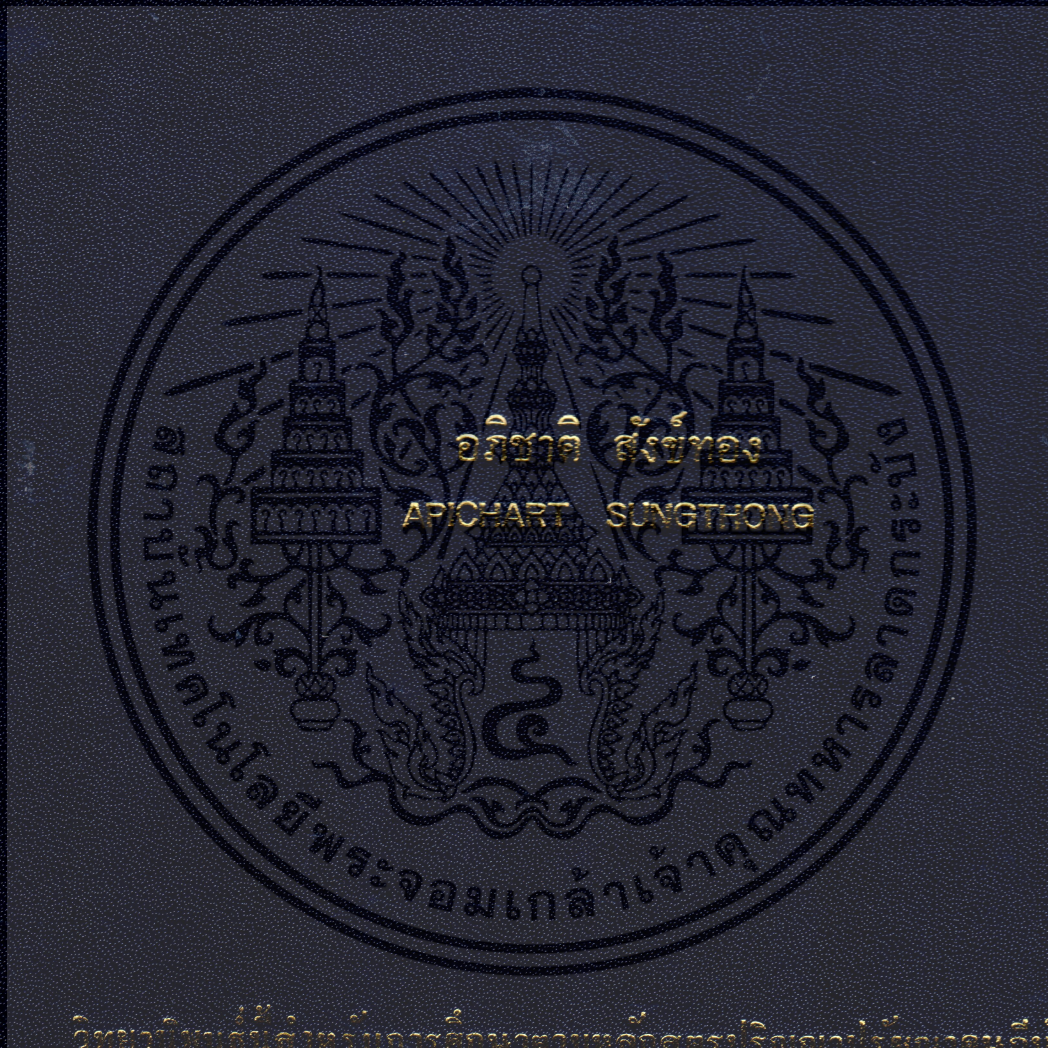


การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในโครด์โดยระบบ  
อาร์เอฟแมกเนตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซในปฏิกิริยา

GROWTH OF INDIUM OXYNITRIDE NANOCRYSTAL THIN FILMS BY  
REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING



วิทยานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อขอรับการศึกษาด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมประยุกต์ปริญญาโทชั้นปริญญาโทชั้นบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-D-030-030

**การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรดโดยระบบ**

**อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา**

**GROWTH OF INDIUM OXYNITRIDE NANOCRYSTAL THIN FILMS BY  
REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING**



T117083



อภิชาติ สังข์ทอง

APICHART SUNGTHONG

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....117083-  
วันเดือนปี.....23 ส.ค. 2554

b.....12332719  
i.....

**วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต**

**สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์**

**คณะวิทยาศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ. 2553**

**KMITL-2010-SC-D-030-039**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**GROWTH OF INDIUM OXYNITRIDE NANOCRYSTAL THIN FILMS BY  
REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING**



**APICHART SUNGTHONG**

**A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KMITL-2010-SC-D-030-039**



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิทยาศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรดไคโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คโตริงด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา  
**GROWTH OF INDIUM OXYNITRIDE NANOCRYSTAL THIN FILMS BY REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING**

**นักศึกษา** นายอภิชาติ สังข์ทอง  
**รหัสประจำตัว** 49067001  
**ปริญญา** ปรัชญาคุณวุฒิบัณฑิต  
**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์  
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว  
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม** ดร.อัมพร โพธิ์ไธ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วราวุฒิ	เดลินัดดา	
ดร.ปิติพร	ณอมงาม	
ผศ.ดร.รัชภาลัย	จิตต์อารี	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไธ	
รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	

**KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 3 กันยายน พ.ศ. 2553 เวลา 9.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง



**คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว**  
**(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณฉวี ฐณะบริพัตร)**  
**คณบดีคณะวิทยาศาสตร์**

วันที่... 26 ...เดือน... พ.ศ. 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นชอบเรียบร้อยแล้ว  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา

นักศึกษา

นายอภิชาติ สังข์ทอง

รหัสนักศึกษา

49067001

ปริญญา

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2553

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.อัมพร โพธิ์ไย

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการปลูกผลึกนาโนของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิคใหม่เรียกว่าวิธควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา ใช้เป่าสารเคลือบเป็นอินเดียม ทำการควบคุมก๊าซในระบบซึ่งได้แก่ ก๊าซอาร์กอน ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยการกำหนดเงื่อนไขอัตราการไหลของก๊าซและลำดับเวลาในการปล่อยก๊าซเข้าระบบ ศึกษาผลของกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการปลูกและชนิดของฐานรองรับ ซึ่งจากเงื่อนไขต่างๆ ได้วัสดุที่มีสมบัติใหม่ออกมา ทำการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ศึกษาสมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ศึกษาโครงสร้างพันธะโดยวิธีรามานสเปกโตรสโคปี ศึกษาองค์ประกอบธาตุโดยเทคนิคออกเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี ศึกษารูปแบบของโครงสร้างอะตอมโดยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีย่านยูวี-วิสลิเบิล ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยเทคนิค four point probe และระบบการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ ผลจากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าอินเดียมไนไตรด์มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลซึ่งจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ (004) สำหรับอินเดียมออกไซด์มีโครงสร้างแบบคิวบิก องค์ประกอบในฟิล์มบางเปลี่ยนแปลงตามอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนและใน ไตรเจน โดยปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อใน ไตรเจนที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการขยายกว้างและการเลื่อนของพีคการเลี้ยวเบน อธิบายได้จากผลของ X-ray Absorption Near Edge Structure ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการอยู่ร่วมกันของ InN ที่มีโครงสร้างแบบ fourfold และ  $\text{In}_2\text{O}_3$  ที่มีโครงสร้างแบบ sixfold ในผลึกนาโนที่ปลูกโดยไม่มีการแทนที่ซึ่งกันและกันระหว่างอะตอมออกซิเจนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	GROWTH OF INDIUM OXYNITRIDE NANOCRYSTAL THIN FILMS BY REACTIVE GAS-TIMING RF MAGNETRON SPUTTERING
<b>Student</b>	Mr. Apichart Sungthong
<b>Student ID.</b>	49067001
<b>Degree</b>	Doctor of Philosophy
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Dr.Jiti Nukeaw
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Dr.Amporn Poyai

### ABSTRACT

This dissertation is aimed to investigate nanocrystal indium oxynitride (InON) thin films grown by rf magnetron sputtering with an innovative technique called “reactive gas-timing”. InON thin films have been found to exhibit novel optical and electrical properties. The X-ray Diffraction (XRD) was applied to characterize the crystalline structure of the InON thin films. The XRD results showed that the deposited films changed from InN to InN+In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and to In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> when the timing ratio of oxygen to argon was increased. The XRD patterns revealed the hexagonal structure of InN thin films from the (002) and (004) planes, and the cubic structure of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films from the (222) and (440) planes. Auger Electron Spectroscopy (AES) was further applied to study the elemental composition and confirmed that the oxygen content in the films increased with the O/N timing ratio. The atomic structure of the InON films was probed by the X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) analysis, which suggested the co-existence of the four-fold InN-like and the six-fold In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-like structures in the InON films, rather than the substitution of N by O or *vice versa* in the InN or In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystal structure. The surface morphology of the InON films investigated by atomic force microscope showed that the grain size of all the thin films deposited at various gas-timing ratio of O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> is in order of tens of nanometers. Their chemical structure and their optical properties were further investigated by Raman spectroscopy and Optical Absorption Spectroscopy, respectively. Raman spectra of the InON films indicated the variation of the Raman shifts with different oxygen and nitrogen timing ratio. The numerical fitting method was employed to obtain the optical band gap of the films from the optical transmittance results. The increase of the oxygen content in the films was found to induce

extreme changes both in the crystal structures from InN to InON and to In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and in the optical band gap, which varied from 1.4 to 3.4 eV, respectively. This large variation of the optical band gap was applied to fabricate multilayer thin films, of which the optical and electrical properties have been customized by adjusting the N and O compositions in each layer. Such method should be highly beneficial to optical filter and optoelectronic device fabrication.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การได้มาซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดเริ่มต้นจากแนวคิดใหม่ๆ จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จิตี หนูแก้ว ผู้ที่ได้วางกรอบแนวคิดงานวิจัย พร้อมแนวทางการนำความรู้ทางด้านทฤษฎี และทางปฏิบัติมาแก้ปัญหาต่างๆ ในงานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.อัมพร โพธิ์ไธ ที่ได้เปิดโอกาสในการทำวิจัย ร่วมกับนักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ในศูนย์ฯ สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา ผศ.ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี และ ดร. ปิติพร ถนอมงาม กรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ที่ให้คำชี้แนะและการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จได้ด้วย ความเรียบร้อย

ขอขอบคุณ ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร(พี่หน่อง) ผู้เปรียบเสมือนอาจารย์ ผู้ร่วมทุกข์ร่วมสุขจากจุดเริ่มต้นของการรวมกลุ่มเป็นครอบครัวนักวิจัย ผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์และวารสารต่างๆ ของผู้วิจัย

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในระดับปริญญาเอก

ขอขอบคุณ นักวิจัยทุกท่านของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลืองานวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์แหล่งเรียนรู้และทำวิจัยอย่างเป็นระบบ

ขอบคุณ สมาชิกของห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง(QOSLab) สมาชิกของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่ดีที่สุดแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่าน เพราะท่านคือส่วนหนึ่งในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อภิชาติ สังข์ทอง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	III
กิตติกรรมประกาศ .....	IV
สารบัญ .....	V
สารบัญตาราง .....	IX
สารบัญรูป .....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมไนไตรด์.....	4
2.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมไนไตรด์.....	6
2.2.1 โครงสร้างผลึกของอินเดียมไนไตรด์.....	6
2.2.2 สมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอินเดียมไนไตรด์.....	7
2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมไนไตรด์.....	8
2.2.4 สมบัติทางแสงของอินเดียมไนไตรด์.....	8
2.3 สมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์.....	9
2.3.1 กฎของออกซิเจน.....	9
2.3.2 อัดลอยด์ $\text{InN-In}_2\text{O}_3$ .....	10
2.3.3 โครงสร้างผลึกของโลหะออกไซด์ไนไตรด์.....	11
2.4 ปรากฏการณ์เบอร์สไตน์-มอสส์.....	13
2.5 ระบบสปีดเตอริง.....	14
2.5.1 กระบวนการสปีดเตอริง.....	14
2.5.2 อัตราการสปีดเตอริง.....	15
2.5.3 กระบวนการ โกรวดิซซาร์จ.....	16
2.5.4 RF Sputtering.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.5 Magnetrons.....	20
2.5.6 Reactive Sputtering.....	21
2.6 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงด้วยเทคนิคควบคุมก๊าซไวปฏิกิริยา.....	22
2.6.1 Magnetron Sputtering.....	22
2.6.2 Reactive RF Sputtering.....	23
2.6.3 Gas-Timing Method.....	24
2.7 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง.....	26
2.7.1 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	26
2.7.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	30
2.7.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	33
2.7.4 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดการทะลุผ่านของแสง.....	37
2.7.5 ออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี.....	39
2.7.6 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี.....	42
2.7.7 การวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์.....	46
2.7.8 การวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น.....	49
2.7.9 ปრაกฏการณ์ของฮอลล์.....	52
2.7.10 การหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ โดยวิธีการวัดค่าความจุที่ขึ้นกับแรงดัน.....	56
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	61
3.1 การเตรียมระบบปลูกฟิล์มบาง.....	61
3.1.1 ห้องสุญญากาศ.....	61
3.1.2 ระบบสุญญากาศ.....	62
3.1.3 ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ.....	64
3.1.4 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง.....	65
3.2 การเตรียมฐานรองรับ.....	65

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การปลูกฟิล์มบางอินเดียม.....	67
3.4 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมในไตรด์ อินเดียมออกไซด์ และอินเดียมออกซีไนไตรด์.....	68
3.4.1 การปลูกฟิล์มบางอินเดียมในไตรด์.....	68
3.4.2 การปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์.....	69
3.4.3 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกซีไนไตรด์โดยการควบคุม เวลาที่เข้าไปปฏิกิริยา.....	69
3.4.4 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกซีไนไตรด์ด้วยกำลัง ของคลื่นวิทยุต่างกัน.....	70
3.4.5 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกซีไนไตรด์บนฐานรองรับ ที่ต่างกัน.....	71
3.5 การศึกษาสมบัติทาง โครงสร้างของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียม อินเดียมในไตรด์ อินเดียมออกไซด์ และอินเดียมออกซีไนไตรด์.....	72
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	79
4.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียม.....	79
4.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียมในไตรด์.....	80
4.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์.....	82
4.3.1 ฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราเวลา การปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน.....	82
4.3.2 ฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงกำลัง ของคลื่นวิทยุ.....	94
4.3.3 ฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลง ชนิดของฐานรองรับ.....	97
4.4 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์ โครงสร้างแบบหลายชั้น.....	99
4.4.1 โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบประกบ ด้วยชั้นแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง.....	99
4.4.2 ฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์ โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มี ชั้นแถบพลังงานแคบจำนวน 2 ชั้น.....	101

