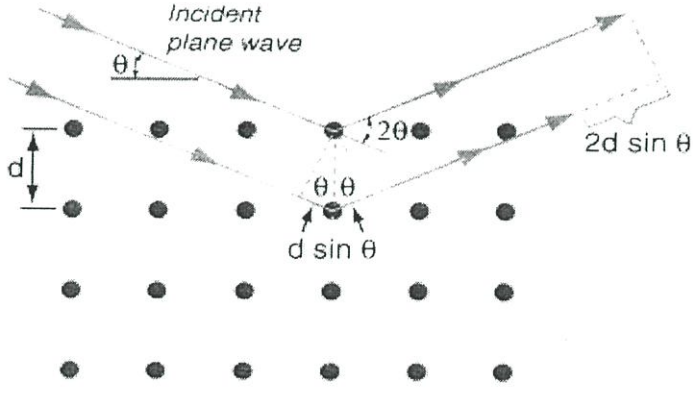
$$N\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \qquad (2.10)$$

เมื่อ N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

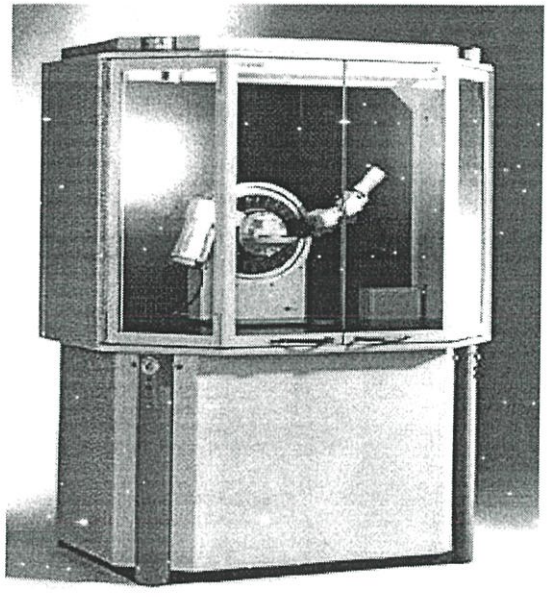
d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

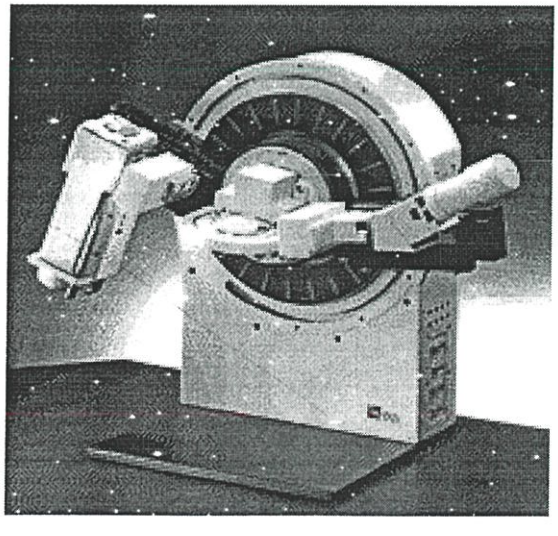


รูปที่ 2.11 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.11 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X–Ray diffractometer ดังแสดงดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.12 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer



รูปที่ 2.13 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ใน รูปแบบการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant) จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์แอมปลิจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่นคือ F เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ k เวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนคือ k' ดังนั้น

$$F = \int_{\bar{r}} n_G e^{[i(\bar{G}+\bar{k}-\bar{k}').\bar{r}]} \tag{2.11}$$

เมื่อ n_G คือ แอมปลิจูดของการเลี้ยวเบน

G คือ แลตทิซส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

สามารถหาค่าแลตทิซส่วนกลับได้จากสมการ

$$\bar{G} = \bar{k}' - \bar{k} \tag{2.12}$$

เมื่อ

$$\left|\bar{k}'\right| = \left|\bar{k}\right| = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.13}$$

จะได้

$$|G|^2 = \bar{G}.\bar{G} = (\bar{k}' - \bar{k}).(\bar{k}' - k') \tag{2.14}$$

$$|G|^2 = 2|k|^2 - 2\bar{k}'.\bar{k} \tag{2.15}$$

$$|G|^2 = 4\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \cos 2\theta) \tag{2.16}$$

เมื่อ 2θ คือมุมระหว่าง $\bar{k}$ และ $\bar{k}'$ แก้สมการหาค่า λ จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|\bar{G}|}\sin\theta \tag{2.17}$$

และจากสมการการหาค่าของ $|G|^2$

$$|G|^2 = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 (h^2 + k^2 + l^2) \tag{2.18}$$

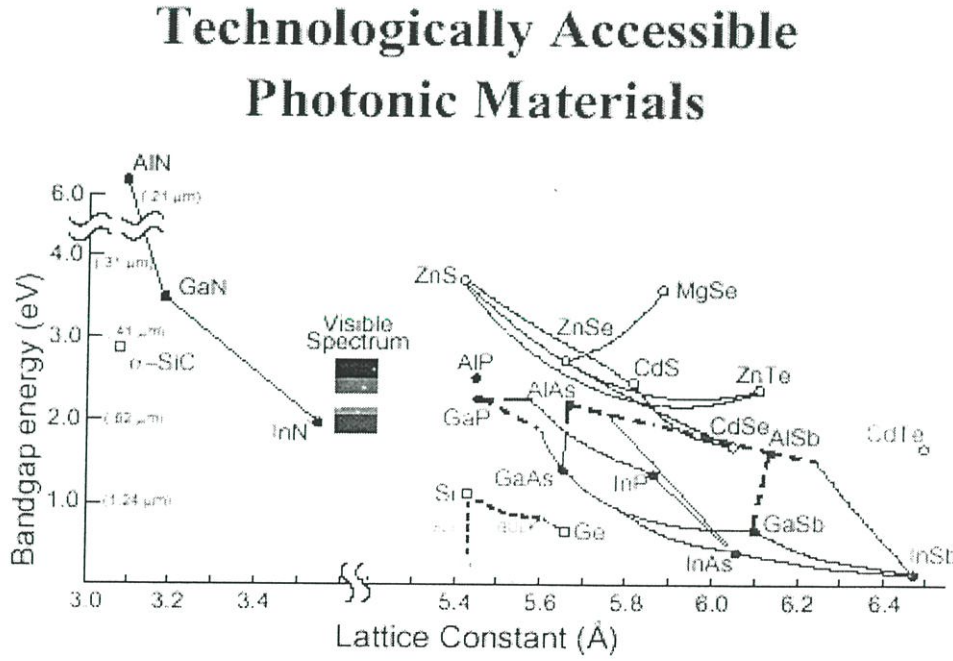
จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซเป็น

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \tag{2.19}$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน



รูปที่ 2.14 แสดงค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

ขนาดของเม็ดผลึก (Grain size) จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda_X}{\beta_{2\theta}\cos\theta} \tag{2.20}$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเม็ดผลึก

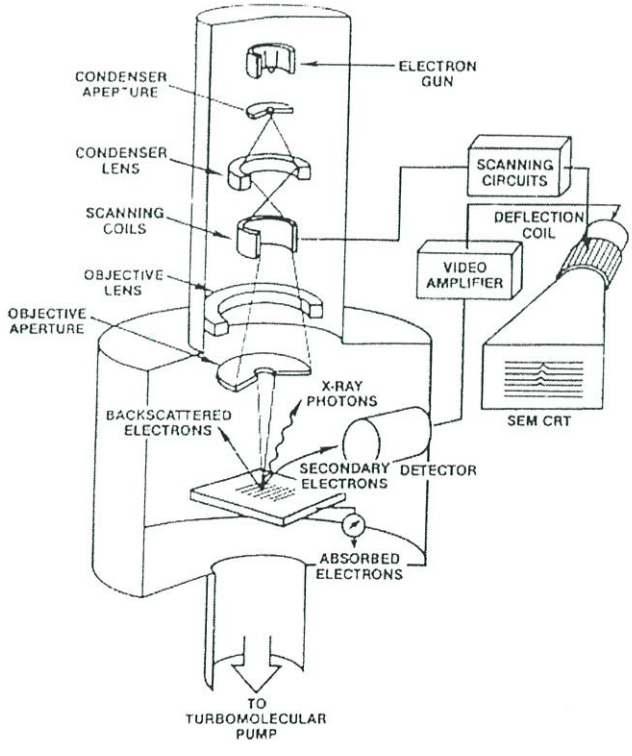
K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก $(0.89 \leq K \leq 0.94)$

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

$\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-maximum of the diffraction peak : FWHM)

λ_X คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.4.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด



รูปที่ 2.15 แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron: SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x – y สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron: PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่าง หลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอน

ทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก CaF_2 และฉาบผิวด้วยอลูมินัมบางทำหน้าที่เป็น collector ป้อนแรงดันไบแอสที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตามท่อนำแสง เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

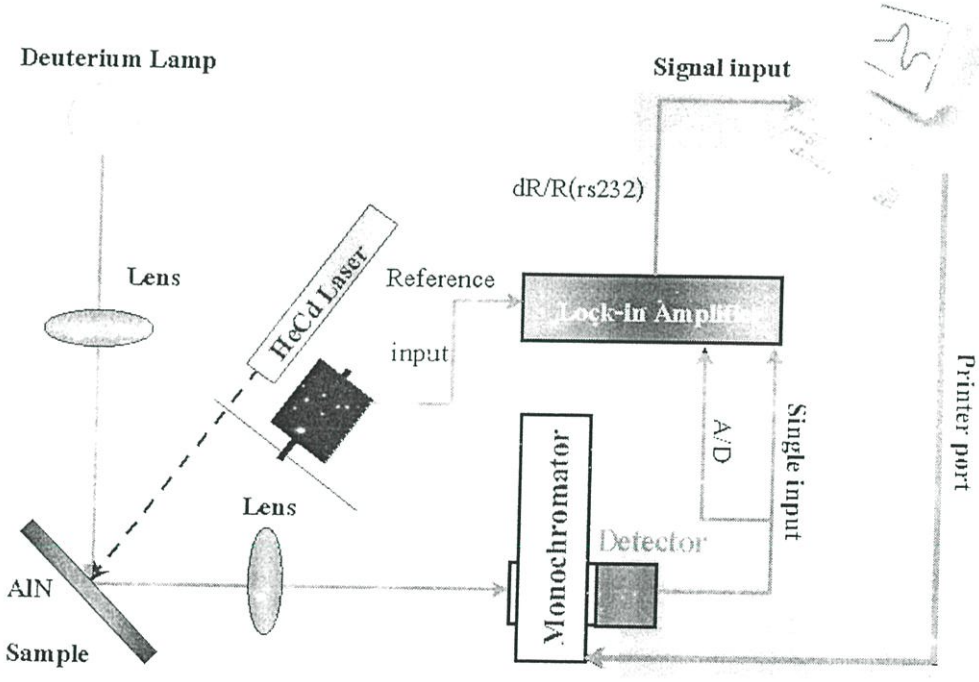
กำลังขยาย = พื้นที่บน CRT / พื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด

2.4.3 หลักการของโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโตรสโกปี

มอดูเลชันสเปกโตรสโกปีเป็นเทคนิคในการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเทคนิคของการมอดูเลทนั้นแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ (1) การมอดูเลทภายนอก (External modulation) (2) การมอดูเลทภายใน (Internal modulation) โดยที่การมอดูเลทภายนอกนั้นจะเป็นการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่น่าสนใจเข้าไปในสารตัวอย่าง (Sample) แล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากพารามิเตอร์นั้น ส่วนการมอดูเลทภายในเป็นเงื่อนไขที่เกิดขึ้นภายในสารตัวอย่างเอง

ค่าการตอบสนองทางสเปกตรัมของสารสามารถหาได้จากการป้อนสิ่งรบกวนเข้าไปในสาร (Perturbation) ตัวอย่างเช่น สนามไฟฟ้า (Electric field: EM), ความร้อน (Thermo modulation) ขั้นตอนเหล่านี้เป็นหลักการของการมอดูเลทภายนอก วิธีการคือการมอดูเลทพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าไป ตัวอย่างเช่น การมอดูเลททางเฟส, มอดูเลททางความถี่, มอดูเลททางแอมปลิจูด เป็นต้น



รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบของการมอดูเลทภายนอก

ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เป็นรูปของการทดลองการมอดูเลทที่เรียกว่า "แบบภายนอก" ในรูปเป็นการทดลองรีเฟลกแทนซ์ (Reflectance) โดยสามารถปรับเปลี่ยนเป็นโฟโตรีเฟลกแทนซ์หรืออิเล็กโตรรีเฟลกแทนซ์ (Electroreflectance) แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (ซีนอน, ฮาโลเจน, ทังสเตน) ผ่านมายังโมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) ที่ความยาวคลื่น λ จะให้ค่าความเข้มแสงเป็น I_0 (λ) และโฟกัสไปที่สารตัวอย่างโดยผ่านเลนส์เพื่อให้ได้ความเข้มแสงมากที่สุด ในส่วน

ของการมอดูเลท (เช่น สนามไฟฟ้า,อุณหภูมิ) ถูกป้อนเข้าไปยังสารตัวอย่างที่ความถี่ Ω_m และสะท้อนจากสารตัวอย่างผ่านเลนส์ และโฟกัสไปยังตัวตรวจวัดสัญญาณ เช่น โฟโตมัลติพลายเออร์, โฟโตไดโอด

สัญญาณจากตัวตรวจจับสัญญาณนั้น มีด้วยกัน 2 สัญญาณ คือค่าของ d.c. ที่ได้จาก $I_0(\lambda)R(\lambda)$ เมื่อ $R(\lambda)$ เป็นค่าของการสะท้อนของสัญญาณ d.c. จากสารตัวอย่าง ส่วนค่าที่ได้จากการมอดูเลท (ที่ความถี่ Ω_m) คือ $I_0(\lambda)\,\Delta R(\lambda)$ เมื่อ $\Delta R(\lambda)$ คือค่าของการสะท้อนจากการเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดการมอดูเลท สัญญาณ a.c. ที่ได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณจะเป็น $I_0\,\Delta R$ ซึ่งถูกวัดโดยเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock-in amplifier)

การรบกวน (Perturbation) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ΔR ในการเกิดรีเฟลกแทนซ์ R ของสารตัวอย่าง ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงในความเข้มของการสะท้อน อยู่ในรูปของสัญญาณ $\Delta R/R$

ปริมาณการตอบสนองของค่าไดอิเล็กตริกของสารคือ ไดอิเล็กตริกฟังก์ชัน (Dielectric function) $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon 2$ โดยที่ปริมาณของ ε เป็นปริมาณทางสเกลาร์ และการรบกวนจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง $\Delta\varepsilon$ ในเทอมของ ε

จากกฎของเฟรสแนลรีเฟลกแทนซ์ (Fresnel reflectance) และ ที่ตกกระทบพื้นผิวคือ

$$R = \left|\frac{n - n_a}{n + n_a}\right|^2$$

$$n^2 = \varepsilon, n_a^2 = \varepsilon_a$$

เมื่อ n_a คือค่าจำนวนจริงของดัชนีหักเหบริเวณพื้นผิว และจะพบว่า

$$\frac{\Delta R}{R} = \mathrm{Re}\left[\frac{2n_a}{n(\varepsilon - \varepsilon_a)}\Delta\varepsilon\right]$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \mathrm{Re}\left[(\alpha - i\beta)\Delta\varepsilon\right]$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha\Delta\varepsilon_1 + \beta\Delta\varepsilon_2 \qquad (2.21)$$

เมื่อ $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_1 + i\Delta\varepsilon_2$ คือการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสิ่งรบกวนใน ε และ α, β คือสัมประสิทธิ์ของเซราฟิน (Seraphin coefficients) มีความสัมพันธ์กับการไม่ถูกรบกวนของ

ไดอิเล็กตริกฟังก์ชัน โดยที่บริเวณแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำค่าของ $\beta \approx 0$ ดังนั้นเทอมที่ต้องพิจารณาคือเทอมของ $\alpha \Delta \varepsilon_1$ ดังนั้น สมการที่ (3c) จะได้เป็น $\Delta R/R \approx \alpha \Delta \varepsilon_1$ อย่างไรก็ตาม ในโครงสร้างแบบหลายชั้น (Multilayer) $\Delta \varepsilon_1$ และ $\Delta \varepsilon_2$ มีความสำคัญด้วยกันทั้งคู่ เนื่องจากมีปรากฏการณ์อินเตอร์เฟียเรนท์ (Interference effect) ขึ้น

ในการมอดูเลทได้มีการแบ่งชนิดของการเกิดสนามไฟฟ้าไว้สามชนิด คือ Low-field, intermediate-field และ high-field โดยพิจารณาจากค่าพลังงานอิเล็กโตรออปติก (Elctro-optic energy) โดยมีค่าดังสมการ

$$(\hbar\Theta)^3 = q^2\hbar^2F^2 / 2\mu_{\|}$$

จากสมการ F คือ สนามไฟฟ้าและ μ คือรีดิวซ์อินเตอร์แบนด์แมส (Reduce interband mass) ในทิศของสนามซึ่งในกรณีของ low-field $|\hbar\Theta| \leq \Gamma$ ในกรณีของ intermediate-field $|\hbar\Theta| \geq \Gamma$ แต่ $eFa_0 << E_g$ และในกรณี high-field $|\hbar\Theta| >> \Gamma$ แต่ $eFa_0 \approx E_g$ โดยที่ Γ คือ บรอดเดนนิงพารามิเตอร์ (Broadening parameter) และ a_0 คือค่าคงที่แลตติช

พิจารณาการเกิด Low field เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้า d.c. ภายใน Aspnes พบว่าพลังงาน $E(F)$ ในสนามไฟฟ้า F สามารถพิจารณาได้ตามสมการ

$$E(F) = q^2F^2t^2 / 2\mu_{\|}$$

เมื่อ t คือเวลา และถ้าพิจารณาตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Critical point) ซึ่งเป็นบริเวณของค่า พลังงานต้องห้าม (E_g) ค่าของไดอิเล็กตริกฟังก์ชันจะอยู่ในรูปของ

$$\varepsilon = \varepsilon(E - E_g, \Gamma) + B$$

เมื่อ E คือพลังงานโฟตอน และ B คือค่าคงที่

การเปลี่ยนแปลงไดอิเล็กตริกฟังก์ชัน ($\Delta\varepsilon$) ที่เกิดขึ้นโดยการมอดูเลทสนามไฟฟ้า F_{AC} คือ

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon[E - E_g + E(F_{AC}), \Gamma] - \varepsilon(E - E_g, \Gamma) \qquad (2.22)$$

ถ้าในกรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าน้อย ดังนั้น $E(F_{ac}) << \Gamma$ จากสมการที่ (2.22) สามารถแทนให้อยู่ในรูปของอนุกรมเทย์เลอร์ดังสมการ

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon &= E(F)[(\partial/\partial E)\varepsilon(E - E_g, \Gamma)] \\ &= (q^2 F_{ac}^2 t^2 / 2\mu_{\parallel})[(\partial/\partial E)\varepsilon(E - E_g, \Gamma)]\end{aligned} \quad (2.23)$$

ซึ่งในกลศาสตร์ควอนตัมนั้น ตัวดำเนินการของเวลาคือ

$$t = i\hbar(\partial/\partial E)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.2.3) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon &= (q^2\hbar^2 F_{AC}^2 / 2\mu_{\parallel})[(\partial^3/\partial E^3)\varepsilon(E - E_g, \Gamma)] \\ &= (\hbar\Theta)^3[(\partial^3/\partial E^3)\varepsilon(E - E_g, \Gamma)]\end{aligned}$$

ซึ่งในท้ายที่สุดสมการที่แม่นยำของ Aspnes อยู่ในรูปของสมการ

$$\Delta\varepsilon = [(\hbar\Theta)^3 12E^2][(\partial^3/\partial E^3)E^2\varepsilon(E - E_g, \Gamma)] \quad (2.24)$$

และจากสมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.24) สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\Delta R}{R} = (\hbar\Theta)^3 \, \mathrm{Re}[Ae^{i\varphi}(E - E_g + i\Gamma)^{-m}]$$