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น.....	102
4.6 สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนไตรด์จากการวัดการตอบสนองต่อแสง.....	108
4.7 การประยุกต์ใช้งานอินเดียมออกซีไนไตรด์.....	110
4.7.1 การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแสง.....	110
4.7.2 การประยุกต์ใช้งานด้านการปรับปรุงพื้นผิว.....	113
4.7.3 การประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง.....	115
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	117
บรรณานุกรม.....	120
วารสารที่ได้ตีพิมพ์.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	125



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของ GaN และ InN โครงสร้าง wurtzite.....	5
2.2 โครงสร้างแบบ Wurtzite และ Zincblende ของวัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมไนไตรด์.....	7
2.3 พลังงานยึดเริ่มของเป่าสารเคลือบเมื่อถูกชนด้วยก๊าซเฉื่อยในหน่วย eV.....	16
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มอินเดียม.....	68
3.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อย ก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนต่างกัน.....	68
3.3 พารามิเตอร์ในการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ โดยการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา.....	69
3.4 พารามิเตอร์ในการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ ด้วยกำลังคลื่นวิทยุต่างกัน.....	70
3.5 พารามิเตอร์ในการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์บนฐาน รองรับต่างกัน.....	71
4.1 ค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ ที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน.....	88
4.2 องค์ประกอบของฟิล์มบางที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจน ต่อไนโตรเจนต่างกัน.....	89
4.3 ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ ที่ปลูกโดยเงื่อนไขอัตราเวลาปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน.....	92
4.4 องค์ประกอบของฟิล์มบางที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นวิทยุ.....	96
4.5 ขนาดของเม็ดผลึกที่คำนวณจาก XRD ของฟิล์มบางผลึกนาโน อินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ที่มีฐานรองรับต่างกัน.....	98

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (a) โครงสร้างแลตทิซของ InN (b) ภาพ SEM ของเกรนผลึก InN โครงสร้างเฮกซะโกนอล.....	4
2.2 สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงและแถบพลังงานของ InN เมื่อเทียบกับ GaN.....	6
2.3 ไลอะแกรมของวิการ์ด์ของ InN-In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alloy system.....	9
2.4 โครงสร้างผลึกของแทนทาลัมออกไซด์ในไตรด์.....	12
2.5 แถบความนำของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกเจือมาๆทำให้ขอบการดูดกลืนปรากฏที่ พลังงาน $E_F - E_V$ ซึ่งมีค่ามากกว่าแถบพลังงานต้องห้าม (band gab) $E_C - E_V$ .....	13
2.6 อันตรกิริยาระหว่างเป่าสารเคลือบกับไอออน.....	14
2.7 กระแสที่เกิดจากการ ไบแอส โดยศักย์ของพลาสมา.....	18
2.8 พื้นฐานของระบบสปีดเตอร์ริงแบบ planar r.f diode.....	19
2.9 การเกิดศักย์บนเป่าสารเคลือบที่สัมพันธ์กับศักย์โฟลตติง.....	19
2.10 โครงสร้างและการทำงานของแม่เหล็กแบบพลาสมา.....	20
2.11 รูปแบบการไหลของพลาสมาจากเป่าสารเคลือบไปยังฐานรองรับ ในระบบแม่เหล็กแบบไม่สมดุล.....	21
2.12 สัมประสิทธิ์ของการพุ่งชนเป่าสารเคลือบในบรรยากาศของไนโตรเจน ในระหว่างการปลูกไททาเนียม.....	22
2.13 หลักการทำงานของ dc planar magnetron sputtering.....	23
2.14 การเกิดฮีตเทอรีซีระหว่างศักย์บนเป่าสารเคลือบกับอัตราการไหลของออกซิเจน.....	24
2.15 การวางตำแหน่งอุปกรณ์ในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง.....	24
2.16 ไลอะแกรมในกระบวนการสปีดเตอร์ริงด้วยเทคนิคการควบคุมก๊าซไวปฏิกิริยา.....	25
2.17 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	26
2.18 เครื่อง X-ray diffractometer.....	27
2.19 ตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer.....	27
2.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	28
2.21 ค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....	30
2.22 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....	33
2.23 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการ โค้งงอของคาน (Cantilever).....	34

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่าง โมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง.....	34
2.25 ลักษณะการสั้นของคาน.....	35
2.26 ลักษณะการขยายออกของภาพเมื่อปลายเข็มใหญ่กว่าพื้นผิวที่วัด.....	36
2.27 แสดงผลลักษณะมุมตันของเข็มที่มีต่อการวัด.....	36
2.28 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง.....	36
2.29 การเกิดรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว.....	39
2.30 การเกิด Auger spectrum ของทองแดง.....	41
2.31 Auger spectrum ของทองแดง.....	42
2.32 ระดับพลังงานในการเกิดรามานสเปกตรัม.....	45
2.33 เทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์.....	46
2.34 ระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้นอะตอมของฟลาตินัม.....	47
2.35 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของฟลาตินัมที่ระดับพลังงาน $L_{III}$ .....	47
2.36 การแยกสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ.....	48
2.37 ตัวอย่างหัววัดซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่าๆกัน.....	49
2.38 เครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น (Linear 4 point probes).....	49
2.39 รูปแบบการวัดฮอลล์.....	52
2.40 กระแสที่ไหลผ่านเส้นลวด ในทิศพุ่งเข้าเกิดฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตามกฎมือขวา.....	55
2.41 การเกิด space charge ของรอยต่อชนิดพีเอ็น.....	56
2.42 การหาศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อจากกราฟค่าความจุกับแรงดันไบแอส.....	57
3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์จริง.....	61
3.2 ลักษณะการวางอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศ.....	62
3.3 ระบบปั๊มสุญญากาศประกอบด้วยปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจาย.....	63
3.4 เกจวัดความดันในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์จริง.....	64
3.5 ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ซีห้อ EDWARDS.....	64
3.6 เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุขนาด 600 วัตต์ (model CESAR 136).....	65
3.7 ตู้ทำความสะอาดในกระบวนการล้างด้วยกระบวนการ PIRANHA.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การอบแผ่นฐานรองรับในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศา.....	66
3.9 เป้าสารเคลือบอินเดียมสำหรับใช้ในการปลูกฟิล์มบาง.....	67
3.10 ไคอะแกรมการควบคุมเวลาก๊าซไวกซ์ไวกซ์ในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดร์.....	70
3.11 ลักษณะการเกิดพลาสมาในบรรยากาศของก๊าซต่างชนิดกัน.....	72
3.12 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance.....	73
3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของบริษัท Hitachi รุ่น 4700.....	73
3.14 ภาพแสดงกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของบริษัท SEIKO รุ่น SPA400.....	74
3.15 แสดงเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของบริษัท PG Instrument รุ่น T90+.....	74
3.16 ออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี ยี่ห้อ PHI 700.....	75
3.17 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Renishaw ของบริษัท Jobin Yvon.....	75
3.18 ระบบวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ด้วยเทคนิค XANES ของศูนย์วิจัยรังสีโครตรอนแห่งชาติ.....	76
3.19 ไคอะแกรมในการตรวจสอบการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม.....	76
3.20 ระบบการวัดค่าความคล่องตัวของพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์.....	77
3.21 การเตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์.....	77
3.22 ระบบการวัดการตอบสนองต่อแสง.....	78
4.1 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางอินเดียมความหนา 800 นาโนเมตร.....	79
4.2 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมความหนา 800 นาโนเมตร.....	80
4.3 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลง เวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนต่างกัน.....	81
4.4 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลง เวลาการปล่อยก๊าซไนโตรเจนต่างกัน.....	81
4.5 ลักษณะพื้นผิวของอินเดียมไนไตรด์ที่อัตราเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 1:10.....	82
4.6 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางที่ปลูกโดยอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจน ต่อไนโตรเจนต่างกัน.....	83
4.7 โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มบางที่ปลูกโดยเงื่อนไข ก) N <sub>2</sub> -Timing, ข) O <sub>2</sub> -Timing.....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มบางที่ปลูกโดยเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน ก) $O_2:N_2 = 30:30\text{sec}$ , ข) $O_2:N_2 = 10:30\text{sec}$ .....	85
4.9 ฟิล์มบางที่ปลูกโดยอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน.....	86
4.10 ผลการวัดการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซต่างกัน.....	87
4.11 สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงที่ขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาของก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน.....	87
4.12 สเปกตรัมออร์เจอร์ของฟิล์มบางที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน.....	88
4.13 สเปกตรัมรามานของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน.....	90
4.14 แบบจำลองโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ XANES, ก) $In_2O_3$ โครงสร้างแบบ sixfold ข) $InN$ โครงสร้างแบบ fourfold.....	91
4.15 สเปกตรัม XANES ที่ระดับพลังงาน L3-edge ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ ที่เวลาของการปล่อยก๊าซต่างกัน ก) ผลจากการวัด ข) ผลจากการคำนวณ.....	91
4.16 ค่าความเข้มข้นและค่าความคล่องตัวของพาหะของอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน.....	93
4.17 โครงสร้างขั้วโลหะบนรอยต่อชนิดพีเอ็นระหว่างอินเดียมออกไซด์ในไตรด์และซิลิกอน.....	94
4.18 สมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์เงื่อนไขอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน.....	94
4.19 สเปกตรัม XRD ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่เงื่อนไขการปลูกที่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน.....	95
4.20 สเปกตรัม AES ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่เงื่อนไขการปลูกที่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน.....	96
4.21 สเปกตรัมรามานของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่เงื่อนไขการปลูกที่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน.....	97
4.22 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยฐานรองรับต่างกัน.....	98
4.23 โครงสร้างฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์แบบหลายชั้น.....	99
4.24 ภาพ SEM ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น.....	100

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์แบบหลายชั้น.....	101
4.26 อินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบจำนวน 2 ชั้น .....	102
4.27 ภาพ SEM ของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น ที่มีชั้นแถบพลังงานแคบจำนวน 2 ชั้น.....	102
4.28 โครงสร้างขั้วไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์.....	103
4.29 โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น โดยมีแถบพลังงานต้องห้ามแคบประกบด้วยแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง .....	103
4.30 สมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์โครงสร้างหลายชั้น ที่มีความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน.....	104
4.31 สมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์โครงสร้างหลายชั้น ที่มีจำนวนชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน.....	105
4.32 ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หนา 10 nm .....	106
4.33 ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หนา 20 nm .....	106
4.34 ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หนา 40 nm .....	107
4.35 ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบหนา 40 nm จำนวน 2 ชั้น .....	107
4.36 ผลการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์ที่ปลูกโดย การเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน .....	109
4.37 การตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์ ก) timing [O:N=10:30] ข) timing [O:N=30:10] ค) Eg แคบหนา 40nm ง) 20 nm และ จ) 10 nm .....	109
4.38 การตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์ ก) timing [O:N=30:10] ข) timing [O:N=30:10] ค) Eg แคบหนา 40 nm จำนวน 1 ชั้น และ ง) 2 ชั้น .....	110
4.39 ฟิล์มอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์ ก) บนกระจก ข) บนพลาสติก ค)บนเลนส์.....	111
4.40 ร่องรอยคราบออกซิเจน ก) และ ค) ก่อนใช้ ข) และ ง) หลังใช้แว่นตานาโนคริสตอล.....	112

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 การนำแว่นตานาโนคริสตอลมาใช้ทางการแพทย์เพื่อรักษาโรคสะกิดเงิน.....	112
4.42 การนำแว่นตานาโนคริสตอลมาใช้ทางการแพทย์ ก) การอุดฟัน ข) การบำรุงผิวด้วยแสง.....	113
4.43 การนำแว่นตานาโนคริสตอลมาใช้ในทางอุตสาหกรรม.....	113
4.44 การเกิดไฮโดรโฟบิกบนกระจกที่เคลือบอินเดียมออกไซด์ในไตรด์.....	114
4.45 การเกิดไฮโดรโฟบิกบนพลาสติกที่เคลือบอินเดียมออกไซด์ในไตรด์.....	114
4.46 การทดสอบวิธีการ self cleaning ด้วยฟิล์มอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ .....	115
4.47 การประยุกต์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์เป็นอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ .....	115
4.48 การนำกระแสเมื่อมีการฉายแสงของโฟโตดีเทคเตอร์อินเดียมออกไซด์ในไตรด์ โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หนาเท่ากับ ก) 10 nm ข) 40 nm .....	116
4.49 การนำกระแสเมื่อมีการฉายแสงของโฟโตดีเทคเตอร์อินเดียมออกไซด์ในไตรด์ โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีจำนวนของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน .....	116

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สารกึ่งตัวนำตระกูลไนไตรด์ในกลุ่มสาม (III-nitride semiconductor) ที่รู้จักในรูปของสารประกอบโดยทั่วไปได้แก่ อะลูมิเนียมไนไตรด์ แกลเลียมไนไตรด์ อินเดียมไนไตรด์ การเปลี่ยนแปลงสมบัติให้มีความหลากหลายขึ้น โดยการเพิ่มสารบางอย่างลงไปกลายเป็นวัสดุอัลลอยด์ เช่น อินเดียมแกลเลียมไนไตรด์ อะลูมิเนียมแกลเลียมไนไตรด์ ซึ่งมีผลึกแบบโพสิ สารกึ่งตัวนำในกลุ่มสามไนไตรด์ไม่ใช่เป็นสารใหม่ ได้มีการวิจัยตั้งแต่ปี 1960 โดยเริ่มต้นจากสารกึ่งตัวนำแกลเลียมไนไตรด์เพื่อประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไดโอดเปล่งแสงโครงสร้าง MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) ในปี 1990 ได้พัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์มให้มีคุณภาพสูง โดยเฉพาะในปี 1994 ได้มีการพัฒนาแอลอีดีรอยต่อพีเอ็น จากแกลเลียมไนไตรด์ ซึ่งให้ค่าความส่องสว่างมากกว่า 1 แคลเดลา เป็นสิ่งดึงดูดให้หันมาสนใจสารประกอบไนไตรด์ในกลุ่มสามมากขึ้น แม้ว่าที่ผ่านมาการเพิ่มสารบางอย่างลงในวัสดุที่เป็นสารประกอบทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าได้ แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับสารที่นำมาเป็นองค์ประกอบ เทคโนโลยีในการสร้าง รวมทั้งความยุ่งยากในการเตรียมวัสดุดังกล่าว

ต่อมาได้มีการศึกษาผลของออกซิเจนที่เข้าไปอยู่ในวัสดุที่เป็นสารประกอบทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าได้ วัสดุที่อยู่ในกลุ่มสามไนไตรด์โดยเฉพาะวัสดุที่เป็นโลหะไนไตรด์ เมื่ออะตอมออกซิเจนเข้าไปแทนที่อะตอมไนโตรเจนในโครงสร้าง ทำให้วัสดุดังกล่าวเปลี่ยนเป็นโลหะออกซิไนไตรด์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าได้โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไนโตรเจนและออกซิเจนในกระบวนการปลูก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ออฟโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์หรือออปโตคอลลีเตอร์ แต่มีวัสดุโลหะบางชนิดเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าได้ดีและสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นวัสดุใหม่ได้ โดยเฉพาะอินเดียมออกซิไนไตรด์สามารถเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าการทะลุผ่านของแสงตั้งแต่นานยูวีจนถึงย่านใกล้อินฟราเรด จึงนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิลเตอร์ทางแสงได้ดี นอกจากนี้อินเดียมออกซิไนไตรด์สามารถเปลี่ยนแปลง optical band gap ได้ในย่านที่กว้างมาก สามารถเป็นได้ทั้งตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน จึงนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์ออฟโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics Devices)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่เตรียมโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่าเทคนิคควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา ปริมาณของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนที่เข้าไปในระบบการปลูกสารในแต่ช่วงเวลาเป็นตัวกำหนดสมบัติของฟิล์มบาง รวมทั้งศึกษาผลของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม และการเปลี่ยนแปลงฐานรองรับ ศึกษาสมบัติทางพื้นผิว สมบัติโครงสร้างผลึก สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยาในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 2) เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์เมื่อเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง
- 3) เพื่อประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์และนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อื่นๆ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์และอินเดียมออกไซด์ในไตรด์
- 2) ศึกษาทฤษฎีของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 3) ศึกษาระบบตรวจวัดสมบัติของฟิล์มบาง
  - X-ray diffraction spectrometer (XRD)
  - Scanning electron microscope (SEM)
  - Atomic force microscope (AFM)
  - Raman spectroscopy
  - X-ray absorption near edge structure (XANES)
  - UV-VIS measurement (UV-VIS)
  - Electroluminescence Spectroscopy
  - Photocurrent Spectroscopy
  - I-V Measurement
- 4) ปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมไนไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลและเวลาการปล่อยก๊าซไวปฏิกิริยา ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบาง
- 5) ปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซไวปฏิกิริยา ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิว สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) ปลุกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นวิทยุ ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบาง
- 7) ปลุกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบาง ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางแสงของฟิล์มบาง
- 8) ปลุกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงฐานรองรับ ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง
- 9) ปลุกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างหลายชั้น ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผลึก สมบัติทางพื้นผิว สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง
- 10) การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ในอุปกรณ์ทางแสง

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

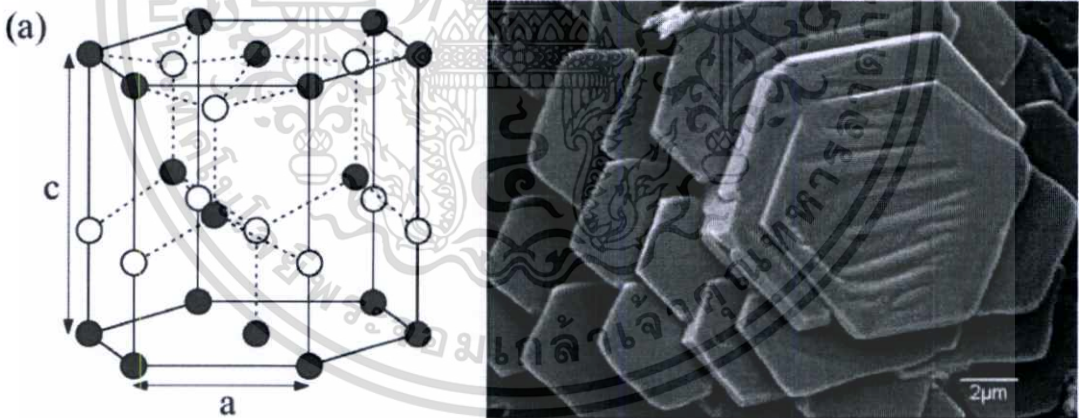
- 1) สามารถปลุกฟิล์มบางด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง
- 2) สามารถปลุกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไอปฏิบัติกริยา
- 3) สามารถรู้และเข้าใจสมบัติของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการปลุก
- 4) สามารถนำสมบัติของฟิล์มที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมไนไตรด์

อินเดียมไนไตรด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ทางแสงซึ่งมีสมบัติคล้ายกับแกเลียมไนไตรด์หลายอย่าง ได้แก่ วัสดุทั้งสองอยู่ในกลุ่ม III-nitride และโครงสร้างผลึกที่เสถียรภาพทางความร้อนเป็นแบบเวอชไซด์ สำหรับโครงสร้างแบบซิงเบรนาบได้จากการปลูกฟิล์มบางบนฐานรองรับซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์ที่เป็นคิวบิกในระนาบ(001) (Mohadmad & Mokoc, 1996) ในรูปที่ 2.1a แสดงโครงสร้างของอินเดียมไนไตรด์แบบเฮกซะโกนอล แต่ละอะตอมของอินเดียมจะล้อมรอบด้วยอะตอมของไนโตรเจนสี่อะตอมค่าคงที่แลตทิซของอินเดียมไนไตรด์และแกเลียมอาร์เซไนด์แสดงในตารางที่ 2.1 ภาพจาก SEM แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างพื้นผิวของอินเดียมไนไตรด์ที่เป็นเฮกซะโกนอลดังรูปที่ 2.1b [1] อินเดียมไนไตรด์มีสภาพเคลื่อนที่ได้และความเร็วของอิเล็กตรอนสูง[2] เนื่องจากมีค่ามวลประสิทธิผลต่ำ[3]



รูปที่ 2.1 (a) โครงสร้างแลตทิซของ InN (b) ภาพ SEM ของเกรนผลึก InN โครงสร้างเฮกซะโกนอล

O'Leary et al. (1998) ได้จำลองรูปแบบมอนติคาร์โลของอินเดียมไนไตรด์ พบว่าที่อุณหภูมิห้องเกิด peak drift velocity เท่ากับ  $4.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$  มากกว่าของแกเลียมไนไตรด์ซึ่งอยู่ที่  $3.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$  ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในอินเดียมไนไตรด์สูงกว่าของแกเลียมไนไตรด์โดยใช้ variational principle method, Chin et al.(1994) ผลจากการคำนวณพบว่า ที่อุณหภูมิห้อง ความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล่องตัวของพาหะของอินเดียมไนไตรด์เท่ากับ  $4400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ส่วนของแกลเลียมไนไตรด์เท่ากับ  $1000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ในขณะที่ผลจากการวัด ค่าความคล่องตัวของพาหะของอินเดียมไนไตรด์อยู่ที่  $2700 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [4] ซึ่งมากกว่าของแกลเลียมไนไตรด์ซึ่งอยู่ที่  $900 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [5] ดังนั้น อินเดียมไนไตรด์ได้รับการคาดหวังที่จะถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ความเร็วสูงและอุปกรณ์ความถี่สูงมากกว่าแกลเลียมไนไตรด์

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับสารในตระกูลไนไตรด์ด้วยกัน พบว่า มีการศึกษาเกี่ยวกับอินเดียมไนไตรด์น้อยมาก เนื่องจากการเตรียมฟิล์มให้มีคุณภาพสูงค่อนข้างยาก ปัญหาฐานรองรับที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดความไม่เข้ากันทางแลทธิซ เช่นระหว่างอินเดียมไนไตรด์กับซัลไฟด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งเป็นฐานรองรับที่ใช้อย่างกว้างขวาง ค่าความไม่เข้ากันของแลทธิซประมาณ 25% ในขณะที่เมื่อเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ที่เป็น AlN หรือ GaN ค่าความไม่เข้ากันของแลทธิซจะลดลงแต่ยังคงมากกว่า 10% ในตาราง 2.1 แสดงสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมไนไตรด์เปรียบเทียบกับแกลเลียมไนไตรด์

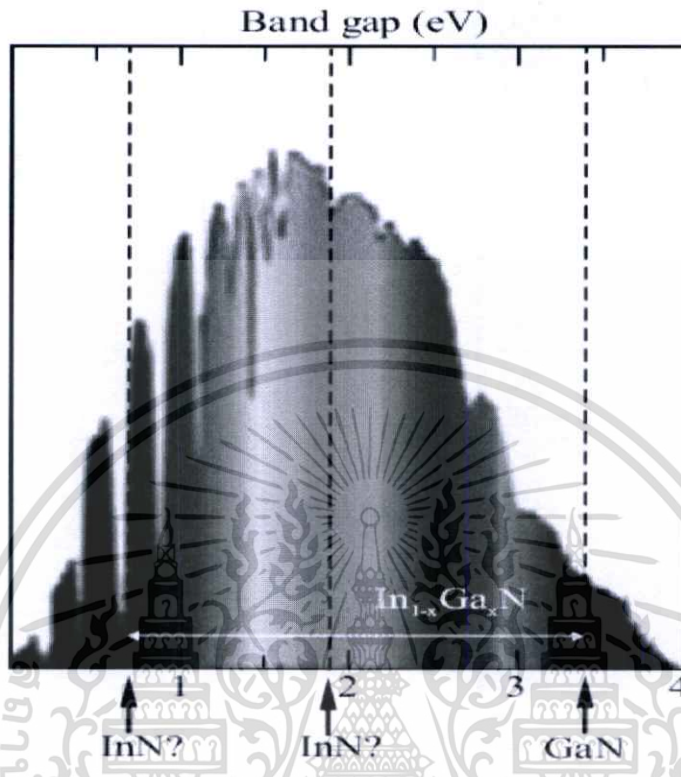
ตาราง 2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของ GaN และ InN โครงสร้าง wurtzite

Parameters	GaN	InN	Unit
Lattice constant, $a_0$	$3.1189^0$	$3.55^0$	$\text{\AA}$
Lattice constant, $c_0$	$5.185^0$	$5.78^0$	$\text{\AA}$
Effective mass	$0.20^0$	$0.11^0$	$M_0$
Mobility			
Theoretical	1000	4400	$\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Experimental	900	2700	$\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Peak drift velocity	3.1	4.3	$10^7 \text{ cms}^{-1}$
Band gap	3.39	1.89	eV

แถบพลังงานของอินเดียมไนไตรด์ที่ได้มีการทดลอง พบว่าอยู่ที่ 1.89 eV [6] ซึ่งเป็นค่าที่ได้รับการยอมรับ วัสดุดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นชั้นด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองรอยต่อ [7] เป็นการรวมกันของ InN (1.98 eV) กับ Si (1.1) ซึ่งได้ค่าประสิทธิภาพมากกว่า 30%

ก่อนหน้านี้ ได้มีรายงานค่าแถบพลังงานของอินเดียมไนไตรด์ที่ต่ำอยู่ราวๆ 0.7-1.0 eV[8-10] ซึ่งเป็นที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นค่าแถบพลังงานค่าใหม่ซึ่งเหมาะสำหรับความยาวคลื่นในใยแก้วนำแสง ถ้าค่าแถบพลังงานอยู่ที่ 0.7 eV สามารถนำอินเดียมไนไตรด์มาประยุกต์ใช้ในเลเซอร์ไดโอด และดีเทคเตอร์ความเร็วสูงในระบบการสื่อสารทางแสง มีการนำเอาผลของแถบพลังงานที่ต่างกัน

ของ InN และ GaN มาสร้างเป็นสารประกอบสามตัวคือ  $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{N}$  หากทำการเปลี่ยนค่า  $x$  จะทำให้สามารถเปลี่ยนค่าแถบพลังงานได้ตลอดย่านของแสงที่ตามองเห็น[8] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงและแถบพลังงานของ InN เมื่อเทียบกับ GaN

## 2.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุสารกึ่งตัวอินเดียมไนไตรด์

### 2.2.1 โครงสร้างผลึกของอินเดียมไนไตรด์

โครงสร้างผลึกของอินเดียมไนไตรด์โดยทั่วไปเป็นเวอชไซด์หรือเฮกซะโกนอล ในกรณีที่เป็นโครงสร้างแบบคิวบิกที่มีรายงานก็พบว่า โครงสร้างเป็นแบบโพลิ เนื่องจากฟิล์มยังคงมีความเป็นผลึกเดี่ยวที่มีคุณภาพดี การตรวจสอบโครงสร้างจึงไม่ใช้วิธีการเดียวกันกับฟิล์มบาง การจัดเรียงตัวของผลึกในฟิล์มจะเกิดในช่วง 50-500 nm จากผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าโครงสร้างทั่วไปเป็นเวอชไซด์ แต่บางครั้งยังมีความเป็นซิงเกิลคริสตัลอยู่ด้วย ในตารางที่ 2.2 เป็นรายละเอียดของค่าคงที่แลตทิซของโครงสร้างทั้งสอง ค่า  $a_0$  และ  $c_0$  ที่สรุปจากการทดลองเช่นเดียวกับสมบัติพื้นฐานอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 โครงสร้างแบบ Wurtzite และ Zincblend ของวัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมไนไตรด์