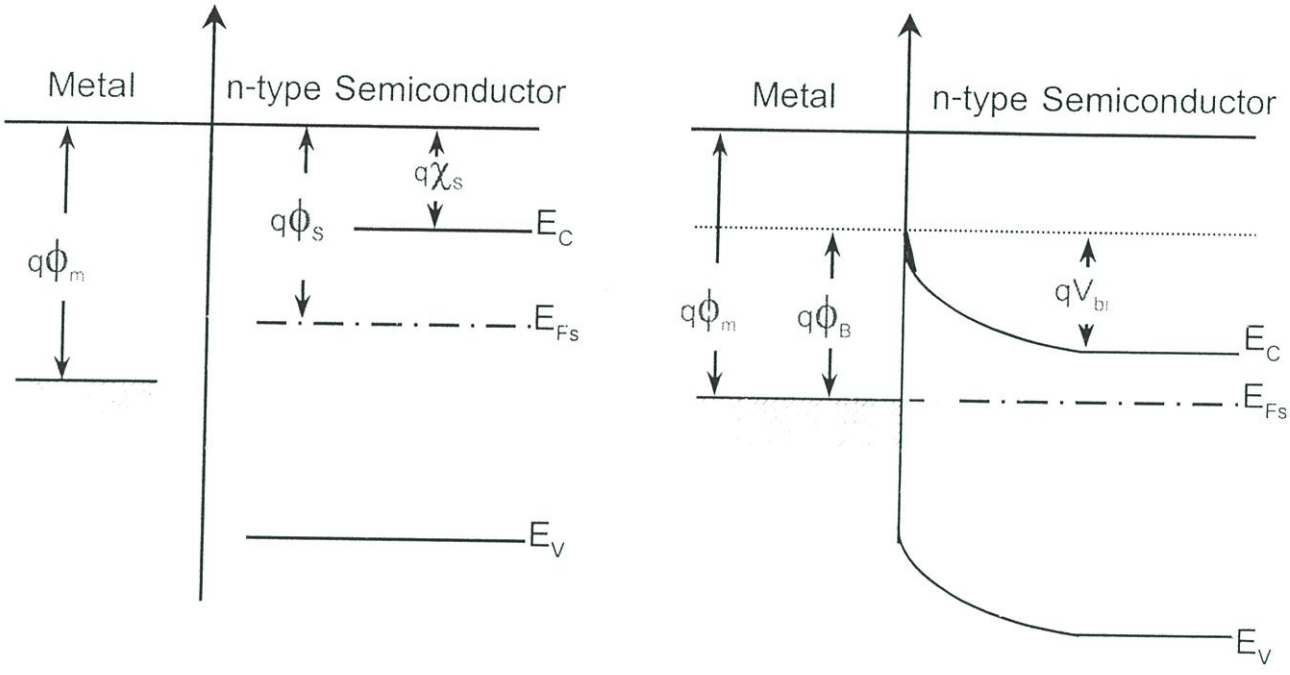
หรือจากสมการ

$$\frac{\Delta R}{R} = \mathrm{Re}[Ae^{i\varphi}(E - E_g + i\Gamma)^{-m}] \quad (2.25)$$

โดย $A, \varphi, E, E_g, \Gamma$ และ m คือแอมปลิจูด, เฟส, พลังงานโฟตอน, พลังงานต้องห้าม และ บรอดเดนนิงพารามิเตอร์ตามลำดับ

2.5 โครงสร้างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ

2.5.1 รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบชอตต์กี



(ก) แถบพลังงานก่อนสัมผัส (ข) แถบพลังงานหลังสัมผัส

รูปที่ 2.17 แสดงรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแบบชอตต์กี

เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าของฟังก์ชันงาน (Work function: ϕ) ของสารทั้งสองไม่เท่ากัน จึงเกิดการถ่ายเทประจุระหว่างสารทั้งสองจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลคือสารทั้งสองชนิดมีระดับเฟอร์มิเท่ากัน ทางด้านโลหะเกิดกำแพงศักย์กั้นอิเล็กตรอนไม่ให้สามารถไหลจากโลหะสู่สารกึ่งตัวนำได้ คือมีสมบัติให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียว (Rectify) เรียกกำแพงศักย์นี้ว่า กำแพงศักย์ชอตต์กี (Schottky barrier: ϕ_B) สามารหาค่าความสูงจากความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะ (Metal work function: ϕ_m) และ ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ (Electron affinity: χ_S)

$$q\phi_B = q\phi_m - q\chi_s \tag{2.26}$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อมาสะสมอยู่ทางด้านโลหะ และเกิดอิออนบวกสะสมอยู่ทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าภายในขึ้นที่บริเวณรอยต่อ

สนามไฟฟ้าดังกล่าวนี้จะมีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งในที่สุดสามารถยับยั้งการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in potential: V_{bi}) นี้สามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของโลหะและค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor work function: ϕ_S)

$$qV_{bi} = q\phi_m - q\phi_S \tag{2.27}$$

กระแสที่ไหลผ่านกำแพงศักย์แบบชอตต์กี ส่วนใหญ่จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะข้างมาก (Majority carriers) สารกึ่งตัวนำที่มีการเจือมากๆ และภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ การไหลของกระแสจะเกิดจากปรากฏการณ์เทอร์มิออนิกอิมิสชัน (Thermionic emission) ของพาหะข้างมากเคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์ตรงรอยต่อจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ

ที่สภาวะสมดุลจะมีค่ากระแสสุทธิ (Net current) เท่ากับศูนย์เนื่องจากการไหลของพาหะทั้งสองด้านมีค่าเท่ากัน (อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจะไหลไปทางด้านโลหะและมีประจุตรงข้ามไหลจากทางด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ) ซึ่งกระแสดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ ที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำจะมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ

$$\begin{aligned} n_S &= N_D \exp\left[\frac{-qV_{bi}}{kT}\right] = N_D \exp\left[\frac{-q(\phi_{Bn} - V_n)}{kT}\right] \\ &= N_C \exp\left[\frac{-q\phi_{Bn}}{kT}\right] \end{aligned} \tag{2.28}$$

เมื่อ N_C คือความหนาแน่นสถานะ (Density of state) ในแถบนำ ที่สภาวะสมดุลจะได้

$$\left|J_{M \to S}\right| = \left|J_{S \to M}\right| \alpha n_S \tag{2.29}$$

เมื่อ $J_{M \to S}$ คือความหนาแน่นของกระแสจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำและ $J_{S \to M}$ คือความหนาแน่นของกระแสจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ

เมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอสตรง (V_F) ค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อจะมีค่าลดลงและค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่รอยต่อจะเพิ่มขึ้นเป็น

$$n_S \approx N_D \exp\left[\frac{-q(V_{bi}-V_F)}{kT}\right] = N_C \exp\left[\frac{-q(\phi_{Bn}-V_F)}{kT}\right] \quad (2.30)$$

กระแสสุทธิภายใต้การป้อนแรงดันไบแอสตรงจะมีค่า

$$J = CN_C e^{\left(-q\phi_{Bn}/kT\right)}\left(e^{\left(qV/kT\right)}-1\right) \quad (2.31)$$

สำหรับในกรณีป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias: ($-V_R$)) ค่ากระแสสุทธิจะมีค่าเหมือนกับสมการที่ (2.31) แต่จะมีค่าแรงดันไบแอสเป็นลบ

สัมประสิทธิ์ CN_C จะมีค่าเท่ากับ $A^* T^2$ เมื่อ A^* เรียกว่า ค่าคงที่ประสิทธิผลริชาร์ดสัน (Effective Richardson constant) (มีหน่วยเป็น $A/K^2\text{-}cm^2$) และ T คืออุณหูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ค่า A^* จะขึ้นกับค่ามวลประสิทธิผลของสารกึ่งตัวนำ (A^* มีค่าเท่ากับ110 และ 32 สำหรับสารกึ่งตังนำซิลิกอนชนิดเอ็นและชนิดพีตามลำดับ) สมบัติของกระแส-แรงดันของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำภายใต้ขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชันจะมีค่า

$$J = J_S\left(e^{qV/kT}-1\right) \quad (2.32)$$

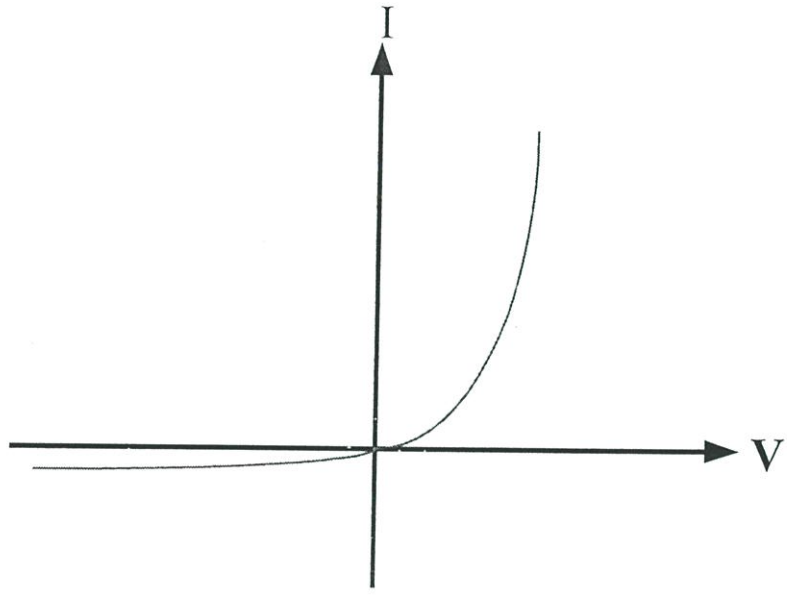
และ

$$J_S = A^* T^2 e^{\left(-q\phi_{Bn}/kT\right)} \quad (2.33)$$

เมื่อ J_S คือค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัว (Saturation current density) และแรงดันไบแอสมีค่าบวกสำหรับกรณีป้อนแรงดันไบแอสตรงและมีค่าลบสำหรับกรณีป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ

ในกรณีของกระแสเนื่องจากพาหะข้างมาก (อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ) และกระแสเนื่องจากพาหะข้างน้อย (โฮลเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ) การเคลื่อนที่ของโฮลจะเหมือนกับรอยต่อของ p-n ภายใต้เงื่อนไขของการป้อนแรงดันไบแอสทั่วไป ค่ากระแส

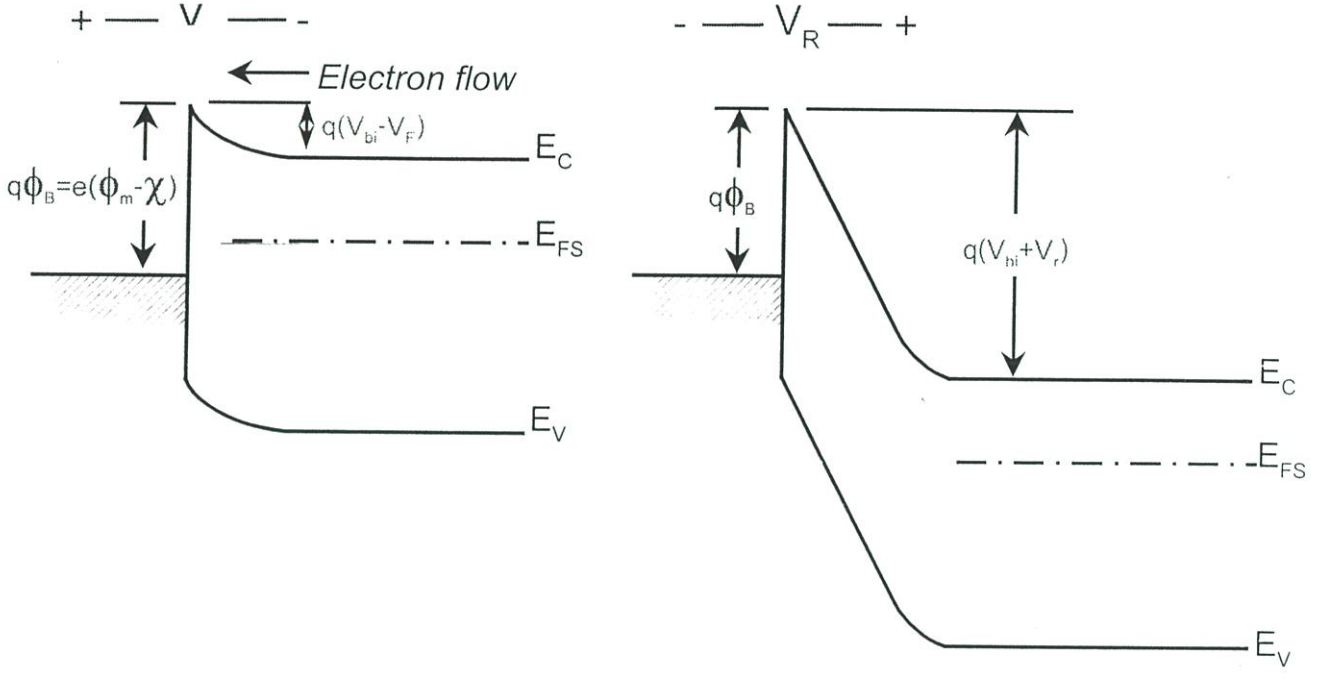
เนื่องจากพาหะข้างน้อยจะมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสเนื่องจากพาหะข้างมาก ซึ่งถือว่ารอยต่อแบบชอตต์กีเป็นรอยต่อแบบขั้วเดี่ยว (Unipolar junction)



รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

กรณีป้อนแรงดันไบแอสตรงแก่รอยต่อ คือ ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ กรณีนี้จะทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อมีขนาดลดลง และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็จะลดลงด้วย ดังนั้นจึงทำให้มีกระแสของอิเล็กตรอนเป็นจำนวนมากไหลจากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านโลหะ

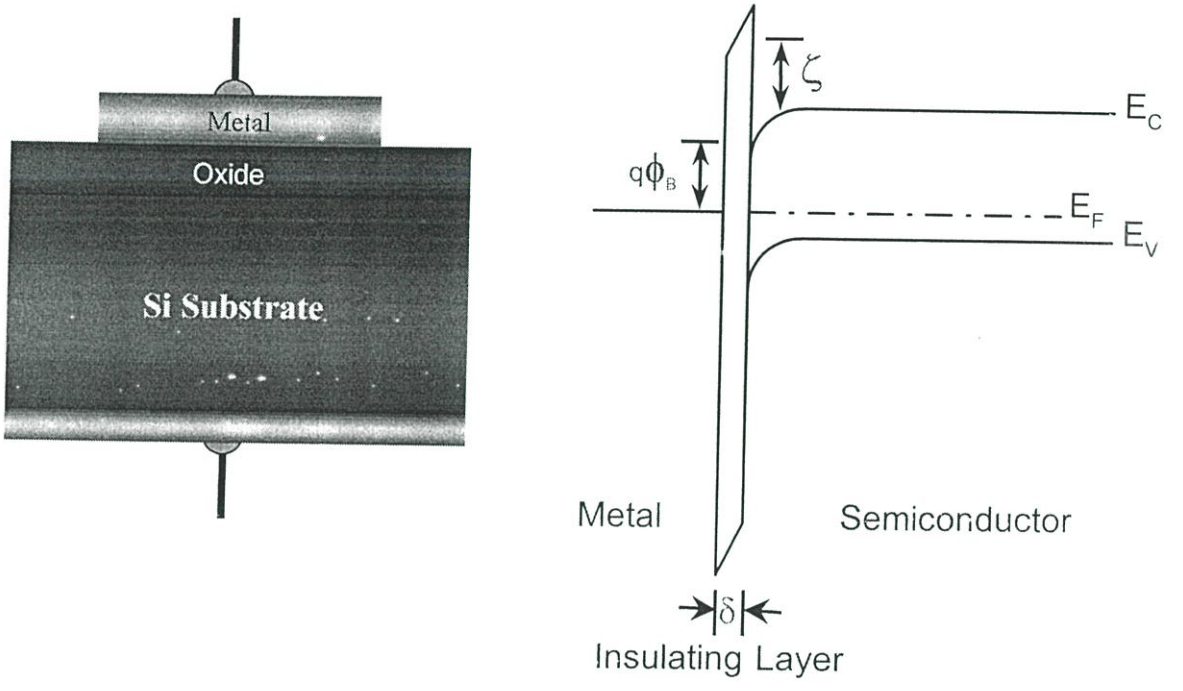
กรณีป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับแก่รอยต่อ คือ ทางด้านสารกึ่งตัวนำมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับทางด้านโลหะ จะทำให้ระดับพลังงานทุกระดับในสารกึ่งตัวนำ มีค่าลดลงจากภาวะเดิม ดังนั้นความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างกว่าเดิม ในภาวะนี้ กระแสอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำที่จะไหลไปยังโลหะ จะถูกขัดขวางไว้ด้วยกำแพงศักย์ที่มีขนาดความสูงมาก อย่างไรก็ดีจะมีกระแสของอิเล็กตรอนจากโลหะสามารถไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้ โดยที่ปริมาณของกระแสนี้ไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันไบแอสแต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่รอยต่อ ซึ่งเรียกว่า กระแสรั่วของรอยต่อ (Leak current)



(ก) ป้อนแรงดันไบแอสตรง (ข) ป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ

รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำเมื่อมีการป้อนแรงดันไบแอส

2.5.2 รอยต่อโครงสร้างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

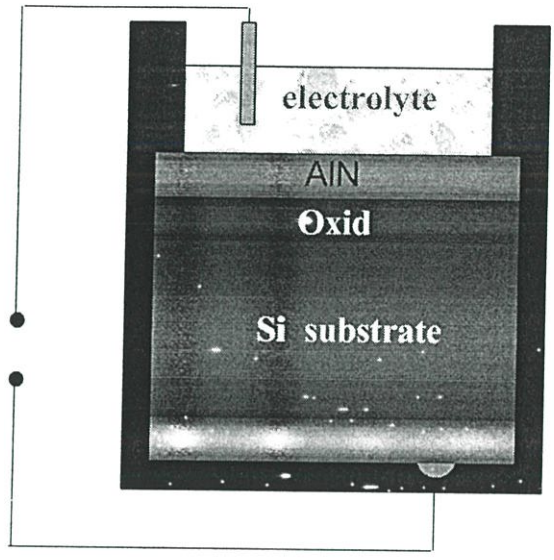


รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำเป็นอุปกรณ์ที่มีหลักการทำงานคล้ายกับอุปกรณ์รอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยมีสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันดังสมการที่ 2.34 ซึ่งเพิ่มพารามิเตอร์ของ ค่าเฉลี่ยความสูงของกำแพงศักย์ (The mean barrier height: ζ) และ ค่าความหนาของชั้นออกไซด์ (The oxide thickness in nm: δ)

$$J = A^{*} T^{2} \exp\left(-\sqrt{\zeta}\,\delta\right)\exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right)-1\right] \qquad (2.34)$$

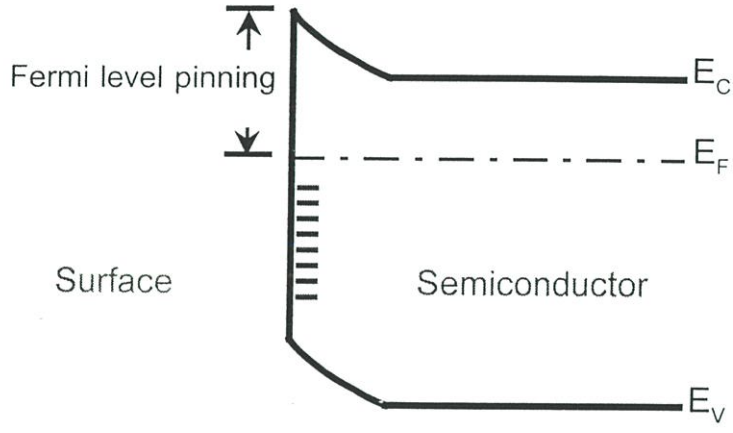
2.5.3 **รอยต่อโครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ**
(Electrolyte-Insulator-Semiconductor: EIS)



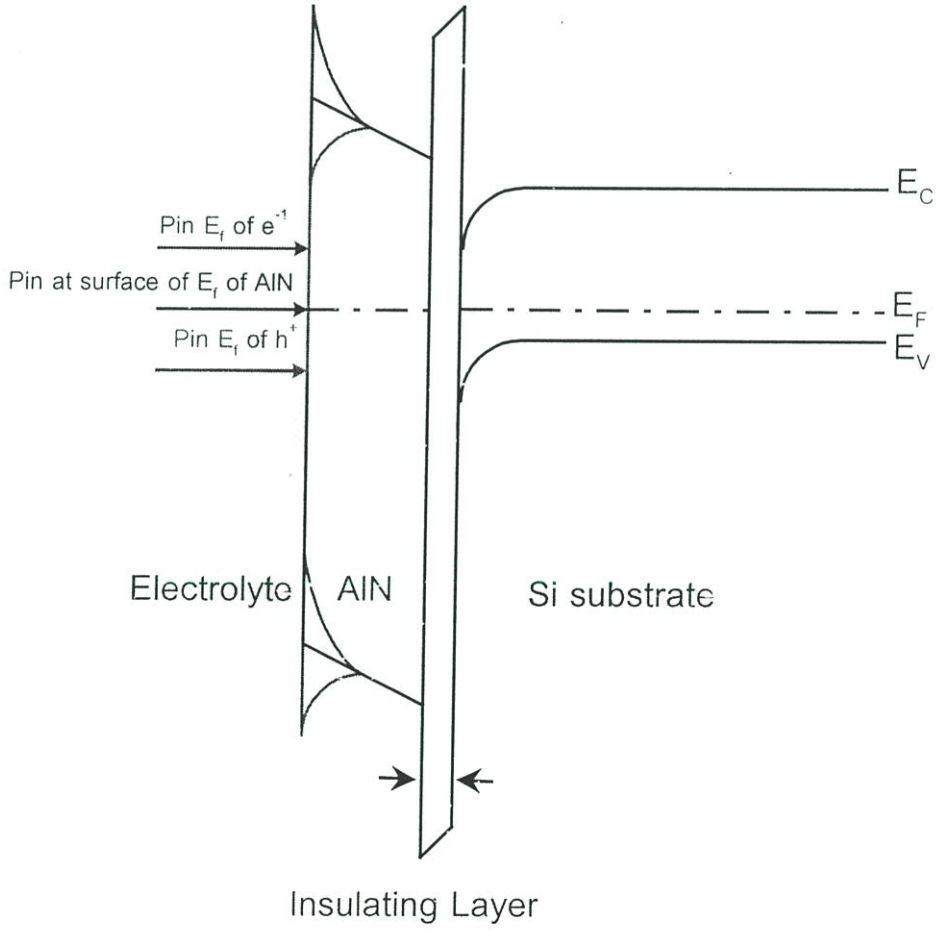
รูปที่ 2.21 แสดงรอยต่อโครงสร้างอิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