Wurtzite polytype of InN	
Bandgap energy	$E_g(300\text{ K}) = 1.89\text{ eV}$
Temperature coefficient	$dE_g/dT = -1.80 \times 10^{-4}\text{ eV/K}$
Lattice constant	$a = 3.548\text{ \AA}, c = 5.760\text{ \AA}$
Index of refraction	$n = 2.80-3.05$
Dielectric constant	$\epsilon_r = 15.3, \epsilon_\infty = 8.4$
Zincblende polytype of InN	
Bandgap energy	$E_g(300\text{ K}) = 2.2\text{ eV}; \text{ theory}$
Lattice constant	$a = 4.98\text{ \AA}$

ค่าอัตราส่วนของ  $c/a_0$  จากหลายการทดลองมีค่าประมาณ  $1.615 \pm 0.008$  ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากฟิล์มที่ปลูกภายใต้เงื่อนไขการปลูกที่ดีที่สุด น่าจะเป็นไปได้ที่จะเป็นการลดตำแหน่งว่างของไนโตรเจน (nitrogen vacancy) จากการตรวจสอบข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างกระจายซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ อาจเป็นไปได้เนื่องจากขาดอะตอมไนโตรเจนที่อยู่ในระนาบ 0001 ขณะที่ค่า molecular cell volume ของ cubic polytype เท่ากับ  $30.9\text{ \AA}^3$  และ hexagonal polytype เท่ากับ  $31.2 \pm 0.2\text{ \AA}^3$

### 2.2.2 สมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของอินเดียมไนไตรด์

#### (Mechanical and Thermal Properties of InN)

ค่าความหนาแน่นของอินเดียมไนไตรด์จากการทดลองมีค่าเท่ากับ  $6.89\text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ  $25^\circ\text{C}$  สำหรับการคำนวณจากข้อมูล XRD มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $6.81\text{ g/cm}^3$  ค่ามอดูลัสเท่ากับ  $165\text{ GPa}$  โดยวิธีการ Local-density approximation สำหรับโครงสร้างแบบ hexagonal มี 12 photon mode ที่ zone center ประกอบด้วย 3 acoustic mode และ 9 optical mode นอกจากนี้ infrared active mode ประกอบด้วย  $E_1(\text{LO}), E_1(\text{TO}), A_1(\text{LO})$  และ  $A_1(\text{TO})$  ยิ่งไปกว่านั้น transverse optical mode ปรากฏที่  $478\text{ cm}^{-1}$  ( $59.3\text{ meV}$ ) จากการวัดการสะท้อนกลับ และ  $460\text{ cm}^{-1}$  ( $57.1\text{ meV}$ ) จากการวัดการทะลุผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแบบเชิงเส้นที่อุณหภูมิต่างกัน 5 ค่าระหว่าง 190-560 K แสดงให้เห็นว่าทั้งในแนวนอนและแนวตั้งฉากกับแกน  $c$  ของอินเดียมไนไตรด์ ค่าสัมประสิทธิ์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ คำนวณจากค่าพารามิเตอร์ตามสเกลของ Leibfried-Schloman และสมมติว่าค่าความนำความร้อนถูกจำกัดโดยการกระเจิงระหว่างโฟตอนกับโฟตอนในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.80 \pm 0.20 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ขณะที่ค่าความจุความร้อนของอินเดียมไนไตรด์เท่ากับ  $(9.1 \pm 2.9) 10^{-3} \text{ (cal/mol K)}$  ที่อุณหภูมิระหว่าง 298 และ 1273 K เอนโทรปีอยู่ที่  $10.4 \text{ cal/(mol K)}$  ที่ 298.15 K

### 2.2.3 สมบัติทางไฟฟ้าของอินเดียมไนไตรด์ (Electrical Properties of InN)

ข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมา การหาความคล่องตัวของพาหะในอินเดียมไนไตรด์ยังมีค่าที่ไม่แน่นอน สาเหตุที่สำคัญได้แก่ การขาดฐานรองรับที่เหมาะสมในการปลูกอินเดียมไนไตรด์อะตอมของอินเดียมและไนโตรเจนมีรัศมีของอะตอมที่ไม่เหมาะสมในการทำให้เกิดโครงสร้างของอินเดียมไนไตรด์ที่มีคุณภาพ จากสาเหตุนี้ทำให้เกิดการขาดไนโตรเจน (nitrogen vacancies) ในฟิล์ม ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในอินเดียมไนไตรด์ จากสาเหตุเหล่านี้ ทำให้ได้ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนเป็นไปได้อย่างสูงถึง  $3,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่า ค่าความคล่องตัวของพาหะของอินเดียมไนไตรด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการปลูก จากการปลูกด้วยระบบ Ultra-High Electron Cyclotron Resonance-Radio-Frequency Magnetron Sputtering (UHV-ECR-RMS) ได้ค่าความคล่องตัวของพาหะสูงถึงสี่เท่าเมื่อเทียบกับการปลูกแบบดั้งเดิม (vacuum deposition)

### 2.2.4 สมบัติทางแสงของอินเดียมไนไตรด์ (Optical Properties of InN)

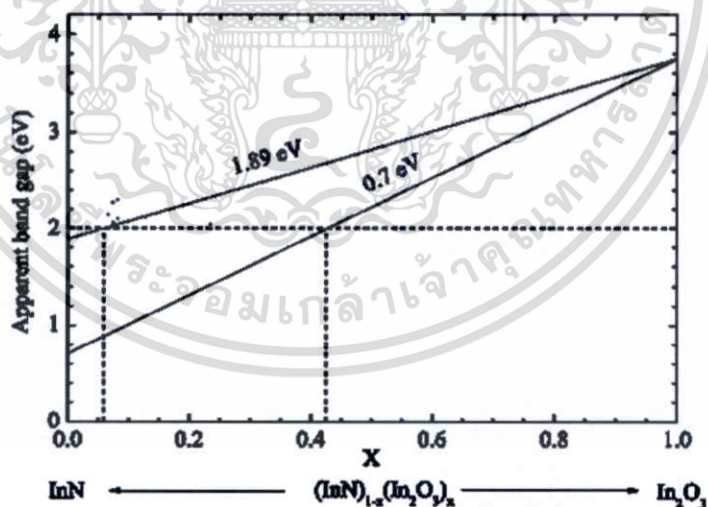
ที่ผ่านมา ยังไม่มีการยืนยันถึงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของอินเดียมไนไตรด์ที่แน่นอน เนื่องจากค่าที่ขัดแย้งระหว่างค่าที่วัดได้โดยทั่วไป ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 1.9 eV [11-13] และค่าที่วัดได้ก่อนหน้านี้ซึ่งอยู่ในช่วง 0.7-1.1 eV [14-16] โดยค่าที่ได้ในช่วง 1.8-2.1 eV ได้จากการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มอินเดียมไนไตรด์โครงสร้างผลึกแบบโพลีที่ระนาบ (200) ปลูกโดยเทคนิคสปีดเตอริง ในกรณีของการปลูกอินเดียมไนไตรด์บนฐานรองรับซัลไฟด์ ด้วยระบบ MBE และ MOVPE ได้ค่าแถบพลังงานในช่วง 0.7-1.0 eV ดังนั้น ค่าแถบพลังงานที่ต่ำเกี่ยวข้องกับพัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์มซึ่งนำไปสู่การได้มาซึ่งฟิล์มที่มีคุณภาพและมีค่าแถบพลังงานใกล้เคียงกับทฤษฎี

## 2.3 สมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำอินเดียมออกไซด์ในไตรด์

### 2.3.1 กฎของออกซิเจน (Role of Oxygen)

ในการปลูกอินเดียมไนไตรด์ผลึกโพลีโดยระบบอาร์เอฟสปีดเตอริงมีแถบพลังงานต้องห้ามที่ 2 eV เป็นไปได้ว่าเนื่องจากมีออกซิเจนรวมอยู่ในโครงสร้าง[17,18] และเกิดการฟอร์มตัวของ  $\text{InN-In}_2\text{O}_3$  ซึ่งมีแถบพลังงานต้องห้ามมากกว่าอินเดียมไนไตรด์ โดยอินเดียมออกไซด์มีแถบพลังงานต้องห้ามประมาณ 3.75 eV[19]

ในรูปที่ 2.3 แสดงไดอะแกรมวิการ์คของระบบฟิล์ม  $\text{InN-In}_2\text{O}_3$  เส้นทึบแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของแถบพลังงานต้องห้ามในอินเดียมไนไตรด์ที่ขึ้นกับปริมาณออกซิเจน [20] จากการคำนวณพบว่า ปริมาณออกซิเจนประมาณ 39 % โดยอะตอม (43%  $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ทำให้แถบพลังงานต้องห้ามเพิ่มขึ้นจาก 0.7 eV เป็น 2 eV ในขณะที่ ปริมาณออกซิเจนเพียง 8 % โดยอะตอม (6%  $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ในการทำให้แถบพลังงานต้องห้ามเพิ่มจาก 1.89 eV เป็น 2 eV ทั้งสองกรณีแสดงโดยเส้นประในรูป 2.3 ในการวัดโดยระบบการวัดพื้นฐานนั้น ค่าที่ได้ยังไม่สามารถชี้ชัดได้แน่นอน อันนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะฟิล์มที่ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคนิคในการปลูกฟิล์มเส้นประในแนวตั้งแสดงถึงองค์ประกอบของวัสดุอัลลอยด์  $\text{InN-In}_2\text{O}_3$  ซึ่งมีแถบพลังงานอยู่ที่ 2 eV โดยพิจารณาว่าอินเดียมไนไตรด์มีแถบพลังงานอยู่ที่ 0.7 eV หรือ 1.89 eV ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมของวิการ์คของ  $\text{InN-In}_2\text{O}_3$  alloy system.

### 2.3.2 อัลลอยด์ InN-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ออกซิเจนเป็นสาเหตุหนึ่งทำให้สมบัติของอินเดียมไนไตรด์เปลี่ยนไป สมบัติที่เด่นชัดอันหนึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานที่สูงขึ้น[14] การฟอร์มตัวของออกซิเจนทำให้เกิดโครงสร้างอินเดียมออกไซด์ที่รวมอยู่กับอินเดียมไนไตรด์ ซึ่งเป็นไปได้ที่จะอธิบายการเพิ่มขึ้นของแถบพลังงานต้องห้าม

ในการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นผลึกเพื่อจะอธิบายว่าทำไมจึงไม่พบโครงสร้างของอัลลอยด์ InN-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โลหะกลุ่มสาม ที่ฟอร์มตัวเป็น M<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ส่วนใหญ่รูปแบบผลึกมีโครงสร้างแบบโครันดัม (Corundum structure) ซึ่งเป็นโครงสร้างโดยทั่วไปของโลหะออกไซด์ สำหรับในกลุ่มโลหะไนไตรด์ จะมีโครงสร้างแบบเวอริชต์เฮกซะโกนอล ซึ่งมีอะตอมต่อยูนิตเซลล์น้อยกว่า อันนี้ทำให้ไม่เกิดความต่อเนื่องของโครงสร้างทั้งสอง ซึ่งไม่เหมือนกับกลุ่ม III-V อย่างเช่น InGaAs โดยเฉพาะสารประกอบสองโครงสร้างที่มีความสมดุลทางโมเลกุล เช่น M<sub>3</sub>O<sub>3</sub>N (MN+M<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ก็ไม่เป็นไปตามโครงสร้างที่คิดไว้ แม้ว่าจะเป็นสารที่อยู่ใกล้กับ AlO<sub>2</sub>N<sub>3</sub> โครงสร้างผลึกที่ซับซ้อนอื่นๆ จะเป็นแบบเดียวกับ AION แต่พันธะของ Al-O จะมีความแข็งแรงกว่า ในกลุ่มของ AION ได้นำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่มีประสิทธิภาพสูง ยังไม่มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าอินเดียมมีลักษณะคล้ายกับ AlO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> และเชื่อว่ายังคงมีองค์ประกอบของโครงสร้างที่เป็น InN-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ แต่อย่างไรก็ตาม จาก effective-medium theory นอกจากจะควบคุมองค์ประกอบของทั้งสองเฟสที่เหมาะสมแล้ว ก็จะแสดงให้เห็นถึงขอบการดูดกลืนแสงระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง

Westra et al. [20] เสนอรูปร่างที่นำเชื่อถือสำหรับหลักเกณฑ์ของออกซิเจนในอินเดียมไนไตรด์ โดยปลูกฟิล์มผลึกแบบโพลีที่มีค่าความเข้มข้นของพาหะอยู่ในช่วง  $7 \times 10^{19} - 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  และความคล่องตัวของพาหะอยู่ในช่วง  $4 - 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  จากผลของการวัดการกระเจิงของรัทเทอร์ฟอร์ด ความเข้มข้นของออกซิเจนประมาณ 11% โดยอะตอม อัตราส่วนของอินเดียมต่อไนโตรเจนมากกว่า 1 จากผลที่ได้ยังไม่สามารถบอกเฟสที่เกี่ยวข้องกับออกซิเจนได้ แต่ได้เสนอว่าออกซิเจนอาจจะจับพันธะตรงบริเวณผิวหน้าของฟิล์มในรูปของอะมอร์ฟัส Forley และ Lyngdal [21] ศึกษาผลของออกไซด์ที่ผิวโดย XPS โดยโครงสร้างฟิล์มจะรักษาอัตราส่วนระหว่างอินเดียมกับไนโตรเจนเพื่อควบคุมผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ขณะเดียวกันวิเคราะห์ผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากออกซิเจนที่อยู่บนผิวตัวอย่าง จากการทดลองพบว่าสเปกตรัมไม่สามารถอธิบายการอยู่ขององค์ประกอบของออกซิเจนได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ในไนโตรเจนไดออกไซด์ยังทำให้ปริมาณออกซิเจนในฟิล์มสูงขึ้น ในกรณีที่มีการแอนนัลอินเดียมไนไตรด์ในบรรยากาศของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500°C หลังการปลูก ก่อให้เกิดอะมอร์ฟัสออกไซด์ไนไตรด์ ผลของสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงพีคของ In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ออกมาชัดเจน ในขณะที่ปลูกอินเดียมไนไตรด์โดยระบบ MBE การแอนนัลหลังการปลูกแสดงสเปกตรัมของ In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ทั้งนี้อุณหภูมิขณะปลูกจะอยู่ราวๆ 500°C และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่ใช้ในการปลูกนานกว่าเวลาที่ใช้ในการแอนนีส เพราะฉะนั้นออกซิเจนได้แทรกเข้าไปในเกรนของผลึกในรูปของออกซิไนไตรด์หลังการปลูกฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่า  $\text{In}_2\text{O}_3$  ยังเกิดจากการที่ทิ้งตัวอย่างไว้ในอากาศเป็นเวลานาน

จากรายงานของ Kumar [22] พบว่า ปริมาณของออกซิเจนในฟิล์มไม่มีผลต่อการค่าคงที่แลททิซ วิธีการของ Kumar ได้ค่าปริมาณออกซิเจนเป็นที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ถูกต้องมากที่สุด โดยวัดออกซิเจนได้ในฟิล์มอินเดียมไนไตรด์ได้ 19 % แต่จากผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไม่พบพิกของที่มีองค์ประกอบของออกซิเจน แสดงว่าออกซิเจนเข้าไปอยู่ในรูปของอะมอร์ฟัส อย่างไรก็ตาม จากผลของการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ค่าคงที่แลททิซในแกน c ของโครงสร้างอินเดียมไนไตรด์ในระนาบ (0002) ได้ค่าเท่ากับ 5.69 อังสตรอม ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้รายงาน โดยทั่วไปคือ 5.70 อังสตรอม ตามตาราง 2.1

ดังนั้นเป็นที่น่าเชื่อได้ว่าการที่ออกซิเจนปนอยู่ในอินเดียมไนไตรด์ไม่ทำให้ค่าคงที่แลททิซเพิ่มขึ้น แต่การฟอร์มตัวของอัลลอยด์  $\text{InN-In}_2\text{O}_3$  ทำให้ค่าคงที่แลททิซเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ยังไม่มีการศึกษาในกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนเข้าไปในอินเดียมไนไตรด์เป็นจำนวนมากๆ การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่แลททิซขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจน ซึ่งสามารถสรุปได้อีกว่า  $\text{InN-In}_2\text{O}_3$  จะไม่เกิดถ้าปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนในอินเดียมไนไตรด์มีปริมาณน้อยและกรณีที่มีการสร้างฟิล์มที่อุณหภูมิค่า

พิจารณาเกี่ยวกับความเข้มข้นของพาหะกับปริมาณออกซิเจน Yoshimoko [23] แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนในอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยระบบ MBE ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าความเข้มข้นของพาหะได้  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  (สอดคล้องกับปริมาณของอะตอมโคเนอร์ที่  $\sim 0.3\%$  ในอินเดียมไนไตรด์) และปริมาณออกซิเจนในฟิล์มอยู่ราวๆ 1-6% อย่างไรก็ตามที่ 6% สอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของพาหะที่  $\sim 2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  ถ้าออกซิเจนในฟิล์มอยู่ในสถานะที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าได้ทั้งหมดและเป็นตัวหลักในการเป็นอะตอมผู้ให้ ค่าความเข้มข้นของพาหะจะใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้

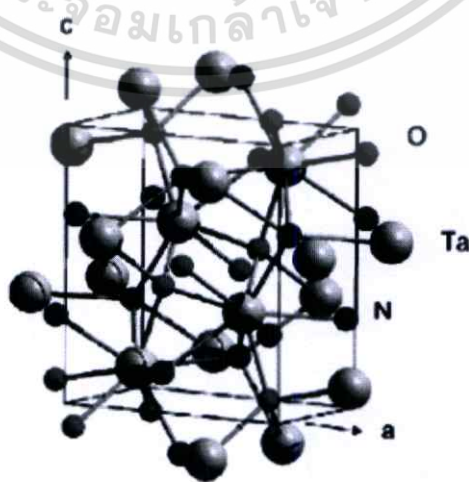
### 2.3.3 โครงสร้างผลึกของโลหะออกซิไนไตรด์ (Metal Oxynitride Crystal Structure)

วัสดุที่ไวต่อออกซิเจนนั้นเมื่อถูกยึคครองโดยออกซิเจนแล้วจะมีสมบัติที่คงสภาพของตัวมันเองเป็นพิเศษเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยากับบรรยากาศต่ำ กรณีของโลหะไดออกไซด์ จุดประสานของอะตอมโลหะภายในโครงสร้างจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแทรกของอะตอมออกซิเจน โครงสร้างของโลหะออกไซด์ที่ใหญ่ที่สุดได้แก่โครงสร้างแบบ cotunnite ซึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจน 9 อะตอม แต่มีโลหะออกไซด์หลายชนิดที่มีโครงสร้างแบบ orthorhombic cotunnite ซึ่งประกอบไปด้วย  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{PbO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{TbO}_2$ ,  $\text{TeO}_2$ , และ  $\text{ThO}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรณีดังกล่าวถ้ามีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโดยการแทนที่ของอะตอมอื่น ทำให้เกิดวัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่น่าสนใจ J.E. Lowther *et al.* [ 24] อธิบายความเป็นไปได้ที่ไนโตรเจนจะเข้าไปครอบครองในโครงสร้าง cotunnite ทำให้เกิดโครงสร้างโลหะออกซีไนไตรด์ ถ้าอะตอมของไนโตรเจนครอบครองตำแหน่งในแลตทิซทั้งหมดจะทำให้โครงสร้างทางพลังงานต่ำสุด ส่วนกรณีอื่นจะเกิดโครงสร้างออกซีไนไตรด์แบบ cotunnite ขึ้นมา

สำหรับการเกิดโครงสร้างโลหะออกซีไนไตรด์นั้น อธิบายได้สามกรณี กรณีแรกการที่อะตอมออกซิเจนเข้าไปแทนที่อะตอมไนโตรเจนในโครงสร้างโลหะไนไตรด์เกิดโครงสร้างโลหะออกซีไนไตรด์ กรณีที่สองคือการที่อะตอมไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อะตอมออกซิเจนในโลหะไนไตรด์เกิดโครงสร้างโลหะออกซีไนไตรด์ กรณีนี้อาจเป็นไปได้ยากเนื่องจากโครงสร้างโลหะออกไซด์เป็นโครงสร้างพันธะที่แข็งแรงนอกจากโครงสร้างดังกล่าวมีผลึกไม่สมบูรณ์ได้แก่การขาดอะตอมออกซิเจนในโครงสร้าง (oxygen vacancy) กรณีที่สามเป็นกรณีที่มีการปลูกฟิล์มโดยวิธีก๊าซไวพฏิกิริยาในบรรยากาศของไนโตรเจนและออกซิเจน ในกรณีนี้โครงสร้างของฟิล์มที่ได้เป็นไปได้สองแบบด้วยกันคือ แบบแรกอะตอมของไนโตรเจนและออกซิเจนจะจับกับอะตอมของโลหะเป็นโลหะออกซีไนไตรด์ แบบที่สองอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนจะแยกกันจับอะตอมของโลหะซึ่งกรณีนี้จะเกิดโครงสร้างอินเดียมไนไตรด์ และอินเดียมออกไซด์อยู่ร่วมกันในฟิล์ม รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของแทนทาลัมออกซีไนไตรด์ โดยที่อะตอมของไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในผลึกแทนทาลัมออกไซด์ หรืออะตอมออกซิเจนเข้าไปแทนที่อะตอมไนโตรเจนในผลึกแทนทาลัมไนไตรด์ สำหรับผลึกอินเดียมออกซีไนไตรด์ ปัจจุบัน ยังไม่มีการรายงานอย่างชัดเจนในโครงสร้างผลึก จึงได้ยกตัวอย่างแทนทาลัมออกซีไนไตรด์มาเป็นแบบโครงสร้างผลึกที่มีความเป็นไปได้ว่าคล้ายกัน เนื่องจากอยู่ในตระกูล MON อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยหลายกลุ่มพยายามหาโครงสร้างผลึกที่ชัดเจนต่อไป

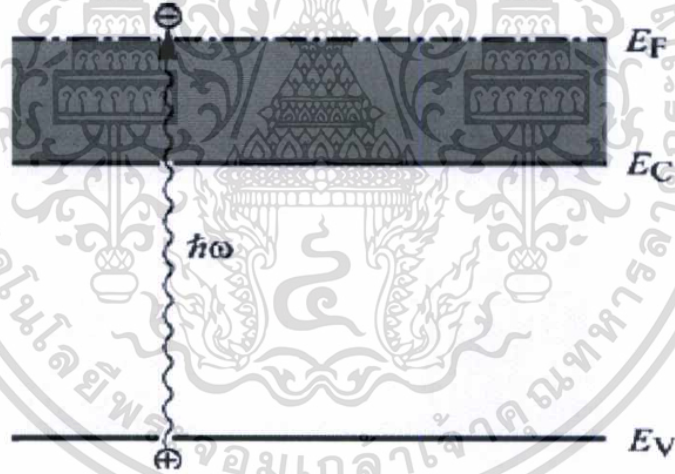


รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของแทนทาลัมออกซีไนไตรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ปรากฏการณ์เบอร์สไตน์-มอสส์ (Burstein-Moss effect)

การเลื่อนของขอบการดูดกลืนไปยังพลังงานที่สูงกว่าจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของการเจือของสารกึ่งตัวนำมีค่ามากๆ ซึ่งถูกนิยามว่าเป็น ปรากฏการณ์เบอร์สไตน์-มอสส์ (Burstein-Moss effect) หรือ การเลื่อนที่แบบเบอร์สไตน์-มอสส์ (Burstein-Moss shift) การเลื่อนของขอบเขตการดูดกลืนนี้เรียกว่า band filling หรือ phase space filling โดยที่การเลื่อนขึ้นของขอบการดูดกลืนสัมพันธ์กับ band filling ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นการเจือในสารกึ่งตัวนำชนิด n จะทำให้ที่แถบความนำนี้เต็มไปด้วยอิเล็กตรอนเมื่อมีการเจือในระดับสูงมากๆ (heavy dope) ซึ่งจะทำให้การดูดกลืนไม่สามารถเกิดจากด้านบนของแถบวาเลนส์ไปยังส่วนล่างของแถบความนำซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการเลื่อนที่ของขอบการดูดกลืนจาก  $E_c - E_v = E_g$  (สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีเจือ) ไปเป็น  $E_F - E_v > E_g$  (เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิด n ถูกเจือด้วยความเข้มข้นมากๆ) การเลื่อนที่ของขอบการดูดกลืนนี้พบเป็นครั้งแรกใน InSb ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n (Moss, 1961) และในการทำสารกึ่งตัวนำโปร่งแสงในย่าน near-band-edge (Verie, 1967; Dapkus et al., 1969, Deppe et al., 1990)



รูปที่ 2.5 แถบความนำของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกเจือมากๆทำให้ขอบการดูดกลืนปรากฏที่พลังงาน  $E_F - E_v$  ซึ่งมีค่ามากกว่าแถบพลังงานต้องห้าม (bandgap)  $E_c - E_v$

การเลื่อนที่แบบเบอร์สไตน์-มอสส์ สามารถคำนวณได้จากการเต็มไปด้วยพาหะข้างมากของแถบความนำหรือแถบวาเลนส์ในสารกึ่งตัวนำชนิด n และชนิด p ตามลำดับ สมมติให้สารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือเป็นชนิด n ดังนั้นจะได้ว่า

$$E_F - E_c = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} (3\pi^2 n)^{2/3} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของพาหะอิสระและ  $m^*$  คือมวลประสิทธิผล ดังนั้นขอบการดูดกลืนมีค่าพลังงานเท่ากับ

$$E = E_g + (E_F - E_c) \quad (2.11)$$

หมายเหตุ ผลของการเลื่อนของขอบการดูดกลืนของการเลื่อนที่แบบเบอร์สไตน์-มอสส์เป็นส่วนกลับโดยตรงกับมวลประสิทธิผลซึ่งแสดงให้เห็นความจริงที่ว่าปรากฏการณ์เบอร์สไตน์-มอสส์มีความเด่นชัดเป็นอย่างมากในสารกึ่งตัวนำที่มีค่ามวลพาหะน้อย

## 2.5 ระบบสปีดเตอริง

### 2.5.1 กระบวนการสปีดเตอริง

กระบวนการสปีดเตอริงคือกระบวนการทำให้อะตอมของสารหลุดออกจากผิวด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมของสารไปเคลือบบนฐานรองรับ อันตรกิริยาระหว่างเป้าสารเคลือบกับ ไอออนแสดงในรูปที่ 2.6 การผลิตอนุภาคพลังงานสูงได้จากลำอนุภาคของปืนไอออน (ion gun) หรือกระบวนการโกรวดิสชาร์จ

องค์ประกอบสำคัญสำหรับการเคลือบฟิล์มบางโดยขบวนการสปีดเตอริงคือ

- 1) เป้าที่ทำจากสารที่ต้องการทำฟิล์มบาง
- 2) ฐานรองรับ
- 3) อนุภาคพลังงานสูงที่ผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อวิ่งชนเป้าให้หลุดออกมาเคลือบบน

ฐานรองรับจนได้ความหนาที่ต้องการซึ่งผลิตได้หลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมและทำได้ง่ายได้แก่กระบวนการโกรวดิสชาร์จ ซึ่งอนุภาคพลังงานสูงได้แก่ไอออน



รูปที่ 2.6 อันตรกิริยาระหว่างเป้าสารเคลือบกับ ไอออน (Chapman 1980)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

- 1) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวเป้า และบางตัวก็ถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ
- 2) การชนของไอออนบางครั้งอาจทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากเป้าเรียกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ
- 3) การชนของไอออนบางครั้งอาจเกิดการฝังตัวของไอออนในเป้าสารเคลือบ
- 4) การชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก
- 5) การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องของอะตอมของเป้าสารเคลือบคล้ายการชนกันของลูกบิลเลียดทำให้อะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบ เรียกว่ากระบวนการสปัตเตอริง

### 2.5.2 อัตราการสปัตเตอริง (Sputtering Yield, S)

อัตราการสปัตเตอริง คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 ตัว มีหน่วยเป็น อะตอม/ไอออน อัตราการสปัตเตอริงแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยดังนี้