หลักการทำงานของรอยต่อโครงสร้าง EIS คือวัดค่าความต่างศักย์ที่ผิวสัมผัส (Surface voltage) ของอลูมินัมไนไตรด์เทียบกับขั้วอ้างอิง เมื่อเปลี่ยนสารอิเล็กโทรไลต์ศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของอลูมินัมไนไตรด์จะเปลี่ยนไปซึ่งศักย์ไฟฟ้าจะแตกต่างกันในแต่ละชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ ทำให้สามารถแยกแยะปริมาณไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ได้

การที่สนามไฟฟ้าที่พื้นผิวของอลูมินัมไนไตรด์เปลี่ยนไปตามปริมาณไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ที่มาสัมผัสพื้นผิวเกิดจาก ปรากฏการณ์การพินของระดับเฟอร์มิที่ผิวสัมผัส (The Fermi level pinned at the surface) [6] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในกรณีสารกึ่งตัวนำมี ความหนาแน่นของจุดบกพร่องที่พื้นผิวสัมผัสสูงมาก จะเกิดสถานะพลังงานที่ผิวสัมผัสซึ่งจะอยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มิทำหน้าที่จับอิเล็กตรอน ฉะนั้นจึงเกิดการสะสมของอิเล็กตรอน และเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่ผิวสัมผัส ทำให้ระดับเฟอร์มิที่ผิวสัมผัสเลื่อนตำแหน่งต่ำลงจากระดับเดิมเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การพินของระดับเฟอร์มิที่พื้นผิว แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการพินของระดับเฟอร์มิที่พื้นผิวสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนตำแหน่งของระดับเฟอร์มิที่พื้นผิวเมื่อสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ที่เป็น เบส-กลาง-กรด

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง
(RF Magnetron Sputtering System)



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง

ส่วนประกอบของระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริงแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

- ห้องสุญญากาศ
- ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ

3.1.1 ห้องสุญญากาศสูง

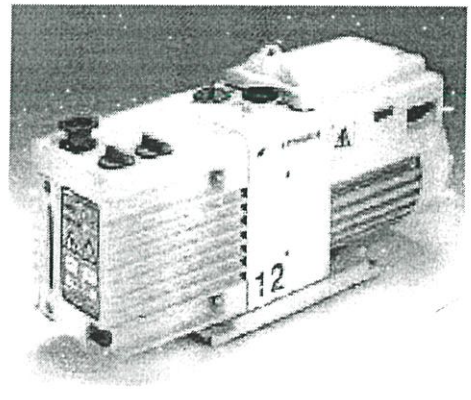


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะภายในห้องสุญญากาศ

ทำจากเหล็กกล้ากันสนิม (Stainless) ภายในห้องสุญญากาศทำความดันได้ต่ำกว่า 7×10^{-7} mbar เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกสะสมอยู่ภายในห้องสุญญากาศซึ่งทำให้ไม่สามารถทำความดันต่ำได้ ก่อนทำการปลูกฟิล์มควรหุ้มกระดาษฟอยล์ตามผนัง และอุปกรณ์ภายในให้เรียบร้อย

3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ

3.1.2.1 ปั๊มกลโรตารี (Mechanical rotary pump)



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะปั๊มกลโรตารี ของบริษัท EDWARDS รุ่น RV12

ปั๊มกลโรตารีใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึงความดันประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์ หลักการอย่างง่าย คือ กาซหรืออากาศใน

ภาชนะจุถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวของลูกสูบ ทำให้กาซในห้องสูบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอก กาซจะถูกขับออกมา ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

- ผิวของสเตเตอร์และโรเตอร์จะต้องสะอาด มันเรียบและที่ซิลด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย
- การซิลระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวซิลหล่อลื่น และระบายความร้อนไปในตัว
- กาซที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือไอของ ๆ เหลวนี้อาจละลายในน้ำมันที่ความดันสูง จึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับเข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพการปั๊มลดลง วิธีแก้ให้ใช้ กาซบัลลาสต์ (Gasballast)

3.1.2.2 **ปั๊มไอฟุ้งกระจาย** (Vapor diffusion pump)

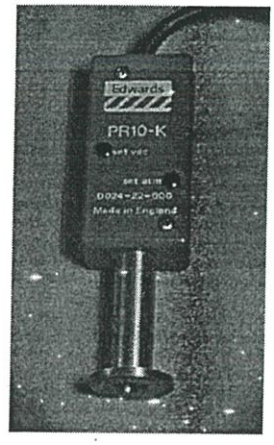


รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะปั๊มไอฟุ้งกระจายรุ่น E04K

สามารถทำความดันตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^{-10} มิลลิบาร์ จะเห็นว่าปั๊มไอฟุ้งกระจายไม่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความดันบรรยากาศ จึงต้องใช้งานร่วมกับปั๊มกลโรตารี ใช้หลักการการเคลื่อนย้ายกาซโดย การต้มน้ำมันให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า จนน้ำมันเดือดเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามช่องท่อกลวง ไอน้ำมันจะปะทะเข้ากับช่องเจ็ตที่บังคับทิศทางลงด้านล่างในมุมและระดับความสูงต่าง ๆ กันซึ่งมีการระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นตลอดเวลา ไอน้ำมันจะถูกฉีดออกมาจากท่อเจ็ตอย่างรุนแรงปะทะเข้ากับโมเลกุลของกาซที่บริเวณตอนบน ทำให้โมเลกุลของกาซภายในห้องสุญญากาศเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง โมเลกุลของกาซที่มาออยู่ด้านล่างจะทำให้

ความดันของกาซส่วนล่างมากกว่าส่วนบน แล้วใช้ปั๊มกลโรตารีดึงโมเลกุลของอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจายต่ออีกทีหนึ่ง

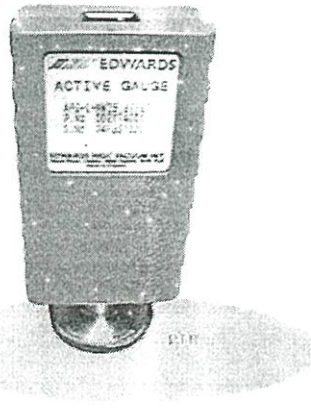
3.1.2.3 **เกจพิรานิ** (Pirani gauge)



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของเกจพิรานิของบริษัท EDWARDS รุ่น PRM10K

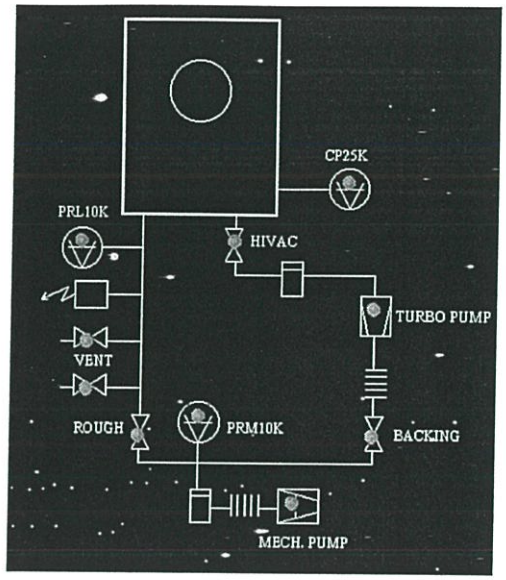
ใช้วัดความดันอยู่ในช่วงความดันบรรยากาศถึง 10^{-3} มิลลิบาร์ ภายในเกจพิรานิมีเส้นลวดซึ่งเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าอุณหภูมิของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากความร้อนถูกพาไปโดยโมเลกุลของกาซที่มาปะทะ การสูญเสียความร้อนจะมากที่ความดันสูง ที่ความดันต่ำลงอุณหภูมิของลวดจะสูงขึ้นค่าความต้านทานของลวดก็จะสูงขึ้นด้วย ความต้านทานของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ วัดได้โดยใช้วงจรวีตสโตนบริจด์ (Wheatstone bridge)

3.1.2.4 **เกจเพ็นนิ่ง** (Penning gauge)

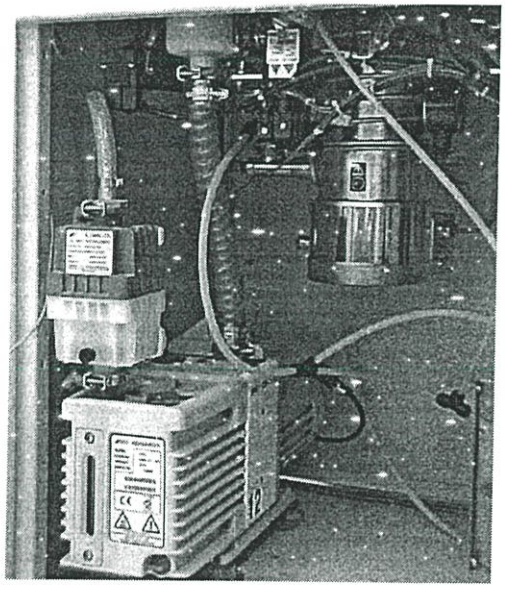


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของเกจเพ็นนิ่งของบริษัท EDWARDS รุ่น CP25K

อาจเรียกชื่ออื่นได้ คือ เกจฟิลิปไอออไนเซชัน (Philip ionization gauge) เกจขั้วแคโทดเย็น (Cold cathode ionization gauge)ใช้วัดความดันในช่วง 10^{-2}-10^{-8} มิลลิบาร์



(ก.) แสดงไดอะแกรมระบบสุญญากาศ



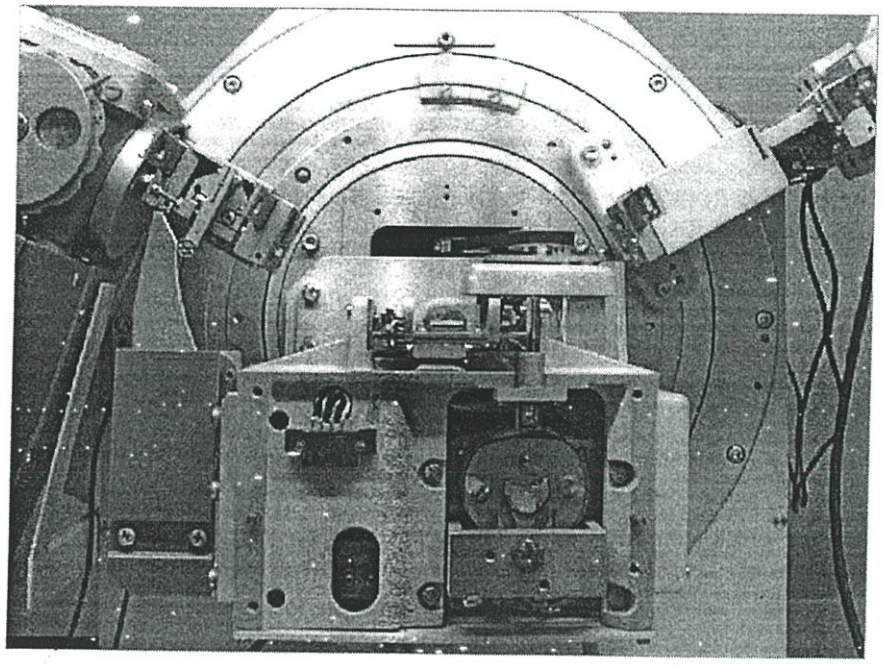
(ข.) แสดงลักษณะระบบปั๊มสุญญากาศ

รูปที่ 3.7 แสดงระบบสุญญากาศของระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง

ในระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง รุ่น AUTO500 ของบริษัท EDWARDS ประกอบปั๊มสุญญากาศและเกจวัดต่าง ๆ ดังไดอะแกรมรูปที่ 3.9 (ก.) และแสดงลักษณะระบบปั๊มสุญญากาศจากระบบจริงดังรูปที่ 3.9 (ข.)

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

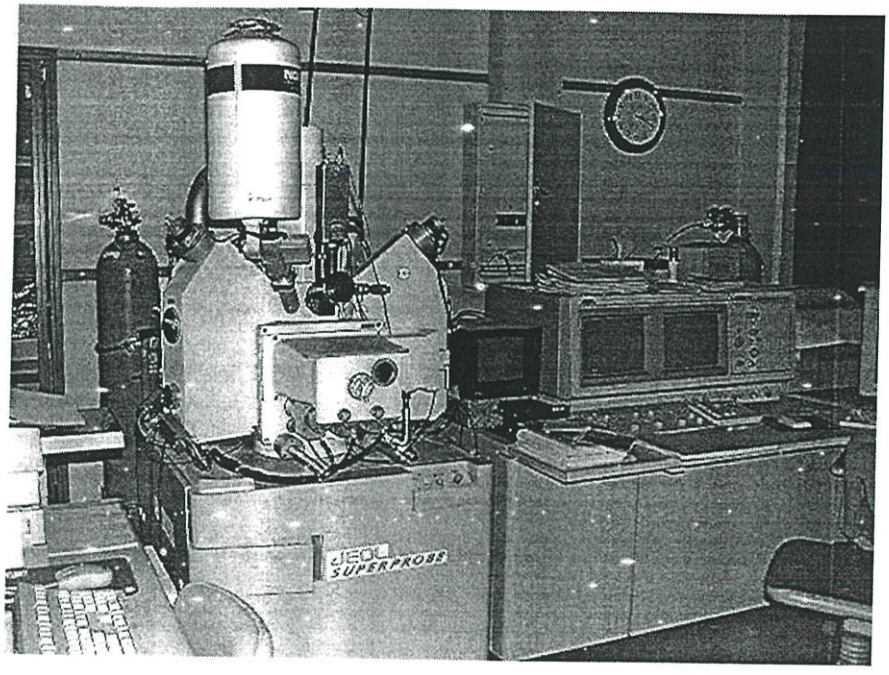
3.2.1 ระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ของบริษัท Bruker รุ่น D8

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำได้โดยการตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก รูปแบบการเลี้ยวเบน กับบัตรข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของธาตุและสารประกอบต่างๆ ที่จัดทำโดย A.S.T.M. (The American Society for Testing and Materials)

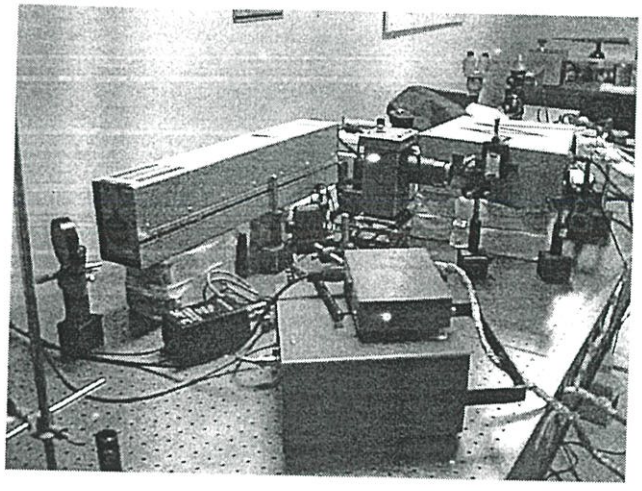
3.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ CRT มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และ จับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT

3.2.3 ระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี



รูปที่ 3.10 แสดงระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโทรสโกปี ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง

ระบบวัดโฟโตรีเฟลกแทนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.10 เป็นการมอดูเลทของสนามไฟฟ้าในสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยการกระตุ้นจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ผ่านตัวตัดแสง (Chopper) ที่ความถี่ Ω_m เมื่อมีการกระตุ้นจากแสงเลเซอร์โดยผ่านตัวตัดแสงจะทำให้เกิดกระบวนการเกิด (Generation) ในช่วงที่ผ่านช่องว่างตัวตัดแสง และเกิดกระบวนการรวมตัวใหม่ (Recombination) ในช่วงที่ไม่ผ่านตัวตัดแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งในจังหวะของกระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่จะเกิดมากที่สุดบริเวณที่เป็นแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำหมายถึงมีค่าของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Critical point) ที่บริเวณแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ สัญญาณที่วัดได้มี 2 ส่วน คือ สัญญาณ a.c. ที่มีความสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงรีเฟลกติวิตี (Reflectivity ΔR) และสัญญาณ d.c. ที่มีความสัมพันธ์กับค่ารีเฟลกติวิตี (Reflectivity R)

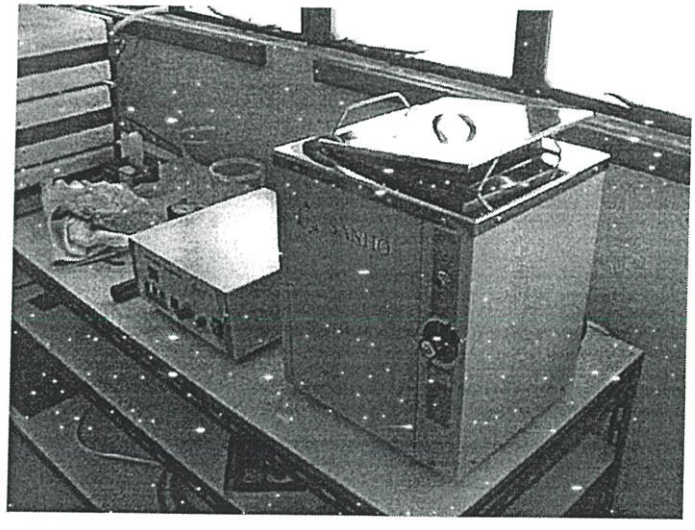


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะสัญญาณแสงที่ผ่านจากตัวตัดแสงไปกระตุ้นให้เกิดกระบวนการเกิดและกระบวนการรวมตัวใหม่

เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในระบบจะทำการควบคุมการหมุนสเตปปิงมอเตอร์ (Stepping Motor) ของโมโนโครเมเตอร์ ผ่านทางพริ้นเตอร์พอร์ทแบบฟูลสเตปและทำการอ่านค่าสัญญาณ a.c. และ d.c. จากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อคอินผ่านทาง RS-232 พร้อมทั้งเขียนกราฟสเปกตรัมที่วัดได้ปรากฏบนจอภาพของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์โดยตั้งสเกลอัตโนมัติ เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานโปรแกรมจะทำการหาค่าสเปกตรัมของ $\frac{\Delta R}{R}$ กับพลังงานโฟตอนพร้อมแสดงผลอีกครั้งบนจอภาพ และจะทำการเก็บข้อมูลเพื่อใช้วิเคราะห์ผลต่อไป

3.3 การทำความสะอาดกระจกสไลด์

ฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นกระจกสไลด์ของบริษัท MENZEL-GLASER รุ่น SupperFrost ขนาด 76×26 มิลลิเมตร ก่อนนำกระจกสไลด์เข้าสู่ระบบปลูกสาร ทำความสะอาดแบบ อัลทราโซนิกส์ (Ultrasonic) โดยล้างด้วย น้ำดีไอ (DI-water) ไอโซโพรพานอล (Iso propanal) อะซิโตน (Acetone) และเมททานอล (Methanal) อย่างละ 15 นาที ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษปลอดฝุ่น เป่าแห้งด้วยกาซไนโตรเจน



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องอัลทราโซนิกส์ที่สามารถตั้งอุณหภูมิทำความร้อนได้

3.4 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริงแบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

ปัญหาใหญ่ในการใช้งานระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง คือเกิดการสะท้อนของคลื่น อาร์ เอฟ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เครื่องเกิดความเสียหาย ฉะนั้นขั้นแรกในการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ เราจึงต้องหาสภาวะของเครื่องในการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ ที่ทำให้อัตราการปลูกฟิล์มคงที่และไม่เกิดการสะท้อนของคลื่น อาร์ เอฟ โดยหาความสัมพันธ์ของ 3 พารามิเตอร์ คือ

- กำลังของคลื่น อาร์ เอฟ
- ปริมาณกาซอาร์กอน
- ปริมาณกาซไนโตรเจน

3.4.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับปริมาณกาซอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

ในการทดลองใช้ อลูมินัมบริสุทธิ์ 99.999 % เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วเป็นเป้าสารเคลือบ วางฐานรองรับ ด้านบนห่างจากเป้าสารเคลือบ 7 เซนติเมตร ใช้กาซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% เป็นอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ กำลังของคลื่น อาร์เอฟ กำหนดให้เท่ากับ 200 วัตต์ (เนื่องจากเบื้องต้นไม่ทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่น อาร์เอฟ และได้อัตราการเคลือบฟิล์มคงที่) ทำความดันก่อนการสปัตเตอริงต่ำกว่า 10^{-6} มิลลิบาร์ ต้องการฟิล์มหนา 500 นาโนเมตร ทำการปลูกฟิล์มโดยปล่อยกาซอาร์กอนปริมาณต่าง ๆ ในช่วง 1-10 sccm บันทึกค่าอัตราการปลูกฟิล์มแล้วนำมาวาดกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับปริมาณกาซอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบเตรียมฟิล์มบางอลูมินัม 2 ขนาดคือ 1×1 และ 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร จากนั้นเลือกปริมาณอาร์กอนที่เหมาะสมโดยเลือกจาก ปริมาณอาร์กอนที่ทำให้อัตราการปลูกฟิล์มคงที่และไม่ต่ำจนเกินไป สำคัญที่สุดคือต้องไม่ทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่น อาร์ เอฟ