- 1) พลังงานของไอออนที่พุ่งชน

ในการชนตรงระหว่างอนุภาค 2 ตัว ฟังก์ชันการถ่ายทอดพลังงานมีค่าเท่ากับ

$$\frac{4mM}{(m+M)^2}$$

โดยที่  $m$  คือมวลของอนุภาคที่ถูกพุ่งชน และ  $M$  คืออนุภาคที่พุ่งชน

เมื่อพลังงานของไอออนมีค่าน้อยมากๆ อัตราการสปัตเตอริงมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากพลังงานที่อะตอมได้รับถ่ายทอดจากไอออนไม่พอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ เมื่อพลังงานของไอออนมีค่ามากกว่าสี่เท่าพลังงานที่ใช้ในการระเหิดอะตอมสารเคลือบหนึ่งอะตอม จะทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องและเกิดการปลดปล่อยอะตอมออกจากผิวเป้าสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่าพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) มีค่าดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 พลังงานขีดเริ่มของเป่าสารเคลือบเมื่อถูกชนด้วยก๊าซเฉื่อยในหน่วย eV (Chapman 1980)

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg
Al	13	13	15	18	18
Ti	22	20	17	18	25
V	24	23	25	28	25
Cr	22	22	18	20	23
Fe	22	20	25	23	25
ZnO		85			

2) อัตราการสปีดเตอริงแปรเปลี่ยนไปตามระนาบผลึกของผิวเป่าสารเคลือบ และมีค่ามากที่สุดที่สูงสุดในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นน้อยที่สุด เนื่องจากไอออนมีแนวโน้มที่จะฝังตัวในเป่ามากขึ้น

3) อัตราการสปีดเตอริง  $S$  มีค่าแปรผันตรงกับ พลังงานไอออนพุ่งชน( $E$ ) และแปรผกผันกับพลังงานขีดเริ่ม( $U_0$ ) มีค่าตามสมการ

$$S(E) = \frac{3\alpha}{4\pi^2} \frac{4mM}{(m+M)^2} \frac{E}{U_0}$$

$\alpha$  = ฟังก์ชันประสิทธิภาพการชน

### 2.5.3 กระบวนการโกรวติสซาร์จ

โกรวติสซาร์จถูกใช้อย่างหลากหลายในกระบวนการทำฟิล์มบางแบบต่างๆ เช่น ระบบสปีดเตอริง พลาสมาเอตซิง ไอออนอิมแพลนเตชัน เป็นต้น กระบวนการทั้งหมดวางอยู่บนพื้นฐานในการสร้างและสมบัติของพลาสมา ในกระบวนการทำฟิล์มบางประกอบด้วยก๊าซที่ถูกไอออไนซ์บางส่วนที่ระดับความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศเป็นอย่างมาก เพื่อความเข้าใจต่อไปจะกล่าวถึงสมบัติของพลาสมาและ โกรวติสซาร์จบางประการรวมทั้งวิธีการสร้างและการคงสถานะดังกล่าวไว้

พลาสมาคือก๊าซที่ถูกไอออไนซ์บางส่วนประกอบด้วยไอออนและอิเล็กตรอนอิสระจำนวนเท่าๆกันโดยประมาณอยู่ในทะเลของอะตอมที่เป็นกลาง มีสภาพปกติเป็นกลางทางไฟฟ้า การรบกวนความเป็นกลางทางไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ในระดับจุลภาคหรือเกิดขึ้นได้ที่ขอบพลาสมาในระดับมหภาค พลาสมามีลักษณะคล้ายกับตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อมีบริเวณใดที่มีประจุไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุลขึ้นมันจะถูกชดเชยอย่างรวดเร็วโดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้าภายในพลาสมา ประจุพาหะหลักในพลาสมาคืออิเล็กตรอนเนื่องจากมีมวลน้อยและตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่าไอออนมาก ในการคำนวณเกี่ยวกับพลาสมาถือว่าไอออนไม่เคลื่อนที่แต่ในความเป็นจริงไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้แต่มีความคล่องตัวน้อยกว่าอิเล็กตรอนมาก

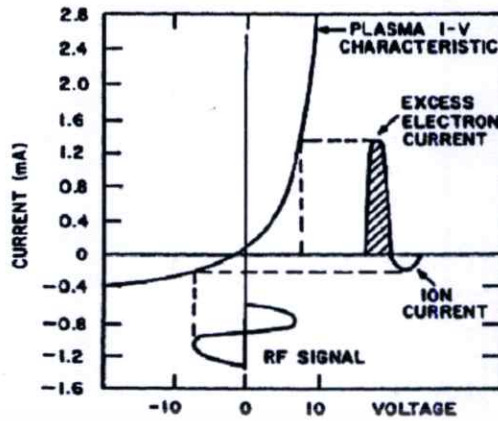
โกรวดิสซาร์จคือพลาสมาชนิดหนึ่งที่บางบริเวณมีประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นบวกและบางบริเวณมีประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นลบ

“โกรวดิสซาร์จ” และ “พลาสมา” มักเป็นคำที่ใช้แทนกันในกระบวนการผลิตฟิล์มบาง

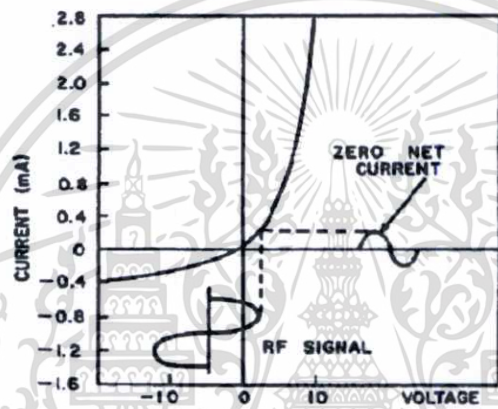
#### 2.5.4 RF Sputtering

ขบวนการเคลือบฟิล์ม โดยวิธีการทางคิซี ไม่สามารถใช้กับเป่าสารเคลือบที่เป็นฉนวนได้ เนื่องจากเกิดการสะสมของประจุที่ผิวของเป่าสารเคลือบ ระบบการเคลือบด้วยคลื่นความถี่วิทยุจึงถูกนำมาใช้กับเป่าสารเคลือบดังกล่าว รวมทั้งสามารถใช้ได้กับเป่าสารเคลือบทั้งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและสารกึ่งตัวนำ ระบบดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวาง วัสดุทั้งที่ไม่ใช่ตัวนำและสารกึ่งตัวนำที่ปลูกโดยระบบสปัตเตอริงรวมไปถึงสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ แกลเลียมแอนติโมนี แกลเลียมไนไตรด์ และ อลูมิเนียมไนไตรด์ สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ได้แก่ แคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์ กลุ่ม IV-VI ได้แก่ PbTe เป็นต้น[27]

ข้อดีของการปลูกสารด้วยคลื่นวิทยุเป็นผลมาจากแรงดันไบแอสในตัวซึ่งเป็นแรงดันลบเมื่อเทียบกับศักย์ของพลาสมา ก่อให้เกิดกระบวนการ grow discharge ศักย์ที่เกิดขึ้นเป็นผลของความแตกต่างความคล่องตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สมบัติกระแส-แรงดันของอิเล็กโทโรด แสดงในรูป 2.11(a) ศักย์โพลตติง (floating potential) เป็นลบเมื่อเทียบกับ plasma potential โดยปริมาณแรงดันขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซและฟังก์ชันการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนในพลาสมา แต่โดยทั่วไปแรงดันไบแอสอยู่ระหว่าง -20 ถึง -50 โวลต์ ซึ่งมีค่าต่ำสำหรับกระบวนการสปัตเตอริง เมื่อแรงดันสลัถูกป้อนให้กับอิเล็กโทโรด กระแสอิเล็กตรอนจะไหลเมื่ออิเล็กโทโรดเป็นบวกเมื่อเทียบกับศักย์โพลตติงมากกว่าที่ไอออนไหลเมื่ออิเล็กโทโรดเป็นลบสัมพันธ์กับศักย์โพลตติง ตามรูป 2.11 b)



(a)

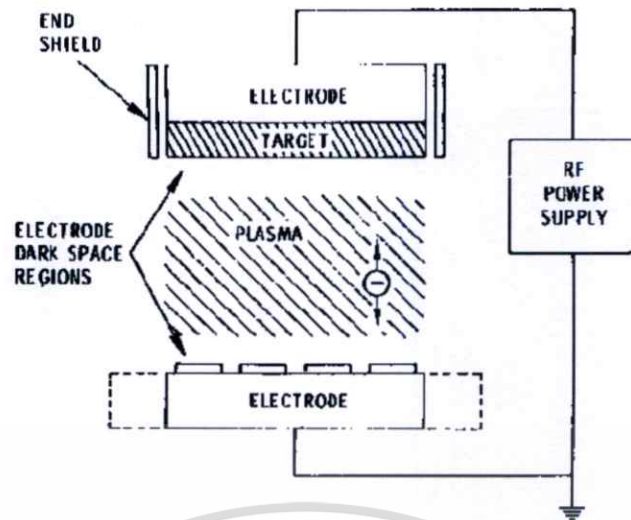


(b)

รูปที่ 2.7 กระแสที่เกิดจากการไบแอส โดยศักย์ของพลาสมา

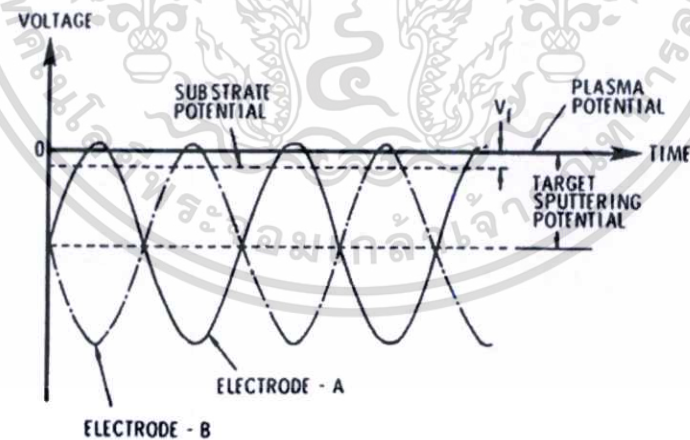
ในรูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของอาร์เอฟสปีดเตอริงแบบพลาสมาโคโรด ซึ่งมีเป้าสารเคลือบชนิดไม่นำไฟฟ้าวางบนขั้วอิเล็กโตรดด้านหนึ่ง ส่วนฐานรองรับวางบนขั้วอิเล็กโตรดอีกด้านหนึ่ง ขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นขั้วควอดและอานอดสลับกัน ความถี่ใช้งานอยู่ที่ 13.56 MHz ตามมาตรฐานเอชซีซี เพื่อให้เกิดการคิซซาร์จหรือทำให้อิออนแตกตัว

ที่ความถี่ระดับ MHz อิออนจำนวนมากไม่สามารถที่จะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายได้ทัน ยกเว้นอิเล็กตรอน ทำให้เกิดกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนในพลาสมาและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามความถี่ เมื่อกลุ่มเมฆอิเล็กตรอนไปยังอิเล็กโตรดด้านหนึ่ง จะเกิดอิออนบวกกระจายอยู่ที่อิเล็กโตรดอีกด้านหนึ่ง การกระจายของอิออนบวกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเท่ากับศักย์ที่จ่ายให้เช่นเดียวกับกรณีของระบบดีซี



รูปที่ 2.8 พื้นฐานของระบบสปัตเตอริงแบบ planar r.f diode

เป่าสารเคลือบที่ไม่นำไฟฟ้าจะทำตัวเหมือนตัวเก็บประจุในวงจรไฟฟ้าระหว่างขั้ว กระแสที่ไหลจึงไม่มีองค์ประกอบของดิซี ทั้งไอออนและประจุอิเล็กตรอนที่ไหลไปยังขั้วในรอบไซเคิลจะต้องเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่มีจำนวนมากไหลไปที่ขั้วเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนทำให้เกิดแนวสัมผัสขึ้นมา ดังนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะไปที่ขั้วเฉพาะช่วงครึ่งไซเคิล ในสถานะคงที่ขั้วทั้งสองจะสร้างไบแอสลบที่สัมพันธ์กับศักย์ของพลาสมาขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 2.9



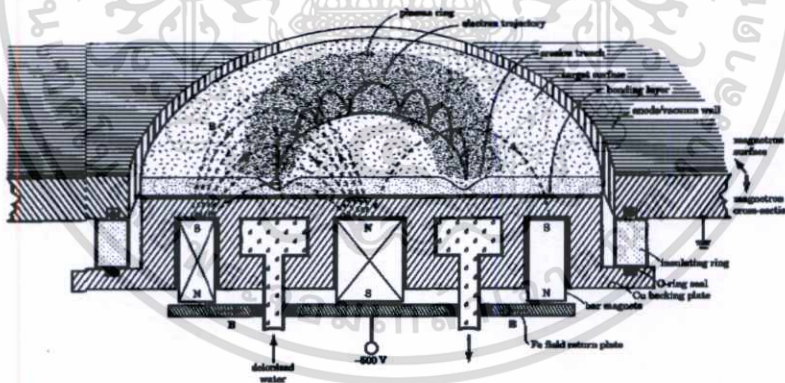
รูปที่ 2.9 การเกิดศักย์บนเป่าสารเคลือบที่สัมพันธ์กับศักย์โพลตึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 Magnetrons

ในกระบวนการสปีดเตอริงเพื่อให้อิเล็กตรอนที่หลุดจากคาโอดชนกับก๊าซแล้วให้เกิดการแตกตัวก่อนที่มันจะไปถึงแอโนด จะกำหนดโดยระดับความดันของก๊าซเพื่อที่จะรักษาสภาพพลาสมาเอาไว้ แม่เหล็กเป็นตัวแปรที่สำคัญอันหนึ่งในการพัฒนากระบวนการสปีดเตอริง หลักการพื้นฐาน แม่เหล็กจะสร้างสนามในแนวขวางเหนือคาโอด ซึ่งจะบังคับอิเล็กตรอน ให้วิ่งในตำแหน่งวงโคจรเพื่อเพิ่มระยะทางก่อนที่จะหลุดไปยังแอโนด เนื่องจากเส้นทางเดินของอิเล็กตรอนยาวกว่าระยะของอิเล็กโตรดมาก ระดับความดันที่รักษาสภาพพลาสมาจะต่ำกว่าระบบสปีดเตอริงแบบเดิม อนุภาคที่หลุดออกมาจะรักษาพลังงานจลน์ทั้งหมดเพื่อให้ไปถึงฐานรองรับ ดังนั้นพลังงานนี้จะมีผลต่อโครงสร้างในฟิล์ม นอกจากนี้ อัตราการปลูกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระเจิงของอะตอมลดลง และประสิทธิภาพของการใช้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น

โครงสร้างแม่เหล็กและคาโอดจะมีด้วยกันหลายรูปแบบแต่ในที่นี่จะอธิบายหลักการของแม่เหล็กแบบพลาเนียร์ดังรูปที่ 2.10 [28] เป้าสารเคลือบหนา 3 ถึง 10 mm. ซึ่งประกบติดกับแผ่นทองแดงที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำไว้ก่อนเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สำหรับคาโอดแยกออกจากกราวด์โดยใช้แหวนเซรามิก ซึ่งสามารถเป็นส่วนที่แยกระบบสุญญากาศโดยซีลด้วยโอริง แผ่นโลหะส่วนที่เชื่อมต่อกราวด์จะทำหน้าที่เป็นแอโนด แม่เหล็กที่นิยมใช้เป็นชนิด Nd-Fe-B ซึ่งให้ความเข้มของสนามประมาณ 1 กิโลเกาส์

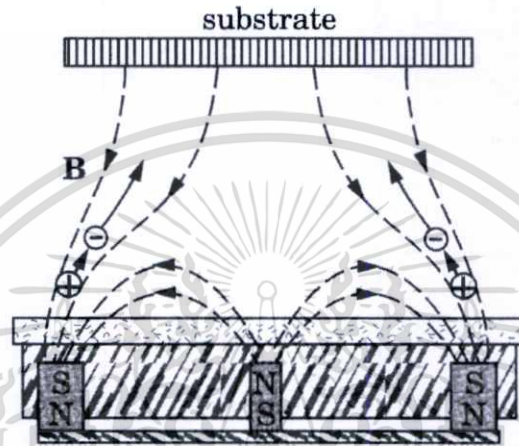


รูปที่ 2.10 โครงสร้างและการทำงานของแม่เหล็กแบบพลาเนียร์

การแก้ปัญหาความหนาของฟิล์มไม่เท่ากันทำได้โดยการหมุนฐานรองรับไปรอบๆ ระหว่างการปลูก วิธีการปลูกโดยทั่วไปจะใช้แม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า การจำกัดพลาสมาเหนือเป้าสารเคลือบโดยการวางสนามแม่เหล็กในแนวขวาง เป็นผลทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาน้อยกว่ากรณีไม่มีสนามแม่เหล็กหรือแบบไดโอดพลาเนียร์ พิจารณาอนุภาคของเป้าสารเคลือบที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า จำเป็นต้องมีพลังงานจลน์เพียงพอที่จะทำให้เกิดเป็นฟิล์มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองรับ สำหรับอนุภาคที่มีประจุ สนามแม่เหล็กจะมีผลต่ออัตราการปลูกฟิล์ม รูปแบบของสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการปลูกฟิล์ม วิธีการอันหนึ่งที่ใช้กันคือการวางแม่เหล็กแบบไม่สมดุลตามรูปที่ 2.11 แม่เหล็กตำแหน่งตรงกลางจะมีขนาดเล็กกว่าแม่เหล็กที่วางเป็นวงแหวนรอบนอกเพื่อให้เส้นสนามแม่เหล็กบางส่วนหลุดออกไปยังฐานรองรับ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ขนานไปกับสนามแม่เหล็ก สนามจะไม่มีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน ซึ่งทำให้อนุภาคหลุดไปยังฐานรองรับได้ และไอออนบวกจะถูกดึงโดยขั้วไฟฟ้าทั้งสอง วิธีนี้เป็นการเพิ่มพลังที่ฐานรองรับ



รูปที่ 2.11 รูปแบบการไหลของพลาสมาจากเป้าสารเคลือบไปยังฐานรองรับในระบบแม่เหล็กแบบไม่สมดุล

### 2.5.6 Reactive Sputtering

รีแอคทีฟสเปตเตอริง เป็นขบวนการหนึ่งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มในระบบที่มีก๊าซ เป้าสารเคลือบเป็นทั้งโลหะบริสุทธิ์(หรือโลหะอัลลอยด์) หรือวัสดุที่เป็นสารประกอบ ก๊าซที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดฟิล์มที่ปลูก เช่น ใช้ไนโตรเจนในการปลูกฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ ใช้ก๊าซซัลเฟอร์ในการปลูกแคดเมียมซัลไฟด์ ข้อดีของรีแอคทีฟสเปตเตอริง ได้แก่

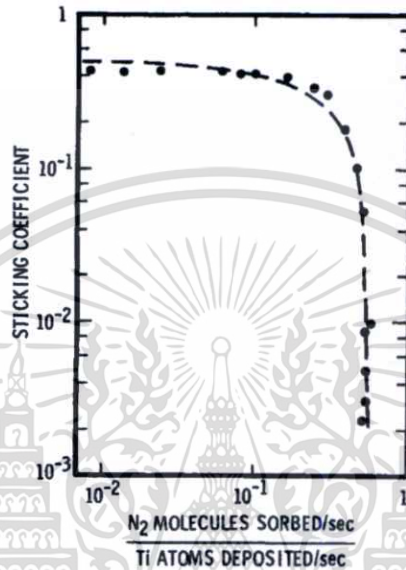
- นำมาใช้มาปลูกฟิล์มสารประกอบจากเป้าสารเคลือบที่เป็นโลหะ
- ใช้ปลูกสารประกอบที่เป็นฉนวน
- ใช้ในการสร้างฟิล์มที่การเปลี่ยนองค์ประกอบของธาตุในฟิล์ม

ขบวนการรีแอคทีฟสเปตเตอริงมีความยุ่งยากตรงที่ต้องควบคุมตัวแปรในขบวนการหลายๆอย่างพร้อมกัน

ปฏิกิริยาเคมีบนเป้าสารเคลือบ ที่ฐานรองรับ และปฏิกิริยาเคมีในกรณีที่มีความดันทำงานสูงมาก รวมทั้งเฟสของก๊าซ เมื่อทำการสเปตในบรรยากาศของก๊าซรีแอคทีฟและก๊าซอาร์กอนผสมกัน ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของฟิล์มกับก๊าซรีแอคทีฟที่ปล่อยเข้าไปจะไม่เป็นเชิงเส้น ฟิล์มที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับก๊าซในระบบ ซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการปลูก องค์ประกอบในฟิล์ม โครงสร้างของฟิล์ม และอุณหภูมิ ในรูปที่ 2.12 เป็นการปลูกฟิล์มไททาเนียมในบรรยากาศของไนโตรเจนกับอาร์กอน ผสมกัน จำนวนโมเลกุลของไนโตรเจนต่อไททาเนียมในฟิล์มสูงสุดที่ 0.5 (ค่าที่ฟิล์มที่โครงสร้างสมบูรณ์) กรณีที่ปริมาณก๊าซรีแอคทีฟต่างๆ อะตอมของก๊าซมีโอกาเข้าไปในฟิล์มทั้งหมด หากปริมาณก๊าซมากไป ส่วนที่เหลือจะถูกดึงออกจากระบบ



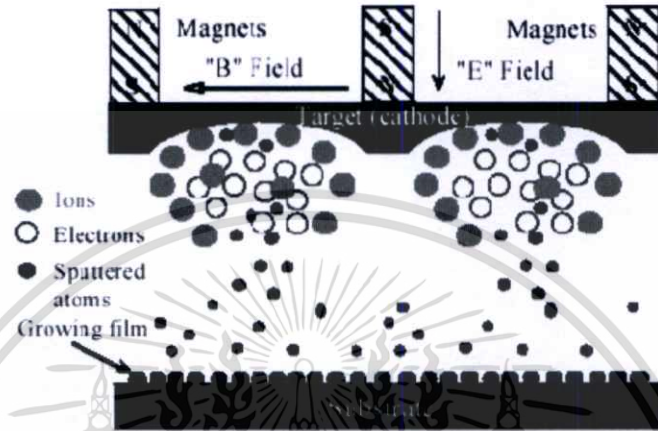
รูป 2.12 สัมประสิทธิ์ของการพุ่งชนเป้าสารเคลือบในบรรยากาศของไนโตรเจนในระหว่างการปลูกไททาเนียม

## 2.6 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเทคนิคควบคุมก๊าซไวปฏิกิริยา (Reactive Gas-Timing RF Magnetron Sputtering)

### 2.6.1 Magnetron Sputtering

เทคโนโลยีของแมกนีตรอนสปัตเตอริงได้พัฒนาขึ้นในปี 1970[29] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพบางอย่างในการปลูกฟิล์ม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบดังกล่าวปล่อยมวลพิษสู่สิ่งแวดล้อมน้อยกว่าวิธีการทางเคมี ระบบสปัตเตอริงเป็นขบวนการที่ซับซ้อนซึ่งมีตัวแปรหลายตัวแปรต้องสอดคล้องกัน ระบบสปัตเตอริงแบบดิซี เป้าสารเคลือบเป็นวัสดุที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม ก๊าซส่วนใหญ่ที่ใช้ได้แก่ อาร์กอนเป็นตัวที่ทำให้เกิดการดีสชาร์จ และคงรักษาสภาพของพลาสมาไว้ ไอออนของอาร์กอนในขบวนการดีสชาร์จไปชนกับผิวของเป้าสารเคลือบให้อะตอมหลุดออกมา อะตอมนี้จะผ่านบริเวณที่เกิดดีสชาร์จและไปเกาะบนแผ่นฐานรองรับ ในส่วนของแมกนีตรอนจะวางอยู่หลังเป้าสารเคลือบ สนามแม่เหล็กจะเสริมในพลาสมาบริเวณใกล้เป้าสารเคลือบ เกิดการจับอิเล็กตรอนใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบ นำไปสู่การเกิดกระแสติสซาร์จอย่างมากมาย อัตราการปลูกฟิล์มเพิ่มมากขึ้นและลดการชนของอิเล็กตรอน แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง เหตุผลที่สำคัญคือมีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูง ในรูปที่ 2.13 แสดงขบวนการของแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบดีซี



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของ dc planar magnetron sputtering.

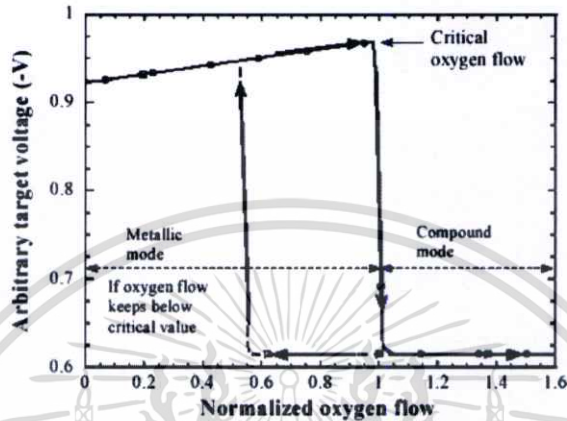
### 2.6.2 Reactive RF Sputtering

รีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงเป็นวิธีการปลูกฟิล์มที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างจากเป่าสารเคลือบโดยการใส่ก๊าซไปทำปฏิกิริยากับวัสดุที่เป็นเป่าสารเคลือบ ก๊าซส่วนใหญ่จะเป็นออกซิเจน โดยผสมกับก๊าซอาร์กอนเพื่อสร้างฟิล์มออกไซด์ ปรัชญาการันต์ที่สำคัญในขบวนการรีแอคทีฟสปัตเตอร์ริงคือการเกิดอีสเทอร์ซิส โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความดันก๊าซในระบบเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซโดยทั่วไป กราฟที่วัดได้เมื่อเพิ่มอัตราไหลของออกซิเจนจะไม่ทับกับกราฟที่วัดได้เมื่อลดอัตราไหลของออกซิเจน สามารถกำหนดจุดวิกฤติตามแนวการเพิ่มออกซิเจนได้สองโหมด กรณีที่ปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าจุดวิกฤติ เป่าสารเคลือบยังคงความเป็นโลหะอยู่ ดังนั้นอะตอมของโลหะถูกทำให้หลุดและทำปฏิกิริยากับก๊าซเป็นสารประกอบบนฐานรองรับ โหมดนี้เรียกว่า โหมดความเป็นโลหะ (metallic mode) เมื่อปริมาณออกซิเจนมากกว่าจุดวิกฤติ ผิวของเป่าโลหะจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดออกไซด์บนผิว ในโหมดนี้เราเรียกว่าโหมดความเป็นสารประกอบ (compound mode) สำหรับเป่าที่เป็นโลหะนั้น แรงดันบนเป่าสารเคลือบหลังจากจุดวิกฤติจะลดลงเนื่องจากค่าฮิลด์ของอิเล็กตรอน

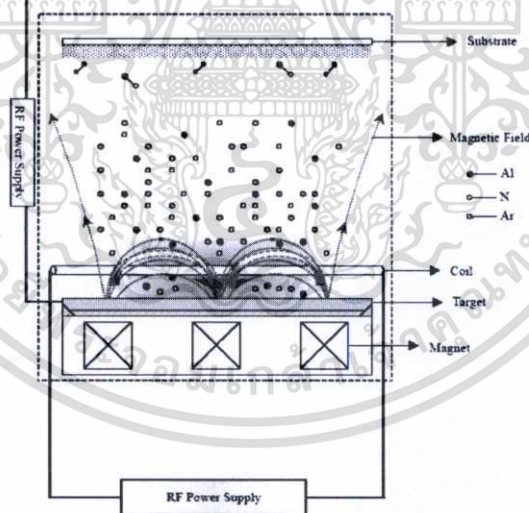
ทุดียูมิสูงขึ้น แรงดันบนเป่าสารเคลือบที่เปลี่ยนตามปริมาณออกซิเจนใช้ในการศึกษาลักษณะค่าวิกฤติของออกซิเจน ในรูปที่ 2.14 แสดงค่าแรงดันที่ได้จากการเพิ่มและลดปริมาณการไหลของออกซิเจน สำหรับกรณีที่เพิ่มอัตราการไหล สังเกตว่าแรงดันจะลดลงทันทีหลังจากจุดวิกฤติ หลังจากนั้นทำการลดอัตราการไหล แรงดันยังคงที่จนผ่านจุดวิกฤติก่อนที่แรงดันจะเพิ่มขึ้นที่จุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการใช้ของออกซิเจนต่ำกว่าค่าวิกฤติ ค่าวิกฤติของออกซิเจนนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการปลูก  
 ในรูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบของระบบอาร์เอฟสปีดเตอริง