3.4.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับ อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน

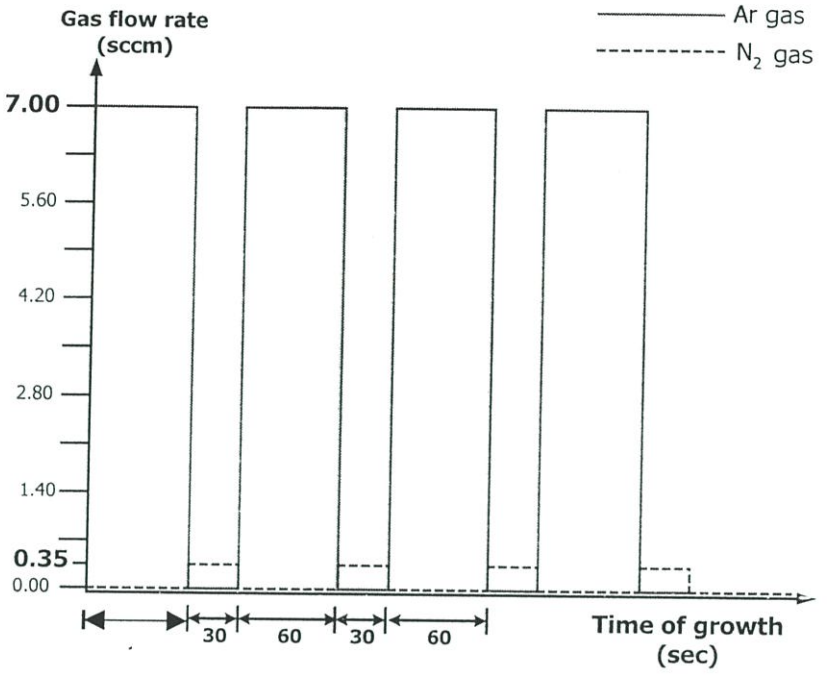
เมื่อเลือกปริมาณของกาซอาร์กอนที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มได้แล้ว จากนั้นขั้นตอนต่อไปทำการปลูกฟิล์มโดยปล่อยกาซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.999 % เข้าผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน ทำการบันทึกค่าอัตราการปลูกฟิล์ม แล้วนำมาวาดกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนที่ป้อนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน เตรียมฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ 2 ขนาดคือ 1×1 และ 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร

นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปตรวจสอบแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึก โฟโตรีเฟลกแทนซ์สเปกโตรสโกปีเพื่อหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เตรียมได้

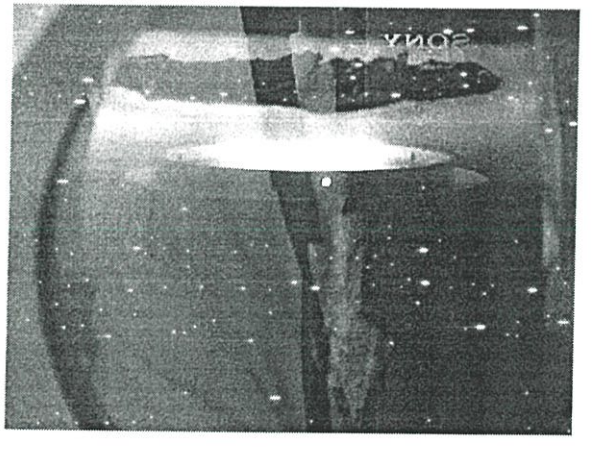
3.5 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริงแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

ใช้ระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริงรุ่น Auto 500 ซึ่งผลิตโดยบริษัท Edwards เป้าสารเคลือบเป็นอลูมินัมความบริสุทธิ์ 99.999 % เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว วางแผ่นยึดจับฐานรองรับด้านบนห่างจากเป้าสารเคลือบ 7 เซนติเมตร ความดันก่อนการสปัตเตอริงต่ำกว่า 10^{-7} มิลลิบาร์ ใช้กาซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999 % เป็นอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ และใช้กาซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.999 % sccm เป็นกาซไวปฏิกิริยา

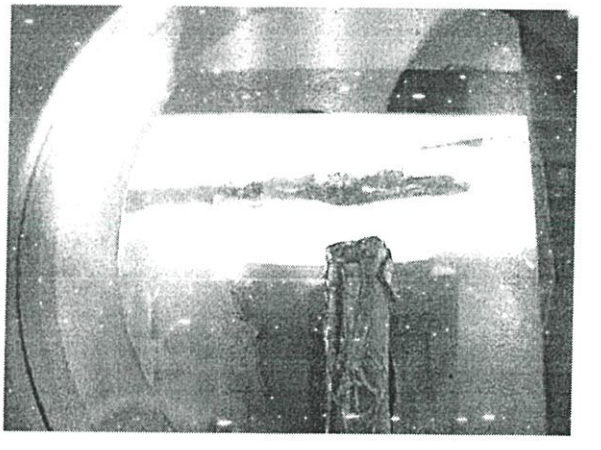
ความแตกต่างของการปลูกฟิล์ม แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาคือ การปล่อยกาซเป็นลำดับ โดยลำดับแรกทำการปล่อยกาซอาร์กอน ที่ทำหน้าที่เป็นอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบในช่วงเวลาที่เหมาะสมความดันในช่วงนี้อยู่ในระดับ 10^{-2} มิลลิบาร์อัตราการปลูกฟิล์มประมาณ 7 อังสตรอมต่อวินาที ลำดับต่อไปหยุดป้อนกาซอาร์กอนแล้วปล่อยกาซไวปฏิกิริยาไนโตรเจน เข้าสู่ระบบในช่วงเวลาที่เหมาะสมความดันในช่วงนี้อยู่ในระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์อัตราการปลูกฟิล์มประมาณ 14 อังสตรอมต่อวินาที ทำการปล่อยกาซสลับไปมาจนได้ฟิล์มบางที่มีความหนาตามที่ต้องการ เตรียมฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ 2 ขนาดคือ 1×1 และ 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.13 แสดงไดอะแกรมในการป้อนกาซอาร์กอนและกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบด้วยเทคนิคปลูกฟิล์ม แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา



(ก) ขณะปล่อยกาซอาร์กอน



(ข) ขณะปล่อยกาซไนโตรเจน

รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะพลาสมาในขบวนการสปัตเตอริงแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

3.5.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบ ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยควบคุมช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอน และ ช่วงเวลาในการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

ปลูกฟิล์มอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยควบคุมอัตราการปล่อยกาซอาร์กอน และอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนให้คงที่ ตามค่าที่เลือกไว้ในหัวข้อ 3.4.1 , 3.4.2 ตามลำดับ ซึ่งไม่ทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นอาร์ เอฟ และ ได้อัตราการปลูกฟิล์มคงที่ กำลังของคลื่นอาร์ เอฟ กำหนดให้เท่ากับ 200 วัตต์ ปลูกฟิล์มหนา 500 นาโนเมตร

ทำการทดลองโดยใช้ช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอน : t_{Ar} (วินาที) ต่อ ช่วงเวลาในการปล่อยกาซไนโตรเจน : t_{N_2} (วินาที) เท่ากับ 30 : 30, 60 : 30, 60 : 20, 60 : 10 ตามลำดับ เพื่อหาช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอน และ กาซไนโตรเจนที่ดีที่สุดในการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์

3.5.2 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ

ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา เพื่อเป็นตัวอย่างเปรียบเทียบกับฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยควบคุมอัตราการปล่อยกาซอาร์กอนให้คงที่ตามค่าที่เลือกไว้ในหัวข้อ 3.4.1 กำลังของคลื่น อาร์เอฟ เท่ากับ 200 วัตต์ ใช้ช่วงเวลาในการปล่อยกาซต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่หาได้ในหัวข้อ 3.5.1 โดยไม่มีการปล่อยกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ความหนา 20 , 100, 500 นาโนเมตร

3.5.3 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน

ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาใช้กำลังของคลื่น อาร์ เอฟ เท่ากับ 200 วัตต์ ช่วงเวลาในการปล่อยกาซต่าง ๆ ใช้ตามเงื่อนไขที่หาได้ในหัวข้อ 3.5.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์หนา 500 นาโนเมตร

กำหนดอัตราการปล่อยกาซอาร์กอนคงที่ตามเงื่อนไขที่หาได้ในหัวข้อ 3.4.1 ทำการทดลองโดยเพิ่มอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบค่าต่าง ๆ เพื่อหาอัตราส่วนของกาซทั้งสองที่สามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ดีที่สุด

3.5.4 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่กำลังของคลื่นอาร์ เอฟต่าง ๆ

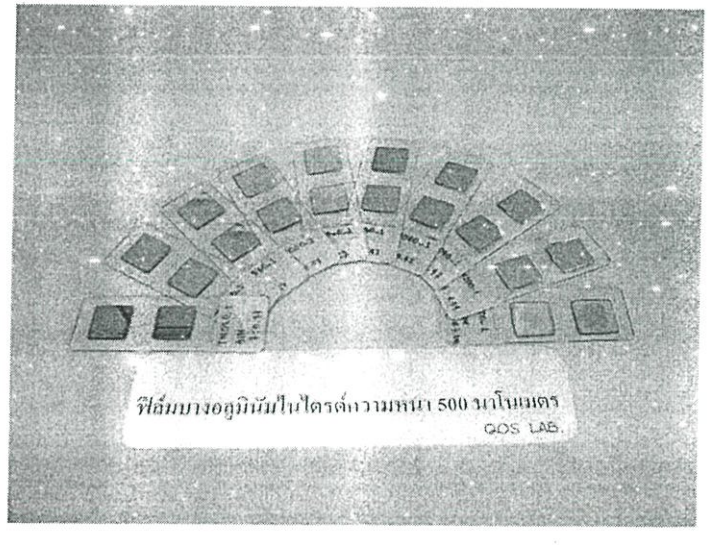
ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยควบคุมอัตราการปล่อยกาซอาร์กอน และอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนให้คงที่ ตามอัตราส่วนที่ได้ตามหัวข้อ 3.5.3 ใช้ช่วงเวลาในการปล่อยกาซต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่หาได้ในหัวข้อ 3.5.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์หนา 500 นาโนเมตร

ทดลองปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ค่ากำลังของคลื่นอาร์ เอฟ 100, 150, 200, 300 วัตต์ เพื่อหาค่ากำลังของคลื่น อาร์เอฟ ที่ดีที่สุดในการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์

3.5.5 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่ความหนาต่าง ๆ

ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยควบคุมอัตราการปล่อยกาซอาร์กอน และอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนให้คงที่ ตามอัตราส่วนที่ได้ตามหัวข้อ 3.5.3 ใช้ช่วงเวลาในการปล่อยกาซต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่หาได้ในหัวข้อ 3.5.1 ใช้กำลังของคลื่น อาร์เอฟ ตามผลที่ได้ตามหัวข้อ 3.5.4

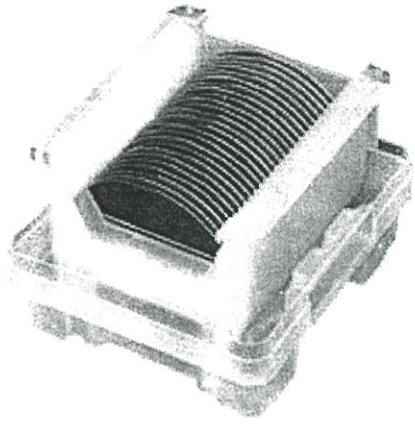
ทดลองปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ความหนา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 500 นาโนเมตร



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่เตรียมได้

3.6 กระบวนการสร้างและวัดสมบัติเฉพาะของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

3.6.1ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำ (Substrate Cleaning)



รูปที่ 3.16 ลักษณะแผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

ใช้แผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเคลือบด้านหน้าด้วยชั้นออกไซด์เป็นฐานรองรับ ซึ่งทำความสะอาดผิวหน้าด้วยขบวนการ "Piranha wafer clean" ตามขั้นตอนดังนี้

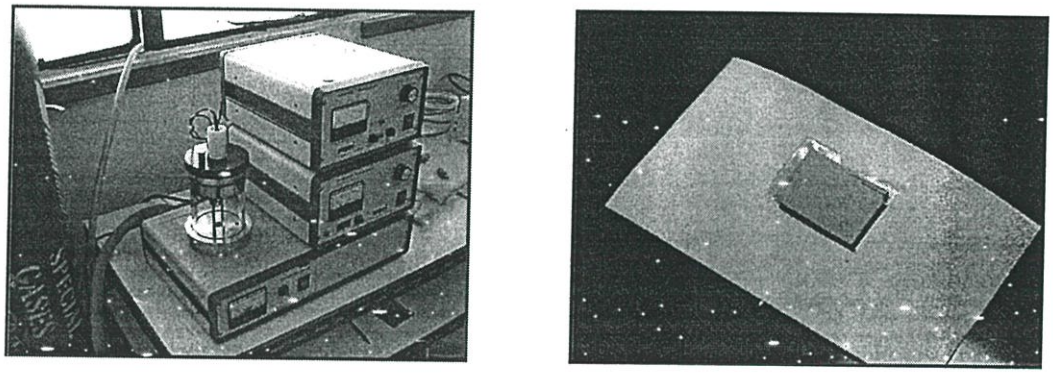
- ล้างด้วย H_2So_4 (96%) ผสมกับ H_2O_2 (31%) ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}C$ เป็นเวลานาน 5 นาที สังเกตว่าถ้ายังมีฟองเล็ก ๆ เกาะบนผิวของแผ่นสารกึ่งตัวนำแสดงว่ายังมีคราบไขมันเกาะอยู่
- Rinse ด้วยน้ำ DI (ทำการเขย่าไปด้วย) 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยกาซไนโตรเจน จากนั้นสังเกตดูที่แผ่นสารกึ่งตัวนำถ้ายังมีลักษณะเป็นเม็ด ๆ เกาะอยู่ให้ทำการ Rinse น้ำ DI ใหม่

3.6.2 ขั้นตอนการปลูกผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์

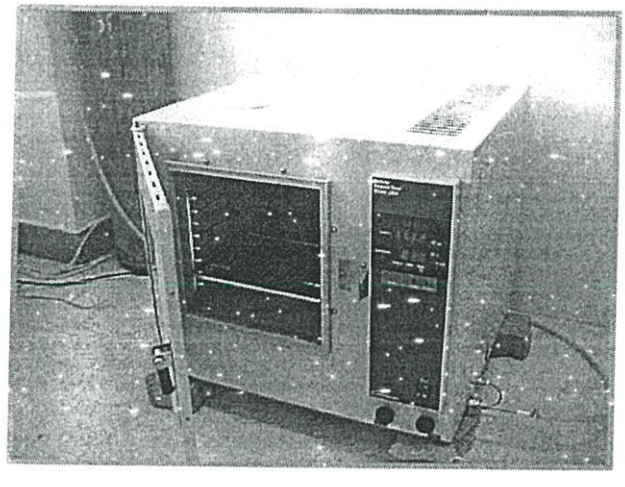
ปลูกชั้นอลูมินัมไนไตรด์โดย อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ตามเงื่อนไขการปลูกฟิล์มที่ดีที่สุด

3.6.3 ขั้นตอนการเคลือบขั้วโลหะทอง (Au coating)

ในการเคลือบขั้วทองสำหรับสร้างอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์แบ่งเป็น 2 ขั้วคือ ทำขั้วทองด้านบนเป็นแบบรอยต่อชอตต์กีต่อจากอลูมินัมไนไตรด์ และขั้วทองด้านล่างเป็นแบบรองต่อโอห์มมิก (ด้านหลังแผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอน) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 15 นาที



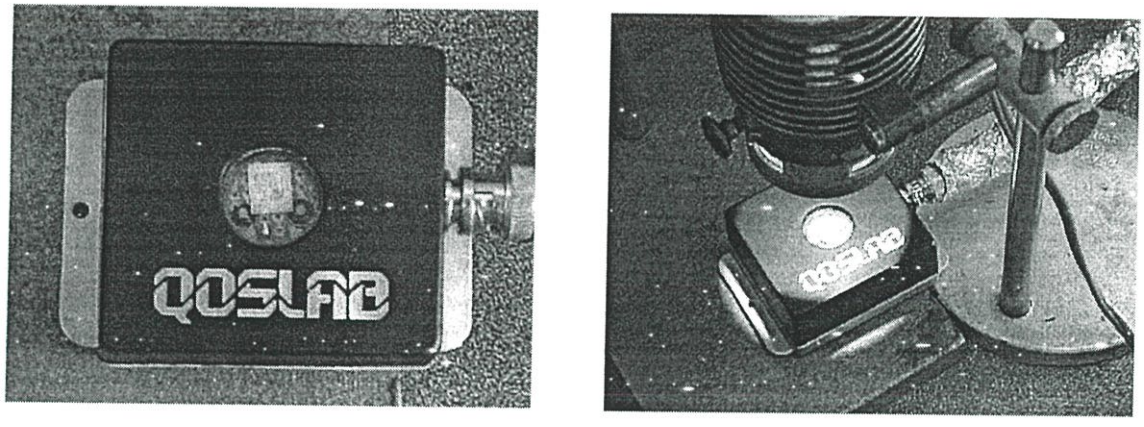
รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะเครื่องเคลือบขั้วโลหะทอง และ ตัวอย่างโฟโตดีเทคเตอร์ที่เคลือบขั้วทองแล้ว



รูปที่ 3.18 แสดงรูปเตาอบซึ่งสามารถทำสุญญากาศได้

3.6.4 **การเตรียมต้นแบบ** (Prototype)

ทำการตรวจสอบชิ้นงานว่ามีทองติดอยู่ที่ขอบของชิ้นงานหรือไม่ ถ้ามีให้ทำการตัดขอบด้านนั้นออก จากนั้นต่อขาโดยใช้กาวเงิน (Ag-adhesive) เป็นตัวประสานซึ่งจะได้โฟโตดีเทคเตอร์พร้อมนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้น

3.6.5 **การวัดสมบัติเฉพาะของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ**

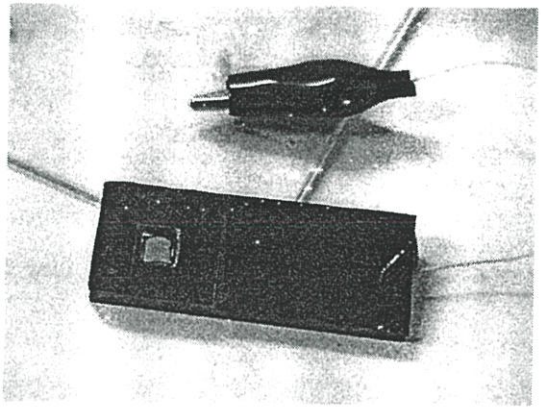
ทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าคือวัดความสัมพันธ์ของ กระแส-แรงดันไบอัสแบบตรงที่ป้อนให้อุปกรณ์ช่วง 0-4 โวลต์

วัดสมบัติทางแสงคือ วัดสเปคตรัมการตอบสนองต่อแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 350-1300 นาโนเมตร ของโฟโตเทคเตอร์โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

3.7 กระบวนการสร้างและวัดสมบัติเฉพาะของหัววัดค่า ความเป็นกรด-เบส โครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

ขั้นตอนในการสร้างหัววัดค่า pH โครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ เหมือนในการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

ขั้นตอนที่ต่างกันคือ การสร้างหัววัดค่า pH โครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ทำขั้วทองหนา 200 นาโนเมตรที่ด้านหลังของแผ่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเท่านั้น





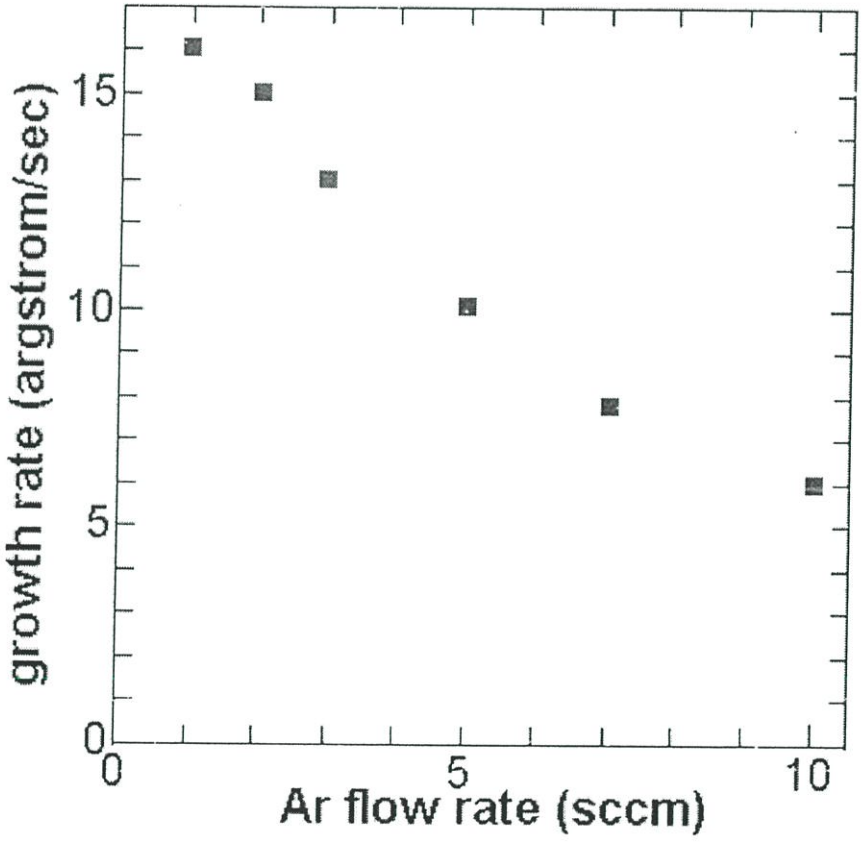
รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะหัววัดค่า pH โครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

สำหรับการวัดสมบัติเฉพาะของหัววัดค่า pH โครงสร้าง อิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ จะทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าคือวัดความสัมพันธ์ของ กระแส-แรงดันไบอัสแบบตรงที่ป้อนให้อุปกรณ์ช่วง 0-9 โวลต์

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริงแบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

4.1.1 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการป้อนกาซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ

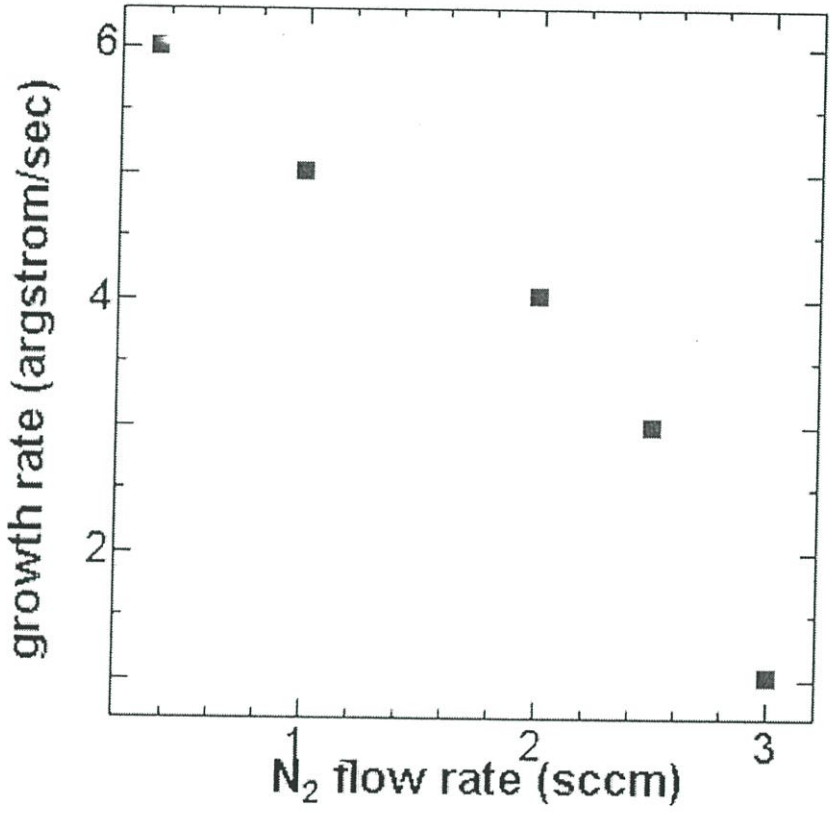


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการป้อนกาซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ

จากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มกับอัตราการป้อนกาซอาร์กอนตั้งแต่ 0-10 sccm (Standard cubic centemeter per minute) พบว่าอัตราการปลูกฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการป้อนกาซอาร์กอนเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อลดอัตราการป้อนกาซอาร์กอนลง

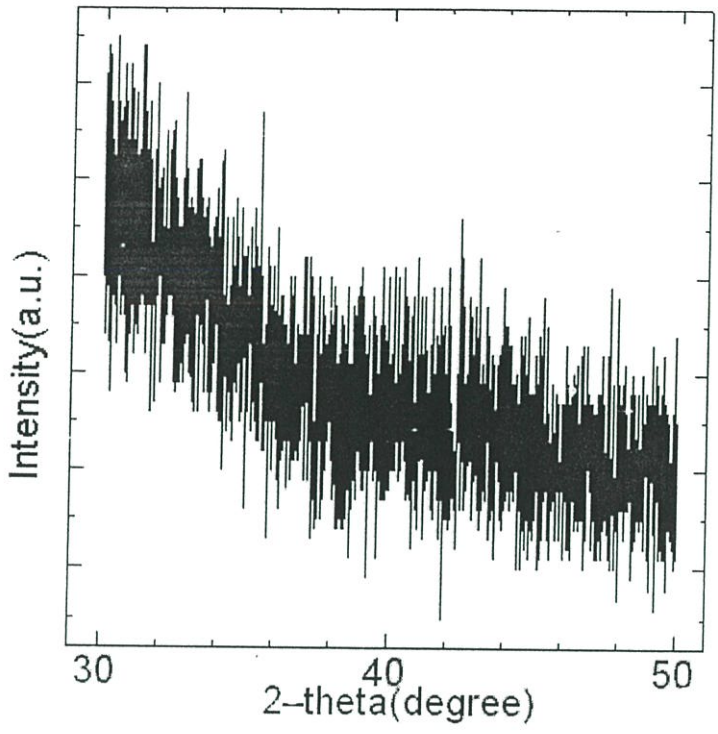
เลือกใช้อัตราการป้อนกาซอาร์กอนเท่ากับ 7 sccm เนื่องจากต้องการอัตราการปลูกฟิล์มที่ 8 อังสตรอมต่อวินาที

4.1.2 ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับ อัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน

จากรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม กับอัตราการป้อนกาซไนโตรเจน 0.35 – 3 sccm เข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอน พบว่าอัตราการปลูกฟิล์มมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเข้าผสมในบรรยากาศของกาซอาร์กอนมากขึ้น โดยปริมาณของไนโตรเจนที่ทำให้อัตราการปลูกฟิล์มสูงสุดคือ 0.35 sccm



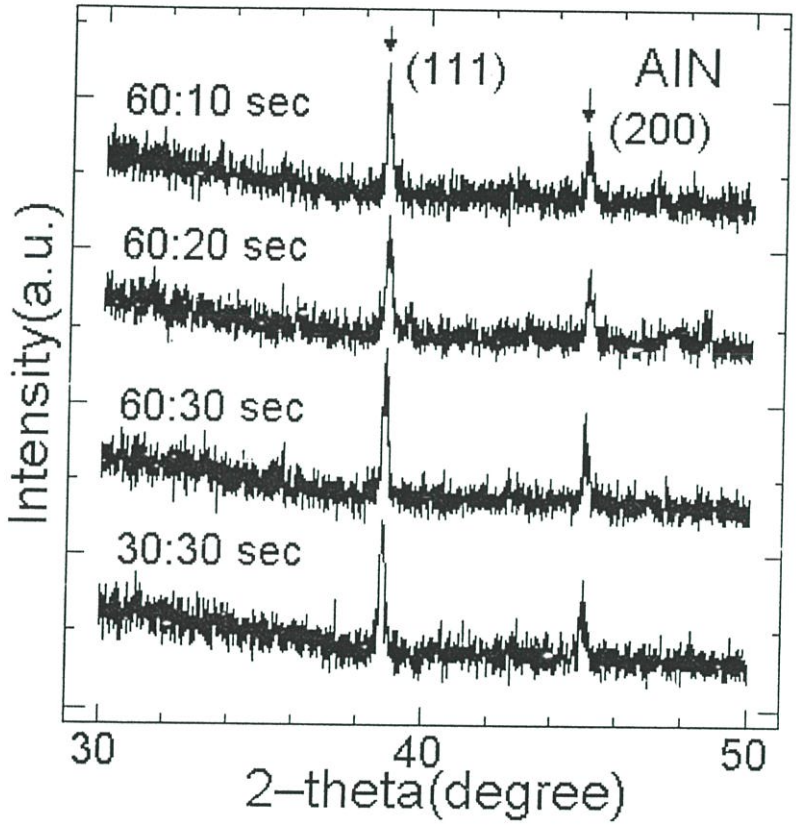
รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ ความหนา 500 นาโนเมตรที่ปลูกแบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

จากรูป 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ทำการวัดด้วยเครื่อง X-ray Diffraction รุ่น D80 advance ของบริษัท Bruker ใช้ $CuK_{\alpha 1}$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม ผลที่ได้จากการวัดไม่พบยอดของการเลี้ยวเบน ที่ทุกอัตราการป้อนกาซไนโตรเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกโดยไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยานั้น มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการปลูกฟิล์มบางด้วย วิธีไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาคืออาจเกิดปัญหาการสะท้อนของคลื่น อาร์ เอฟ ในบางอัตราส่วนของการป้อนกาซไนโตรเจนเข้าผสมกับกาซอาร์กอนได้ และเมื่อทำการทดลองซ้ำในเงื่อนไขเดิมก็ไม่สามารถควบคุมอัตราการปลูกฟิล์มให้คงที่เท่าเดิมได้

4.2 การปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ โดยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอน สปัตเตอริงแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

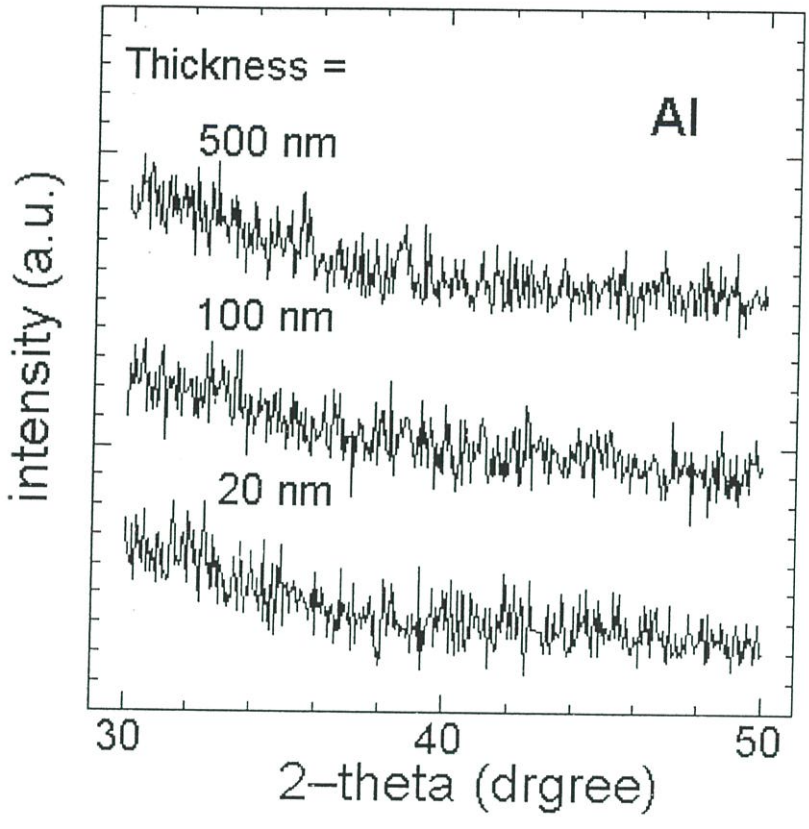
4.2.1 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา โดยควบคุมช่วงเวลาในการปล่อยกาซอาร์กอน และกาซไนโตรเจน



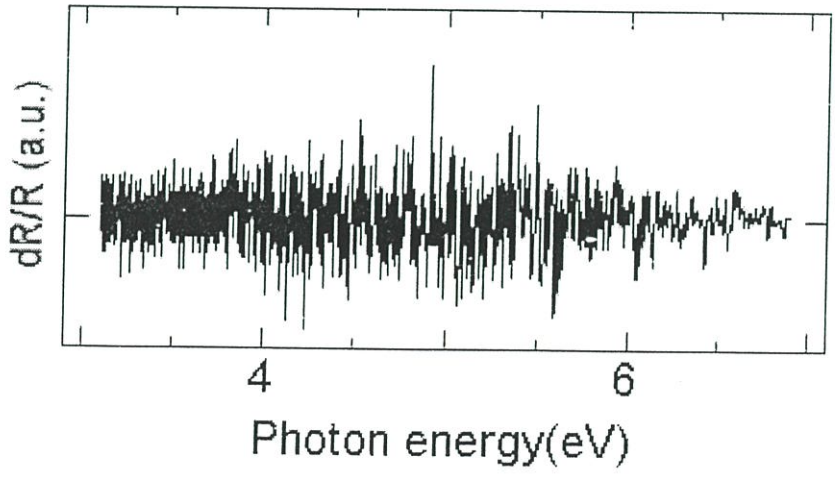
รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยใช้ t_{Ar} : t_{N_2} ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาโดยใช้ช่วงเวลาในการปล่อยกาซกาซอาร์กอน t_{Ar} (วินาที) ต่อ ช่วงเวลาในการปล่อยกาซไนโตรเจน t_{N_2} (วินาที) เท่ากับ 30 : 30, 60 : 30, 60 : 20 และ 60 : 10 พบยอดของการเลี้ยวเบน 2 ยอดคือ ที่มุม 38.90 องศา และ 45.03 องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวเป็นผลึกในระนาบ (111) และ ระนาบ (200) ตามลำดับ แสดงว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้จากวิธีควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา เป็นฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ ซิงค์เบลนด์

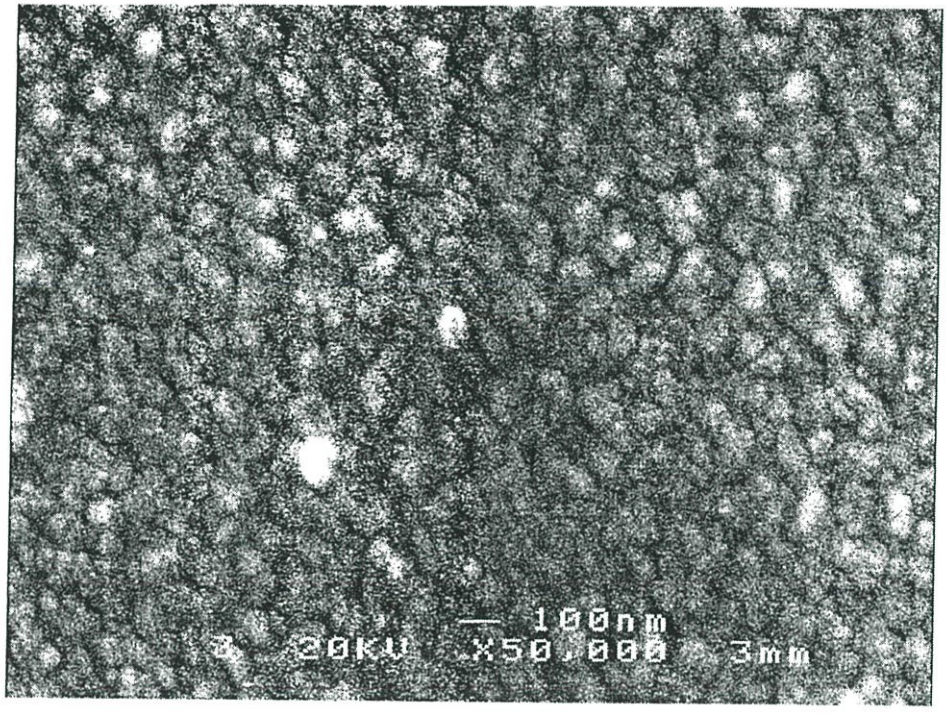
4.2.2 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาความหนาต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม โฟโตรีเฟลกแทนซ์ของฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา



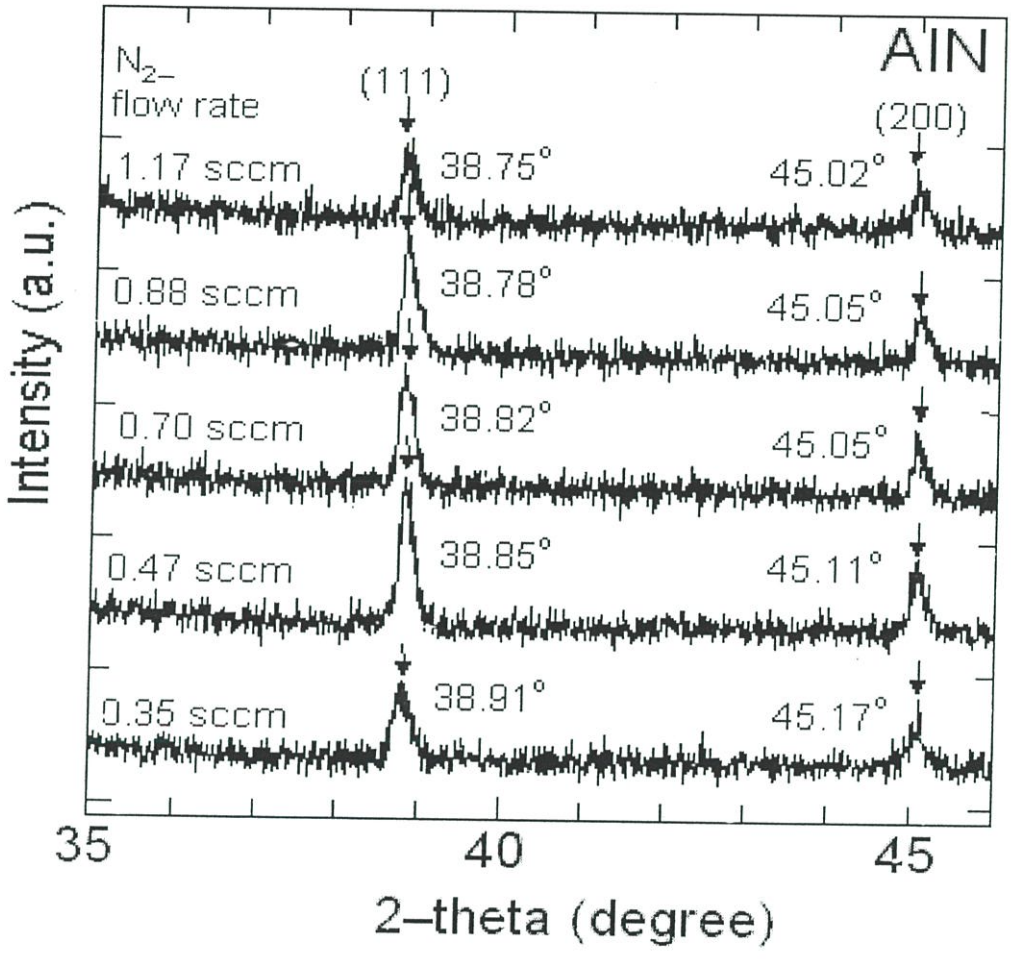
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจาก SEM ของฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์
ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนา 20, 100, 500 นาโนเมตร ไม่พบยอดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมใด ๆ ที่ทุก ๆ ความหนาของฟิล์มแสดงว่าฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกได้มีโครงสร้างผลึกแบบ อสันฐาน

จากรูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการสะท้อนแสงของฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาของทุก ๆ ความหนาไม่พบยอดการสะท้อนของแสง แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางอลูมินัมเป็นโลหะซึ่งไม่มีค่าแถบพลังงานต้องห้าม

จากรูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของฟิล์มบางอลูมินัมบริสุทธิ์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวฟิล์มบางมีลักษณะเป็นก้อนระดับ 100 นาโนเมตร

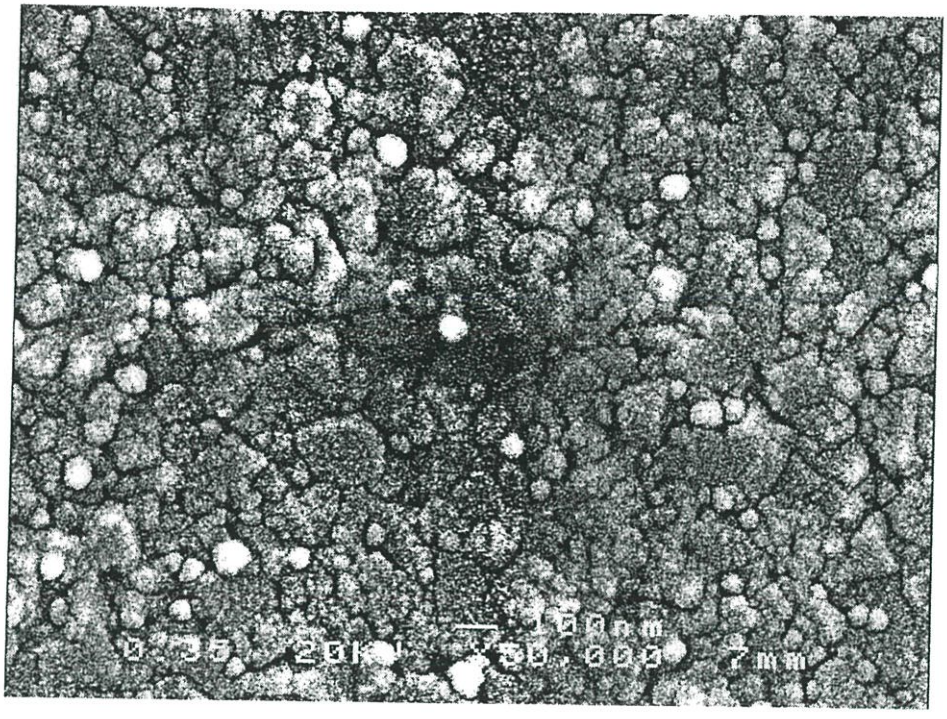
4.2.3 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา
โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน



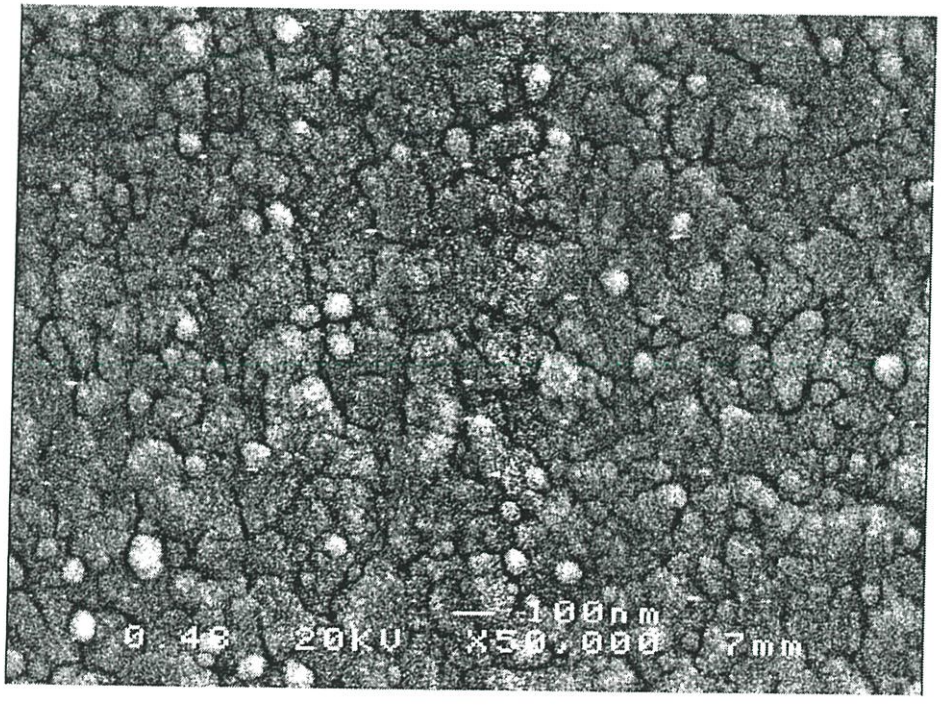
รูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์
ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนต่าง ๆ

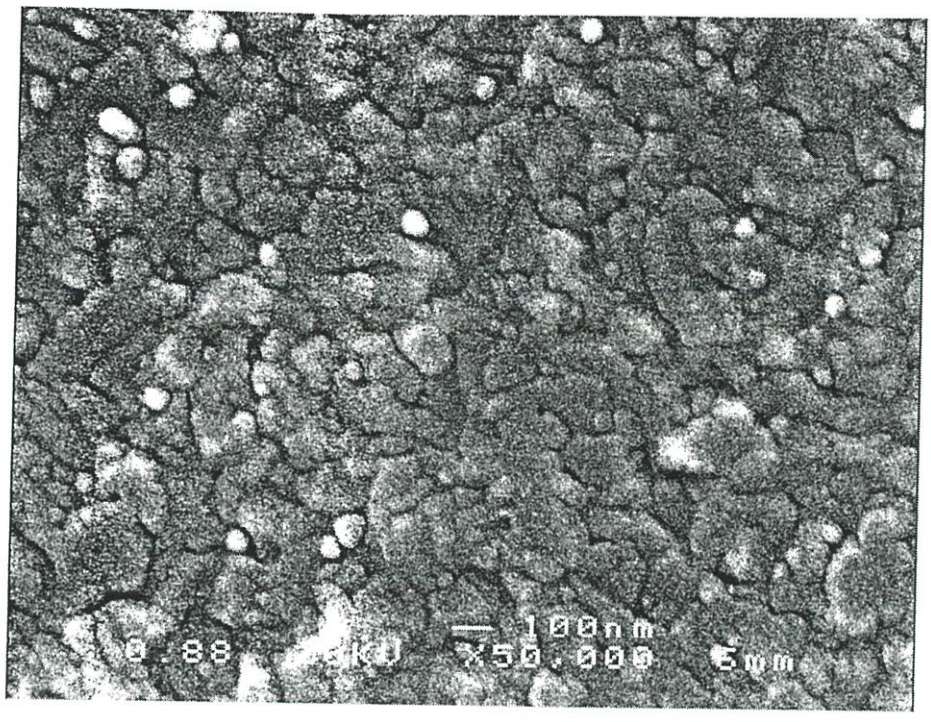
N_2 flow rate (sccm)	2θ (องศา)	FWHM (องศา)	d ($\mathring{A}$)	ระนาบ (hkl)	a ($\mathring{A}$)	D ($\mathring{A}$)
0.35	38.90842	0.27857	2.313749	(111)	4.00753	336.1965
	45.17449	0.12143	2.006318	(200)	4.01264	787.6582
0.47	38.84668	0.22143	2.317283	(111)	4.01365	422.8715
	45.11276	0.18571	2.008919	(200)	4.01784	514.9097
0.88	38.78495	0.17857	2.320829	(111)	4.01979	524.2687
	45.05102	0.20714	2.011529	(200)	4.02306	461.5357
1.17	38.75408	0.20714	2.322607	(111)	4.02287	451.9155
	45.02015	0.2000	2.012836	(200)	4.02567	477.9591



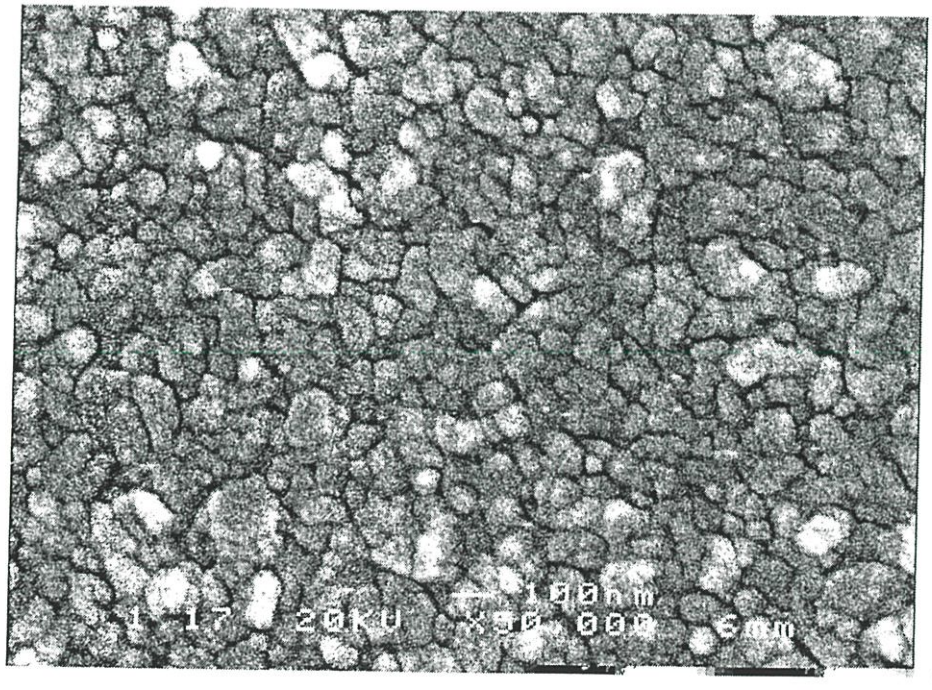
(ก) อัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเท่ากับ 0.35 sccm



(ข) อัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเท่ากับ 0.47 sccm

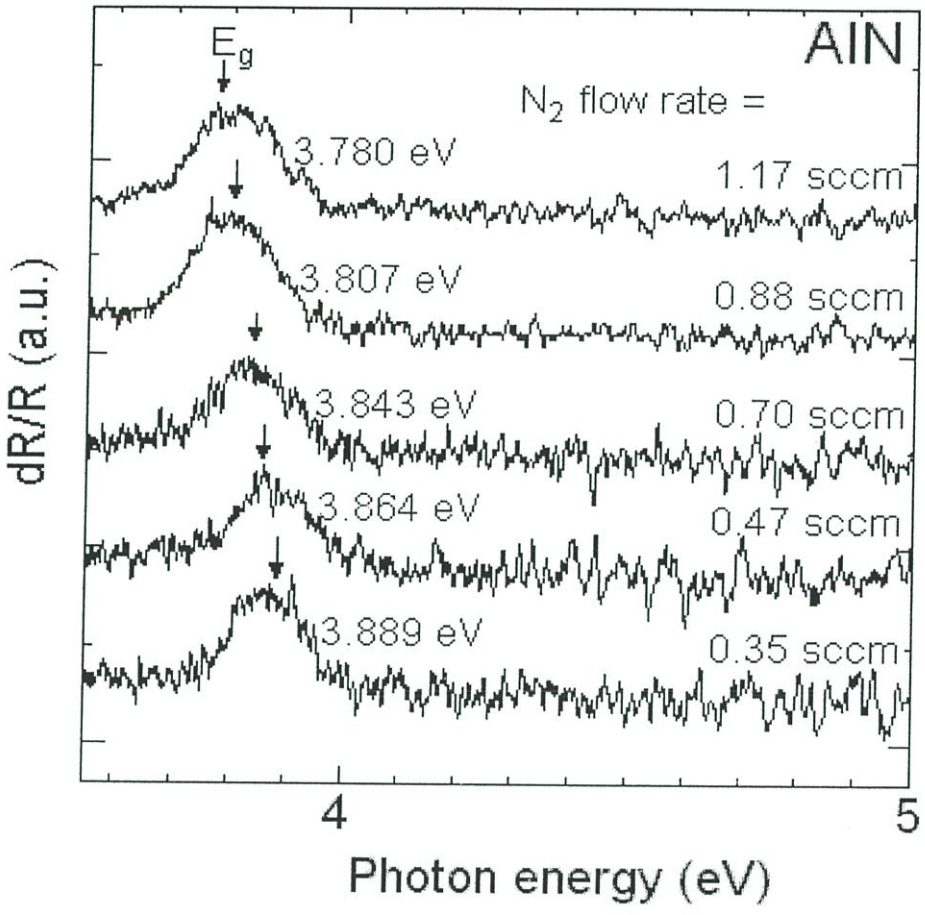


(ค) อัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเท่ากับ 0.88 sccm



(ง) อัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเท่ากับ 1.17 sccm

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายพื้นผิว SEM ขยาย 50,000 เท่า ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

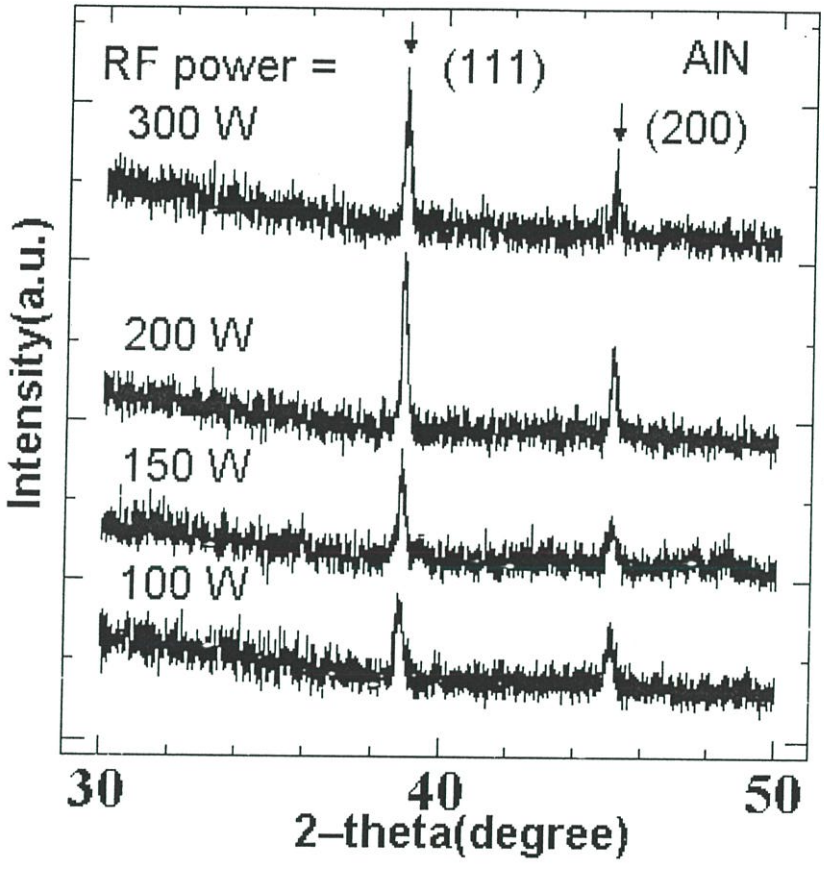
จากรูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนปริมาณ 0.35, 0.47, 0.70, 0.88, 1.17 sccm มุมยอดของการเลี้ยวเบนในระนาบ (111) อยู่ในช่วง 38.75 – 38.91 องศา และมุมยอดของการเลี้ยวเบนในระนาบ (200) อยู่ในช่วง 45.02 – 45.17 องศา พบว่าเมื่ออัตราการป้อนกาซไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น มุมยอดของการเลี้ยวเบนเกิดการเลื่อนไปทางมุมที่น้อยลงจากรูปแบบสเปกตรัมของการเลี้ยเบนรังสีเอ็กซ์นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 1.

จากรูปที่ 4.9 แสดงรูปถ่ายพื้นผิวจาก SEM ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ พบว่าขนาดของเม็ดผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน

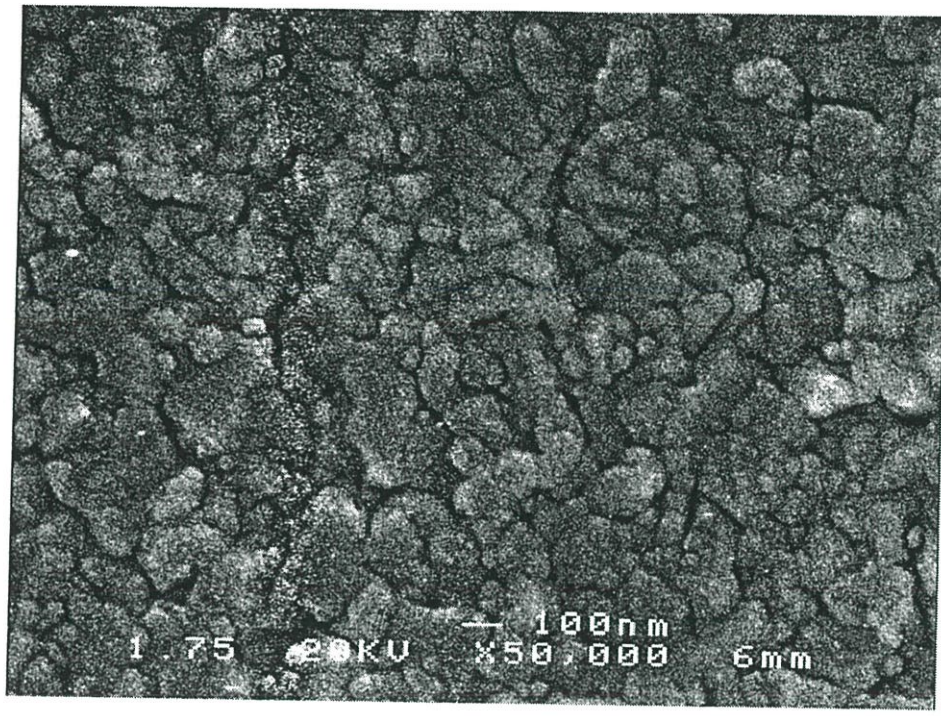
จากรูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมกโฟโตรีเฟลกแทนซ์ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ ค่าแถบ

พลังงานต้องห้ามที่วัดได้อยู่ในช่วง 3.780 - 3.889 eV พบว่าอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น ค่าแถบพลังงานต้องห้ามจะมีค่าลดลง

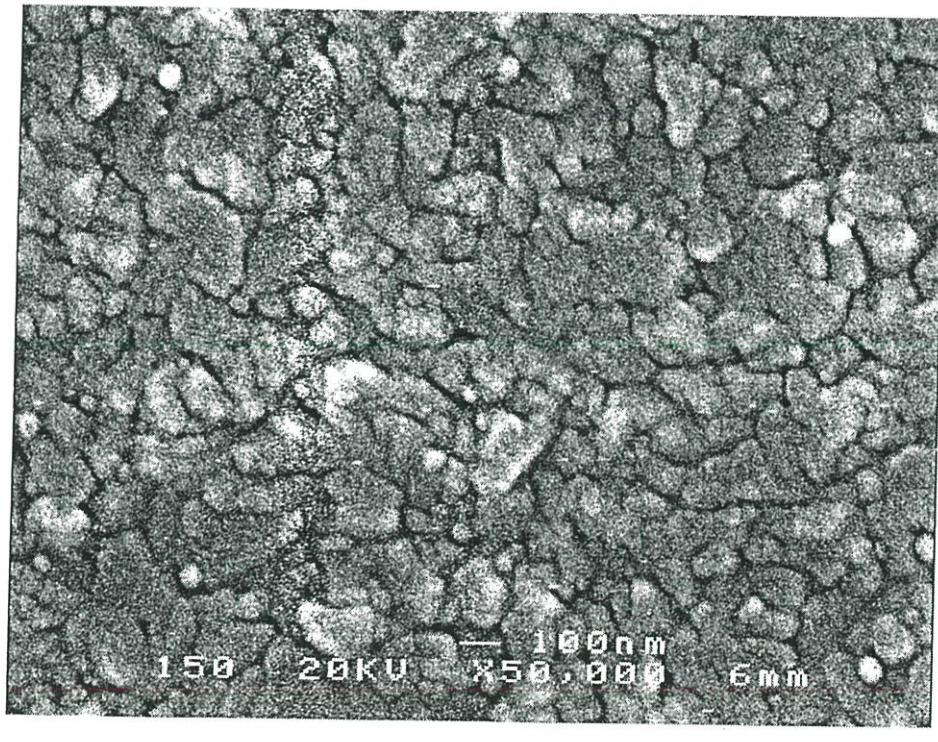
4.2.4 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา โดยเปลี่ยนแปลงที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟต่าง ๆ



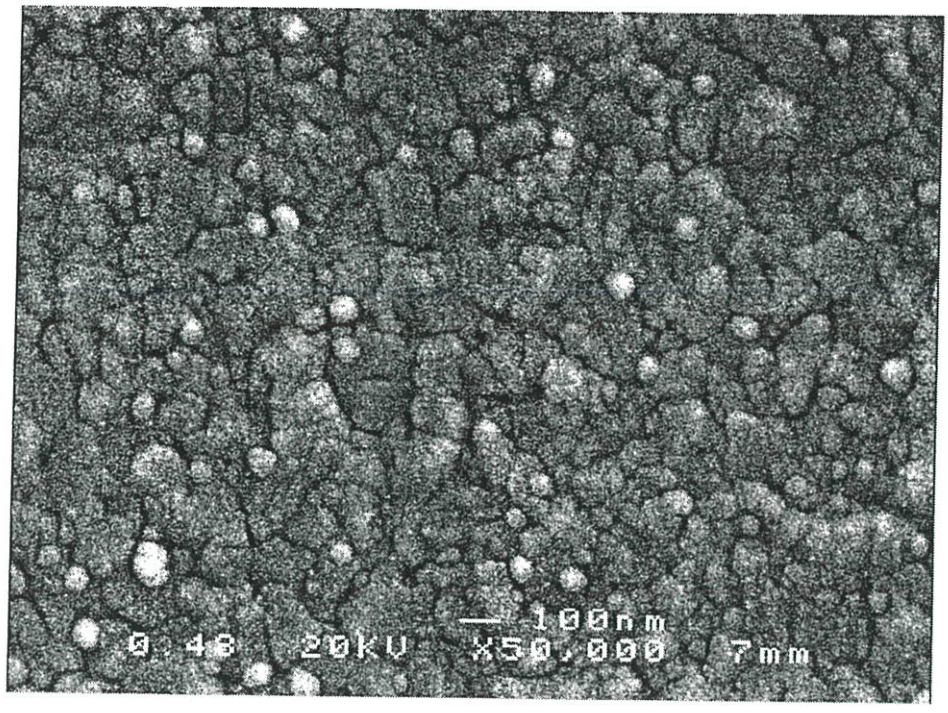
รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟค่าต่าง ๆ



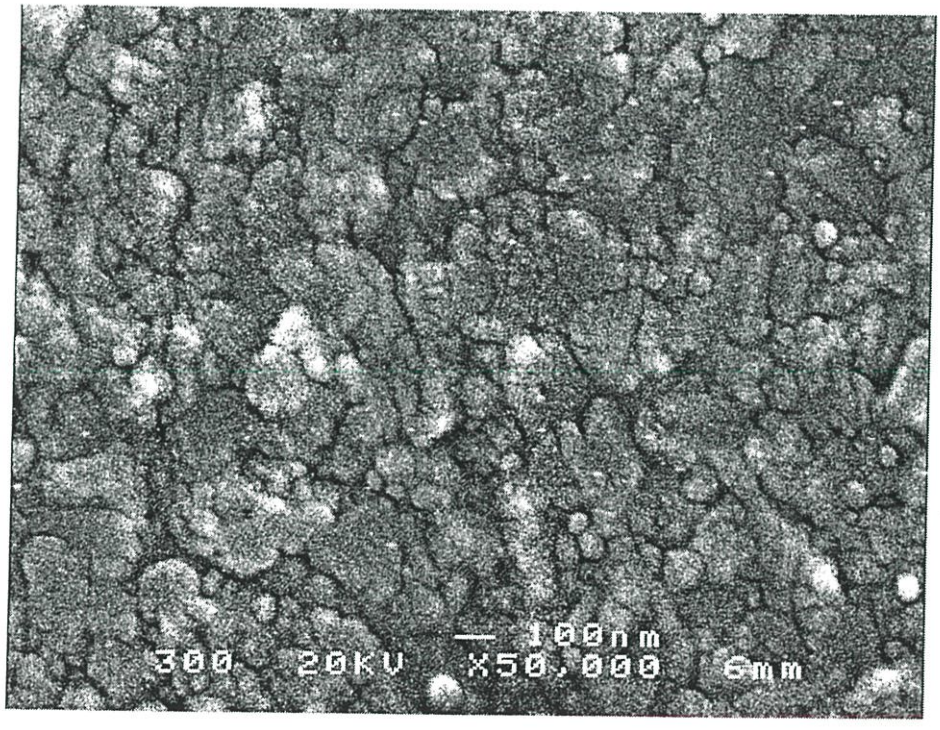
(ก) กำลังของคลื่น อาร์ เอฟเท่ากับ 100 วัตต์



(ข) กำลังของคลื่น อาร์ เอฟเท่ากับ 150 วัตต์



(ค) กำลังของคลื่น อาร์ เอฟเท่ากับ 200 วัตต์

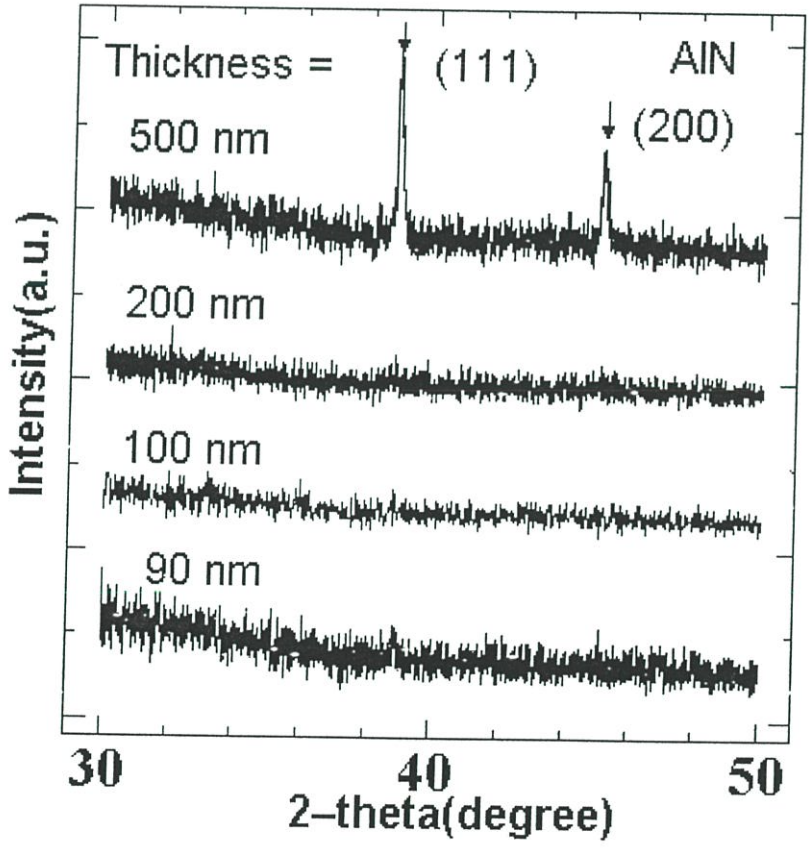


(ง) กำลังของคลื่น อาร์ เอฟเท่ากับ 300 วัตต์

รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวจาก ขยาย 50,000 เท่า ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่ กำลังของคลื่น อาร์ เอฟค่าต่าง ๆ

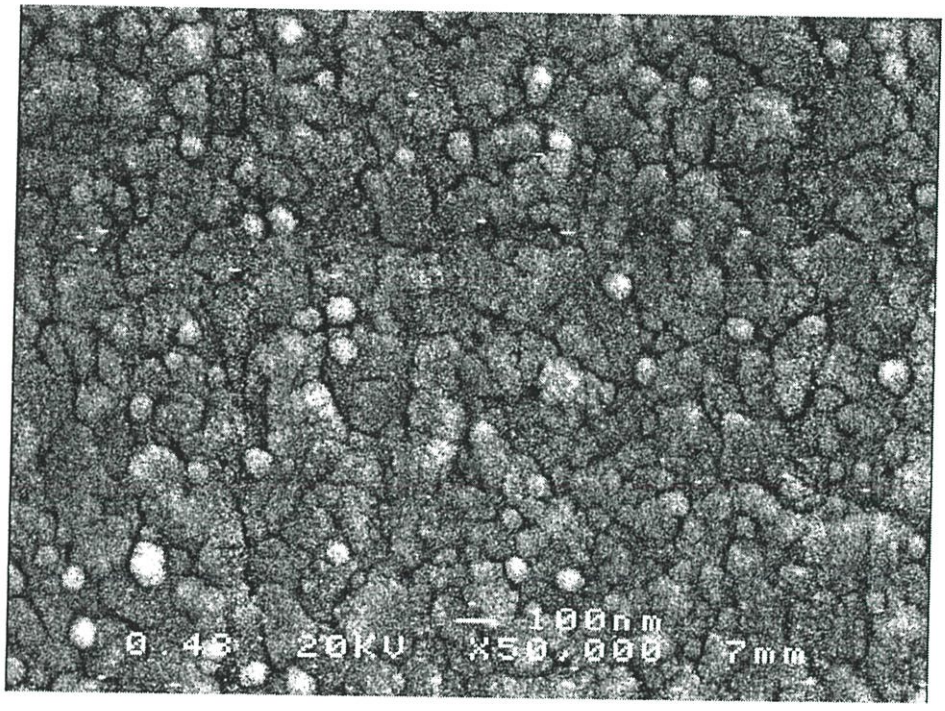
รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟเท่ากับ 100, 150, 200, 300 วัตต์ พบยอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 38.82 และมุม 45.11 องศา ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวเป็นผลึกในระนาบ (111) และระนาบ (200) แสดงให้เห็นว่าทุก ๆ ค่ากำลังของคลื่น อาร์ เอฟ สามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ ลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ และพบว่าที่กำลังของคลื่น อาร์ เอฟ เท่ากับ 200 วัตต์ ได้ค่า FWHM ของระนาบ (111) น้อยที่สุดคือได้เท่ากับ 0.31428 องศา

4.2.5 ปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ

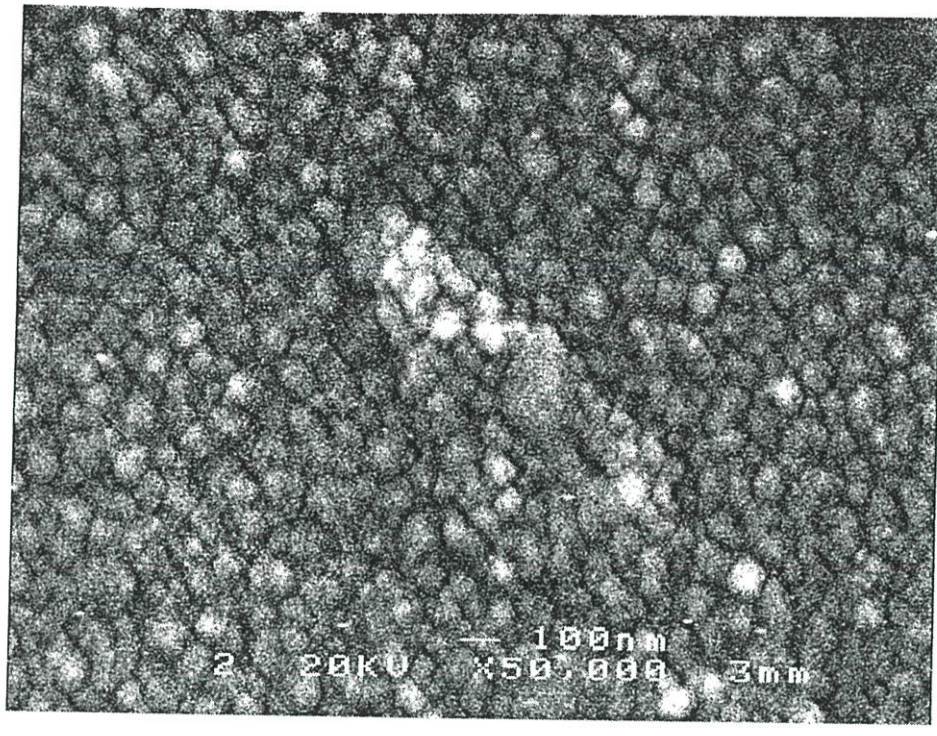


รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนาต่าง ๆ

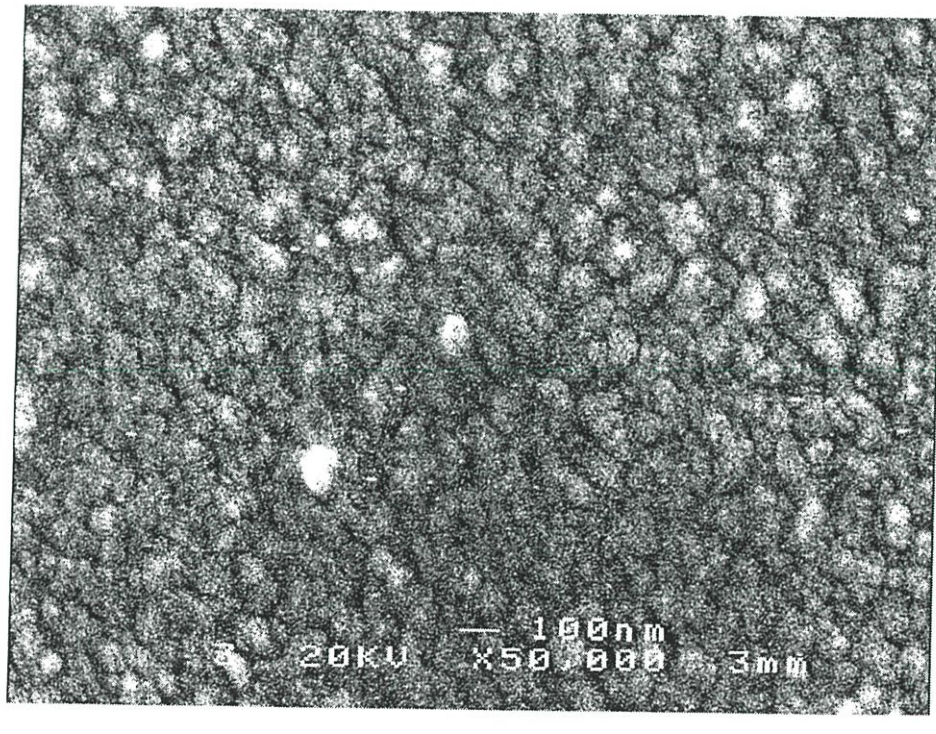
รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ความหนา 90, 100, 200, 500 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางที่ความหนา 500 นาโนเมตร มียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 38.847 องศา และ 45.113 องศา ซึ่งแสดงถึงการจัดเรียงตัวเป็นผลึกในระนาบ (111) และระนาบ (200) มีโครงสร้างผลึกแบบ ลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์ ส่วนฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ความหนา 90, 100, 200 นาโนเมตร ไม่พบยอดของการเลี้ยวเบนซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีโครงสร้างแบบ อสันฐาน



(ก) ความหนาเท่ากับ 500 นาโนเมตร



(ข) ความหนาเท่ากับ 200 นาโนเมตร

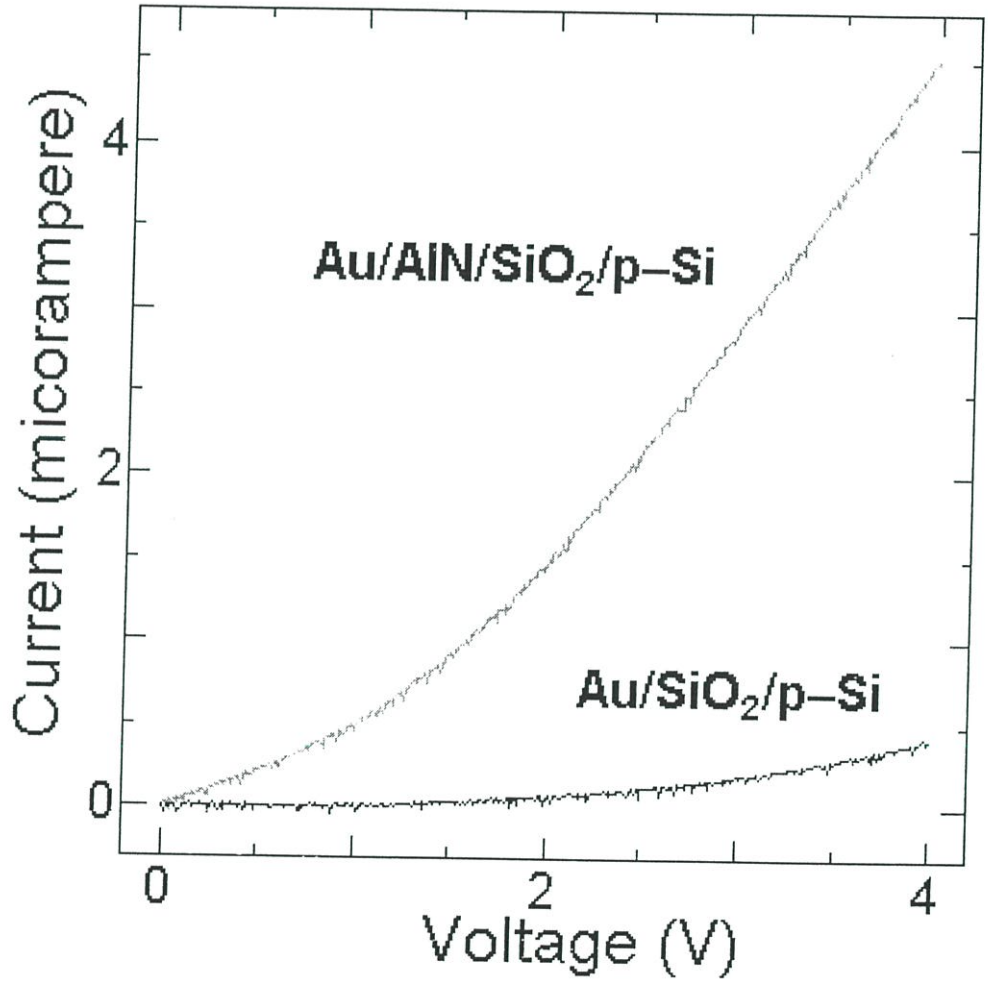


(ค) ความหนาเท่ากับ 100 นาโนเมตร

รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายพื้นผิว SEM ขยาย 50,000 เท่า ของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ปลูกแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาที่ ความหนาต่าง ๆ

4.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ

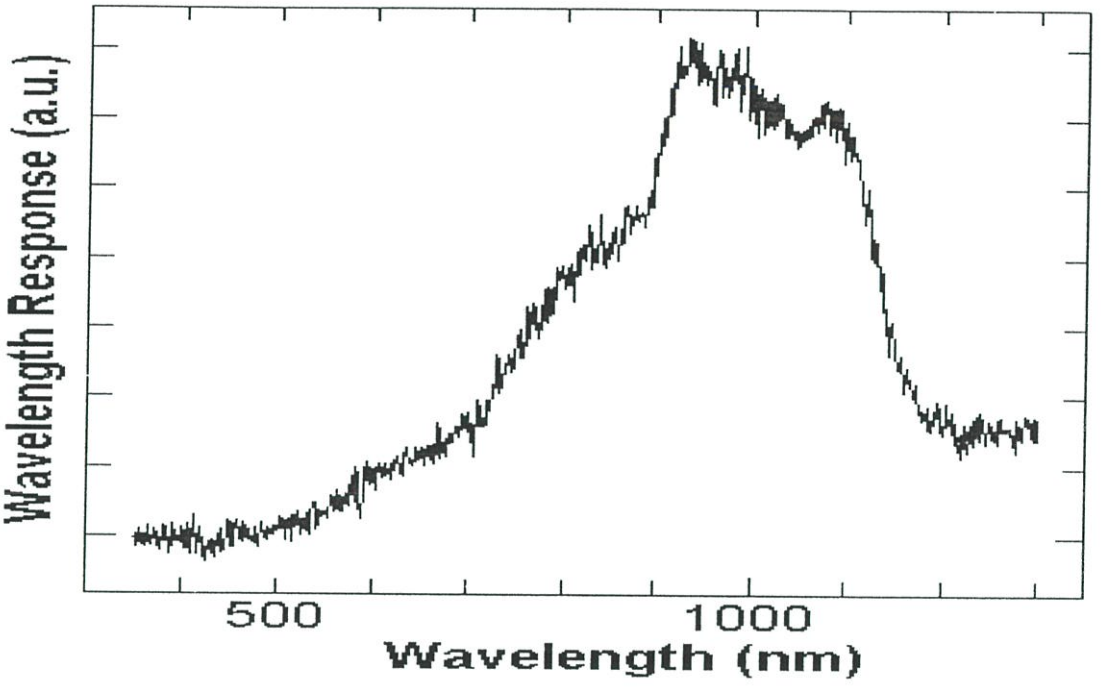
โฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นการนำผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์ แทรกอยู่ระหว่างชั้นโลหะกับชั้นฉนวน เมื่อนำมาตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าคือ หาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เปรียบเทียบโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีชั้นผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์กับโฟโตดีเทคเตอร์ที่ไม่มีชั้นผลึกระดับนาโนอลูมินัมไนไตรด์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้น

จากกราฟรูปที่ 4.15 พบว่าโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นมีรอยต่อแบบชอตต์กีตามที่ต้องการ โฟโตดีเทคเตอร์ที่มีชั้นผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์กระแสที่ได้ในสูงกว่า โฟโตดีเทคเตอร์ที่ไม่มีชั้นผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์ในทุก ๆ ค่าแรงดันไบอัส และค่าแรงดันขีดเริ่มลดลง

จากนั้นนำโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้น ตรวจสอบสมบัติทางแสง โดยทำการวัดวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.16

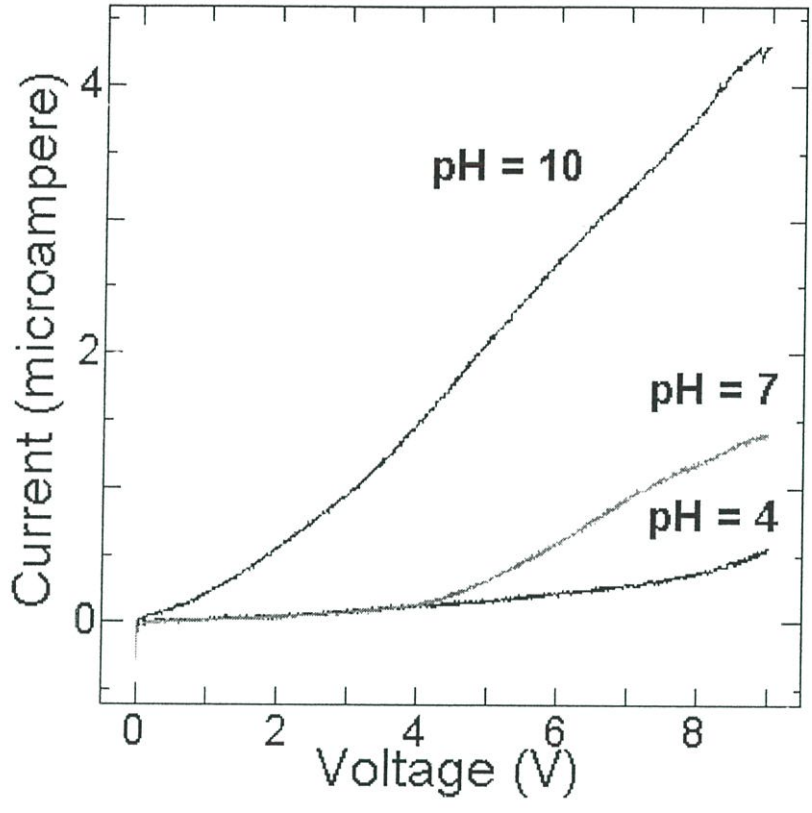


รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของโฟโตดีเทคเตอร์

จากการวัดวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของโฟโตดีเทคเตอร์ พบว่า สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วง 800-1200 นาโนเมตร

เมื่อทดลองใช้แสงจากเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 980 นาโนเมตร กำลัง 12 มิลลิวัตต์ ส่องไปยังโฟโตดีเทคเตอร์ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันวงจรเปิด (Open curcuit voitage: V_{OC}) ที่ตกคร่อมตัวโฟโตดีเทคเตอร์ พบว่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวโฟโตดีเทคเตอร์ช่วงไม่ได้รับแสงมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ และแรงดันที่ตกคร่อมตัวโฟโตดีเทคเตอร์ช่วงได้รับแสงจากเลเซอร์ไดโอดเพิ่มขึ้นเป็น 100 มิลลิโวลต์ (mV)

4.4 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดค่า pH โครงอิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของสารละลายที่มีค่า pH ต่าง ๆ

เมื่อเปลี่ยนอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่า pH เป็นค่าต่าง ๆ แล้วทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน พบว่าที่แรงดันไบอัสตั้งแต่ 5 โวลต์ขึ้นไป กระแสที่วัดได้มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า pH ของอิเล็กโทรไลต์สูงขึ้น

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการรายงานผลการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบปลูกผลึกแบบจัดเรียงอะตอมสามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ให้มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล มีค่าคงที่แลตทิซ a อยู่ในช่วง 3.110 - 3.113 อังสตรอม และค่าคงที่แลตทิซ c อยู่ในช่วง 4.978 – 4.982 อังสตรอม วัดค่าแถบพลังงานต้องห้ามได้ 6.2 eV แต่ต้องให้อุณหภูมิสูงๆ แก่ฐานรองรับในขณะปลูก [1]

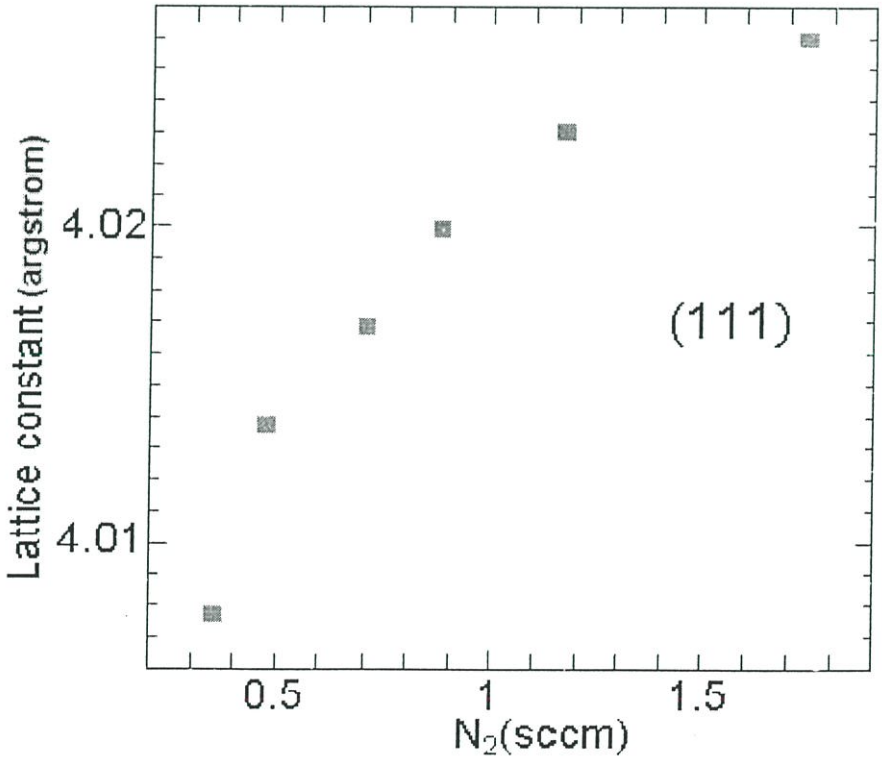
จากรายงานของ Zhong-Min Ren และคณะสามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ด้วยวิธี Nitrogen Ion Bombardment จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางพบการจัดเรียงตัวผลึกแบบลูกบาศก์แบบซิงค์เบลนด์ก็ในระนาบ (111) และระนาบ (200) ค่าคงที่แลตทิซเท่ากับ 4.38 อังสตรอม Morkok รายงานผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนส์ของฟิล์มบาง AlN โครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์แบบซิงค์เบลนด์ พบยอดสเปกตรัมการลูมิเนสเซนส์ที่ 320 นาโนเมตรดังรูปกราฟที่ 2.1 [1],[7]

ในการปลูกฟิล์มบางแบบไม่ควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 นั้น กาซอาร์กอนและกาซไนโตรเจน ถูกป้อนเข้าสู่ระบบพร้อมกัน เมื่อถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า อาร์กอนไอออนซึ่งมีมวลมากจะทำหน้าที่เป็นอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบอลูมินัม เพื่อให้อะตอมของอลูมินัมหลุดออกมา ส่วนไนโตรเจนไอออนซึ่งมีมวลน้อยจะทำหน้าที่เข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของอลูมินัม เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบอลูมินัมไนไตรด์ แต่เนื่องจากวิธีนี้ทั้งอาร์กอนไอออนและไนโตรเจนไอออนในระบบมีโอกาสที่จะชนกันเองสูง ดังนั้นโอกาสที่ไนโตรเจนไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของอลูมินัมที่หลุดออกมาจึงน้อยลง และอาจสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนกันเองนี้ ทำให้พลังงานที่เหลือมีไม่มากพอที่จะแทรกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมอลูมินัมเพื่อให้เกิดฟิล์มบางสารประกอบอลูมินัมไนไตรด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์เฟซเซ็นเตอร์ได้ จากการทดลองปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์แบบไม่ควบคุมเวลา อัตราการปลูกฟิล์มที่ได้มีค่าต่ำมากคือ 4 อังสตรอมต่อวินาที และเมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ไม่พบยอดการเลี้ยวเบน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ได้ไม่มีความเป็นผลึก

สำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ด้วยเทคนิคการควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา ในหัวข้อที่ 4.2.1 นั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ขั้นแรกป้อนกาซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ ทำให้แตกตัวเป็นไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบอลูมินัมเป็นเวลา 60 วินาทีตามที่กำหนดไว้ อะตอมของอลูมินัมจะถูกชนหลุดออกมาในปริมาณหนึ่ง ขั้นต่อมาหยุดป้อนกาซอาร์กอน ทำการป้อนกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ ในช่วงนี้เมื่อไนโตรเจนแตกตัวเป็นไอออนจะถูกสนามไฟฟ้าเร่งจนมีพลังงานสูงพอที่จะแทรกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมอลูมินัมที่หลุดออกมาจากเป้าสารเคลือบ เกิดเป็นฟิล์มบางสารประกอบอลูมินัมไนไตรด์ ขึ้นไปเกาะบนฐานรองรับ ด้วยเทคนิคควบคุมเวลากาซไว

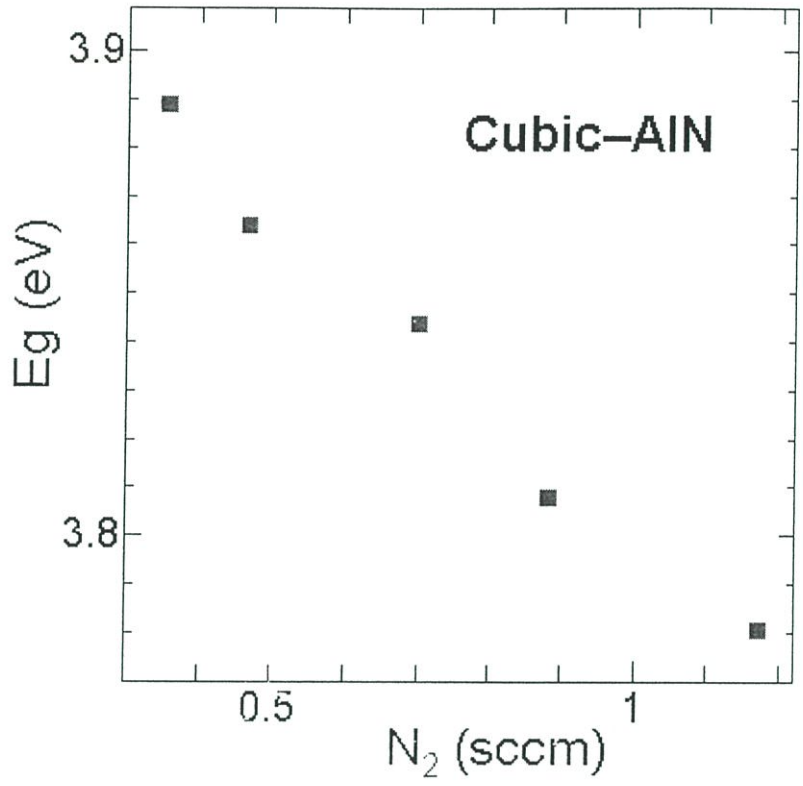
ปฏิกิริยานี้ เมื่อหยุดปล่อยกาซอาร์กอน ทำให้ไนโตรเจนไอออนมีพลังงานงานสูงและมีโอกาสเข้าทำปฏิริยากับอะตอมอลูมินัมได้มากขึ้น ดังนั้นอัตราการปลูกฟิล์มบางในช่วงนี้จึงมีค่าสูงถึง 13 อังสตรอมต่อวินาที และเมื่อนำฟิล์มที่ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบยอดการเลี้ยวเบนในระนาบ (111) และ (200) อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้ด้วยวิธีนี้มีความเป็นผลึกสูง และมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เมื่อนำค่า FWHM จากรูปแบบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มาคำนวณเพื่อหาขนาดของเม็ดผลึก ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าขนาดของเม็ดผลึกที่คำนวณได้อยู่ในระดับนาโนเมตร และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มด้วยกล้อง SEM ขยายที่ 50,000 เท่า พบว่าเม็ดผลึกที่ปลูกได้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งโดยทั่วไปมักจะพบเม็ดผลึกมีขนาดอยู่ในระดับไมครอน เป็นการยากมากที่จะเกิดการจัดตัวเป็นผลึกอยู่ในระดับนาโนเมตร

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามุมยอดของการเลี้ยวเบนมีการเลื่อนไปทางมุมที่น้อยลง ในขณะที่อัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่แลตทิซที่คำนวณได้คือค่าคงที่แลตทิซในผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซกับอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนแสดงดังในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนกับค่าคงที่แลตทิซในระนาบ (111)

เมื่อนำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกได้มาทำการตรวจสอบหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามด้วยระบบโฟโตรีเฟลกแทนซ์พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน แถบพลังงานต้องห้ามมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนแสดงดังในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์กับอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ

สำหรับการทดลองการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นอาร์ เอฟ ที่ใช้ในการสปัตเตอริง ดังในหัวข้อ 4.2.3 นั้นพบว่าที่เงื่อนไขอัตราการปล่อยกาซอาร์กอน 7 sccm เป็นเวลา 60 วินาที และอัตราการปล่อยการไนโตรเจน 0.47 sccm เป็นเวลา 30 วินาที กำลังของคลื่น อาร์ เอฟ ที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มคือที่กำลัง 200 วัตต์ สามารถอธิบายได้ว่า ในการปลูกฟิล์มให้ได้โครงสร้างผลึกที่ดี จุดสำคัญคือไนโตรเจนไอออนต้องมีพลังงานจลน์สูงพอค่าหนึ่งถึงจะสามารแทรกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมอลูมินัมได้ดี ดังนั้นถึงแม้จะให้พลังงานจลน์กับไนโตรเจนไอออนมากขึ้นโดยการเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าก็ตาม ไนโตรเจนไอออนที่มีพลังงานสูงเกินไปก็ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมอลูมินัมได้ จากผลของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าฟิล์มบางที่ปลูกโดยใช้กำลังของคลื่น อาร์ เอฟ ที่ 300 วัตต์ มียอดการเลี้ยวเบนต่ำกว่าฟิล์มที่ปลูกด้วยกำลังของคลื่น อาร์ เอฟเท่ากับ 200 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

ในการทดลองปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ความหนาต่างๆ ดังในหัวข้อ 4.2.4 พบว่าฟิล์มบางที่ความหนาต่ำกว่า 200 นาโนเมตร เมื่อนำไปตรวจโครงสร้างผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเป็นอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.10 แถบพลังงานต้องห้ามของอลูมินัมไนไตรด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนลง และจากขนาดของเม็ดผลึกในระดับนาโนเมตรที่คำนวณได้จาก FWHM ของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และจากภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์ม พบว่าขนาดของเม็ดผลึกเล็กลงเมื่อลดอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจนลง หมายความว่า ขนาดของผลึกอลูมินัมไนไตรด์ซึ่งอยู่ในระดับนาโนเมตรยิ่งลดลงทำให้แถบพลังงานต้องห้ามยิ่งเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดจากผลกระทบที่เรียกว่า ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ (Quantum confinement effect) [8] จากผลการทดลองฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ที่ปลูกได้มีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเป็นไปตามผลกระทบดังกล่าว คือเมื่อขนาดผลึกเล็กลงทำให้แถบพลังงานต้องห้ามมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า บลูชิพท์ (Blue-shift) ซึ่งความสัมพันธ์ของขนาดเม็ดผลึกกับค่าของแถบพลังงานต้องห้าม เป็นตามสมการ [9].

$$E_{g,nanocrystal} = E_{g,bluk} + \Delta E_g = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2MR^2_{nanocrystal}}$$

จากหัวข้อ 4.3 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของโฟโตดีเทคเตอร์ สาเหตุที่ทำให้กระแสของโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีชั้นผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์มีกระแสสูงกว่า โฟโตดีเทคเตอร์ที่ไม่มีชั้นผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์ดังผลการทดลองในรูปที่ 4.15 เนื่องจากอลูมินัมไนไตรด์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ ชนิด N จึงมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงอยู่แล้ว เมื่อได้รับแรงดันไบอัสจนเกิดปรากฏการณ์การทะลุผ่าน (Tunneling effect) ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากทางด้านสารกึ่งตัวนำอลูมินัมไนไตรด์ทะลุผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำซิลิกอนไปยังขั้งไฟฟ้า เช่นเดียวกันโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากทางด้านสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ก็สามารถทะลุผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำอลูมินัมไนไตรด์ไปยังขั้วไฟฟ้าอีกด้าน ทำให้กระแสที่ได้สูงขึ้นมากจากกรณีที่ไม่มีชั้นสารกึ่งตัวนำอลูมินัมไนไตรด์

จากหัวข้อ 4.4 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของหัววัดค่า pH โครงอิเล็กโทรไลต์-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำในรูปที่ 4.17 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อผิวสัมผัสของอลูมินัมไนไตรด์สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะเป็นกลาง (pH = 7) ระดับเฟอร์มิจะพินอยู่ที่ผิวสัมผัสมีค่า ๆ หนึ่ง

ผิวสัมผัสของอลูมินัมไนไตรด์สัมผัสกับกรด (pH < 7) ซึ่งมีไอออนของไฮโดรเจนอยู่มาก (ประจุบวก) ทำให้สนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส และ ระดับเฟอร์มิที่ผิวสัมผัสลดต่ำลงจากตำแหน่งที่พินอยู่ในสารละลายที่เป็นกลาง ทำให้เกิดกระแสไหลน้อยลง

ในกรณีที่ผิวสัมผัสของอลูมินัมไนไตรด์สัมผัสกับเบส (pH > 7) ซึ่งมีไฮดรอกไซด์ไอออนอยู่มาก (ประจุลบ) ทำให้สนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสและระดับเฟอร์มิที่ผิวสัมผัสสูงขึ้นจากตำแหน่งที่พินอยู่ในสารละลายที่เป็นกลาง ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านได้มากขึ้นกว่าเดิม

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ด้วยเทคนิคการปลูกฟิล์มบางแบบควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยาด้วยระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง พบว่าสามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ได้ง่ายโดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมยอดของการเลี้ยวเบนในระนาบ (111) อยู่ในช่วง 38.75-38.91 องศาและ มุมยอดของการเลี้ยวเบนในระนาบ (200) อยู่ในช่วง 45.02-45.17 องศา ขนาดเม็ดผลึกที่ปลูกได้อยู่ในระดับนาโนเมตร ค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่วัดได้อยู่ในช่วง 3.780-3.889 eV

สามารถปลูกฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ได้คุณภาพสูงสุดโดยใช้เงื่อนไขที่อัตราการปล่อยกาซอาร์กอน 7 sccm เป็นเวลา 60 วินาที และอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน 0.47 sccm เป็นเวลา 30 วินาทีที่กำลังของคลื่นอาร์เอฟเท่ากับ 200 วัตต์ พบว่าเมื่อลดอัตราการปล่อยกาซไนโตรเจน ขนาดของเม็ดผลึกจะลดลง ทำให้แถบพลังงานต้องห้ามมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดปรากฏการณ์บลูชิพท์ ซึ่งเป็นผลกระทบจากปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนท์

ตัวอย่างในการนำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์คุณภาพสูงมาประยุกต์ใช้งานคือ

- นำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ประดิษฐ์เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วง 800-1200 นาโนเมตร ให้แรงดันวงจรเปิดสูง (ในระดับ 100 มิลลิโวลต์) โดยไม่ต้องต่อวงจรขยายเพิ่ม
- นำฟิล์มบางอลูมินัมไนไตรด์ประดิษฐ์เป็นหัววัดค่า pH ซึ่งเป็นหัววัดค่า pH ชนิดของแข็ง (Solid-state pH sonser มี) มีข้อได้เปรียบหัววัดค่า pH แบบกระเปราะแก้ว เช่น สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า, สามารถวัดค่า pH ที่ความดันสูงได้, อายุการใช้งานยาวนาน เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

ในขั้นตอนของการทำขั้วและขั้นตอนของการนำชิ้นงานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเข้าบรรจุภัณฑ์ควรระมัดระวังการช็อตด้านข้างของชิ้นงานเป็นอย่างมาก ควรตรวจสอบชิ้นงานด้านข้างอย่างละเอียด และจัดวางไม่ให้ด้านข้างสัมผัสกับตัวถัง

เอกสารอ้างอิง

[1] Hadis Morkoc, "Nitride Semiconductors and Devices" (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1999), p. 23, 17.

[2] Moungi Bawendi, Klavs Jensen, Ray Ashoori and Paul Laibinis, "Electronics of self-assembled nanostructured based on nanocrystallite quantum dots" NSF Partnership in Nanotechnology Conference, Jan. 29 & 30, 2001.

[3] ดุสิต เครืองาม, "**โซลิดสเตทฟิสิกส์**" พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด. 2535., หน้า 296-298.

[4] สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และ พิษณุ เจริญสมศักดิ์, "**การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง**" รายงานการวิจัย, 2529, หน้า 1-31.

[5] ดร.บัญชา ธนบุญสมบัติ, "**การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน**" พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, หน้า 25-26.

[6] Jiti Nukeaw, Yasufumi Fujiwara and Yoshikazu Takeda, "Observation of Electric Fields at Surface and Interface of Doped GaAs/Semi-insulating GaAs Structures by Fast Fourier Transformed Photoreflectance" Jpn. J. Appl. Vol. 36, 1997 pp. 7019-7023.

[7] ZM Ren, YF Lu, YW Goh, and TC Chong, "Deposition of AlN Thin Films with Cubic Crystal Structures on Silicon Substrates at Room Temperature." Jpn. J. Appl. Phys. Vol.39, 2000. Pp. L423-L425.

[8] P. D. Persans, M. Silvestri, G. Mei, E. Lu, H. Yukselici, and J. Schroeder, "Size Effects in II-VI Semiconductor nanocrystals" Braz. J.Phys., 23(2), (1993), 144-150.

[9] J. D. Budai, C. W. White, S. P. Withow, R.A. Zuhr, and J. G. Zhu, Symp, "Advances in Microcrystalline and Nanocrystalline Semiconductors", (1997), 89-98.

ประวัติผู้เขียน

จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2542 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์

1. วิน บรรจงปรุ, นิศาพร พรธีรภัทร และจิติ หนูแก้ว, การปลูกผลึกระดับนาโนเมตรอลูมินัมไนไตรด์โดยควบคุมเวลากาซไวปฏิกิริยา อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอริง, การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28. 24-26 ตุลาคม 2545.
2. N. Kietipaisalsophon, W. Bunjongpru, and J. Nukeaw, Photoreflectance study of AlN thin films grown by reactive gas-timing rf magnetron sputtering, International Journal of Modern Physics B, Vol. 16, Nos. 28 & 29 (2002).
3. N. Kietipaisalsophon, W. Bunjongpru, and J. Nukeaw, Structure properties of cubic-AlN grown by reactive gas-timing rf magnetron sputtering, 2002 IEEE international conferrence on industrial technology processdings, 11-14 december 2002.