รูปที่ 2.14 การเกิดฮิสเทอรีซิสระหว่างศักย์บนเป้าสารเคลือบกับอัตราการใช้ของออกซิเจน



รูปที่ 2.15 การวางตำแหน่งอุปกรณ์ในระบบอาร์เอฟแมกเนตรอนสปีดเตอริง

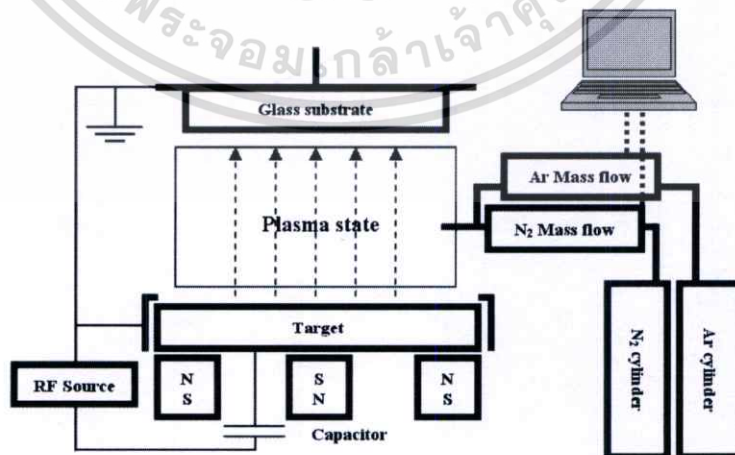
### 2.6.3 Gas-Timing Method

ในการปลูกฟิล์มโดยขบวนการสปีดเตอริงด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่าเทคนิคควบคุมเวลาก๊าซ (gas timing) เป็นวิธีการปลูกฟิล์มในกลุ่มสามไนไตรด์และวัสดุออกซิไนไตรด์โดยปราศจากการให้อุณหภูมิฐานรองรับในระหว่างหรือหลังการปลูก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วิธีการนี้เหมาะสำหรับปลูกเอกสารเป็นเอกลักษณ์ที่ส่งมอบไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มในตระกูลไนไตรด์บนฐานรองรับหลายชนิด วิธีดังกล่าว หลังจากในห้องสุญญากาศทำให้เป็นสุญญากาศแล้ว ขบวนการนำก๊าซเข้าระบบใช้เทคนิคควบคุมเวลาการปล่อยก๊าซซึ่งประกอบไปด้วย ก๊าซอาร์กอน ไนโตรเจนและออกซิเจน ในเวลาที่ต่างกันออกไปเข้าไปในห้องสุญญากาศ เกิดขบวนการพลาสมาเพื่อทำให้เกิดฟิล์มไนไตรด์บนฐานรองรับ

จากการพัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์ม ได้มีการประยุกต์นำไปใช้ปลูกฟิล์มดังกล่าวในระบบปลูกฟิล์มอื่นๆ รีแอกทีฟสปีดเตอริงเป็นที่รู้จักในเรื่องของความคุ้มค่ามากที่สุดในการปลูกฟิล์มที่เป็นสารประกอบ เนื่องจากสามารถปรับความเหมาะสมของกำลังและขบวนการจึงเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการปลูกฟิล์มออกไซด์และไนไตรด์ได้เป็นอย่างดี ในการควบคุมก๊าซในขบวนการสปีดเตอริง จะมีความซับซ้อนในเรื่องของการเกิดปฏิกิริยาต่อกัน ก๊าซที่จะมีผลต่อพื้นผิวของเป่าสารเคลือบและลักษณะของพลาสมา การควบคุมเวลาการไหลของก๊าซถูกนำไปใช้ควบคุมการปลูกฟิล์มออกไซด์ ฟิล์มไนไตรด์รวมทั้งฟิล์มออกไซด์ไนไตรด์ โดยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซเป็นวิธีที่ค่อนข้างเสถียร ง่ายต่อการควบคุมพลาสมาในระหว่างขบวนการสปีดเตอริงที่อัตราการปลูกฟิล์มที่สูง รวมทั้งวิธีดังกล่าวสามารถปลูกฟิล์มบนฐานรองรับได้หลายชนิด ได้แก่ กระจก พลาสติก หรือฐานรองรับที่โค้งงอได้ วิธีการดังกล่าวได้ประสบความสำเร็จในการนำไปใช้ปลูกฟิล์มอลูมิเนียมไนไตรด์และอินเดียมทินออกไซด์โดยไม่มีการให้อุณหภูมิของฐานรองรับ [30,31]

ในรูปที่ 2.16 แสดงไดอะแกรมของระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริงโดยเทคนิคควบคุมเวลาการปล่อยก๊าซ หลังจากห้องสุญญากาศถูกทำให้มีความดันลดลงอยู่ในระดับ $10^{-6}$ - $10^{-7}$  มิลลิบาร์แล้ว ก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนจะถูกปล่อยเข้าสู่ห้องสุญญากาศโดยควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ สำหรับการปลูกฟิล์มโลหะไนไตรด์กรณีที่เป็นสารเคลือบเป็นโลหะเช่น อลูมิเนียมหรืออินเดียม ก๊าซทั้งสองจะถูกปล่อยเข้าห้องสุญญากาศสลับกัน เวลาของการปล่อยก๊าซแต่ละชนิดจะมีผลต่อสมบัติของฟิล์มไนไตรด์ที่ปลูกได้



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมในกระบวนการสปีดเตอริงด้วยเทคนิคการควบคุมก๊าซวเปปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง

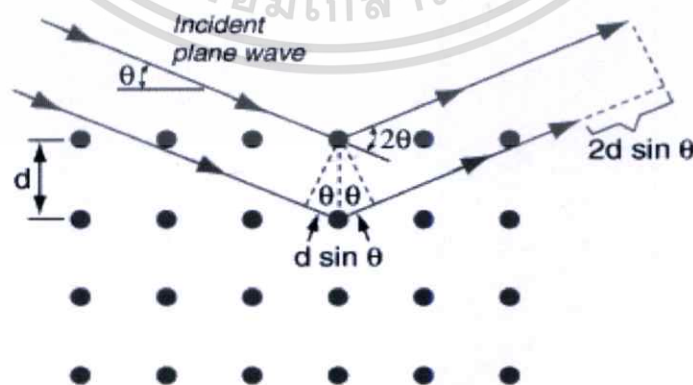
### 2.7.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) [32] ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.12

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

(2.12)

เมื่อ  $n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ  
 $\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ



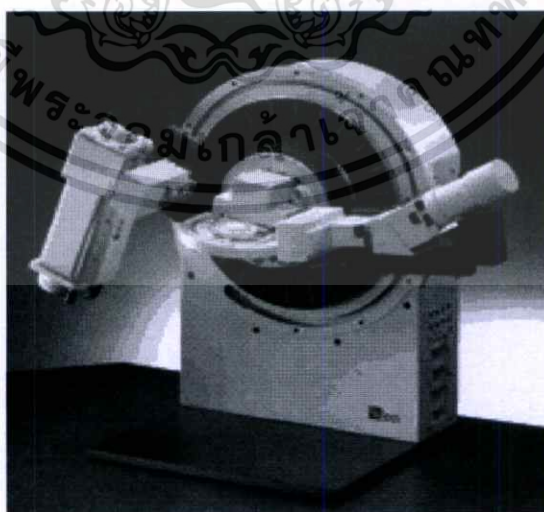
รูปที่ 2.17 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.17 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray diffractometer ดังแสดงดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



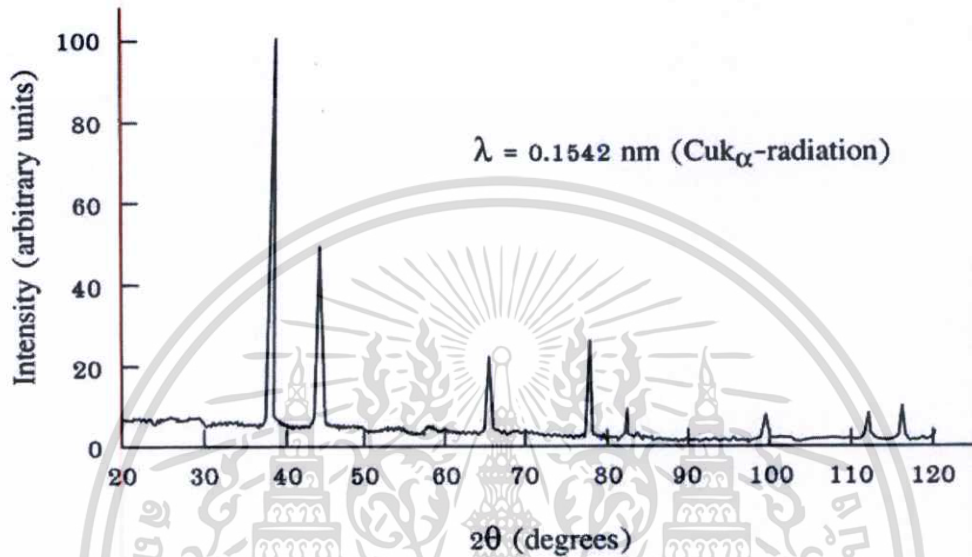
รูปที่ 2.18 เครื่อง X-ray diffractometer



รูปที่ 2.19 ตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) แสดงในรูป 2.20 ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ใน รูปแบบการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant) จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่นคือ  $F$  เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ  $k$  เวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนคือ  $k'$  ดังนั้น

$$F = \int n_G e^{i(\vec{G} + \vec{k} - \vec{k}') \cdot \vec{r}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $n_G$  คือ แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบน

$G$  คือ แลตทิซส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

สามารถหาค่าแลตทิซส่วนกลับได้จากสมการ

$$\vec{G} = \vec{k}' - \vec{k} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$|\bar{k}'| = |\bar{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.15)$$

จะได้

$$|G|^2 = \bar{G} \cdot \bar{G} = (\bar{k}' - \bar{k}) \cdot (\bar{k}' - \bar{k}) \quad (2.16)$$

$$|G|^2 = 2|k|^2 - 2\bar{k}' \cdot \bar{k} \quad (2.17)$$

$$|G|^2 = 4\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \cos 2\theta) \quad (2.18)$$

เมื่อ  $2\theta$  คือมุมระหว่าง  $\bar{k}$  และ  $\bar{k}'$  แก่สมการหาค่า  $\lambda$  จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|G|} \sin \theta \quad (2.19)$$

และจากสมการการหาค่าของ  $|G|^2$ 

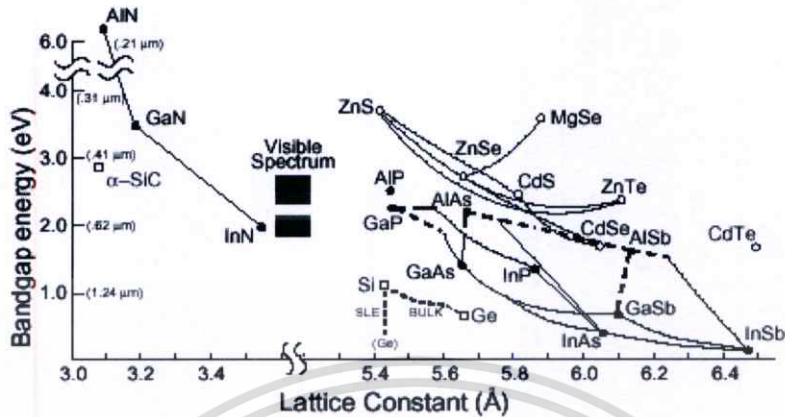
$$|G|^2 = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.20)$$

จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซเป็น

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่แลตทิซ $\lambda_x$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ $\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน

## Technologically Accessible Photonic Materials



รูปที่ 2.21 ค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

ขนาดของเม็ดผลึก (Grain size) จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K \lambda_X}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.22)$$

- เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเม็ดผลึก  
 $K$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ( $0.89 \leq K \leq 0.94$ )  
 $\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน  
 $\beta_{2\theta}$  คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-Maximum of the diffraction peak : FWHM)  
 $\lambda_X$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

### 2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope : EM) เครื่องแรกสร้างขึ้นในปี ค.ศ.1930 โดย Manfred Von Ardenne ลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบโดยทั่วไประหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope : OM) มีความคล้ายคลึงกันแต่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีความซับซ้อนกว่ามาก และตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาต้องมีการเตรียมต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือ ตัวอย่างต้องแห้งและนำไฟฟ้า เนื่องจากระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำงานในระบบสุญญากาศและใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพ ดังนั้นถ้าผิวของตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนตกค้างอยู่บนผิวของตัวอย่างทำให้เกิด charging effects ถ้าอิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนไปจากบริเวณดังกล่าวทำให้ไม่สามารถควบคุมความสว่างและไม่สามารถโฟกัสภาพได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ ทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบและมีสนามแม่เหล็กรอบตัวในแนวตั้งฉากในขณะกำลังเคลื่อนที่ ทำให้สามารถบังคับลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้โดยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง จากลักษณะการนำอิเล็กตรอนที่ผ่านระบบเลนส์มาใช้งาน ทำให้แบ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ 2 แบบ คือ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) ใช้ในการส่องดูภาคตัดขวางของตัวอย่าง ซึ่งผ่านการเตรียมเป็นแผ่นบางให้อิเล็กตรอนทะลุผ่านไปตกกระทบฉากเรืองแสง (Fluorescent screen) เกิดภาพขยายที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและสามารถบันทึกรูปถ่ายไมโครกราฟ (Micrograph) ได้โดยตรง

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (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 cathode ray tube (CRT)

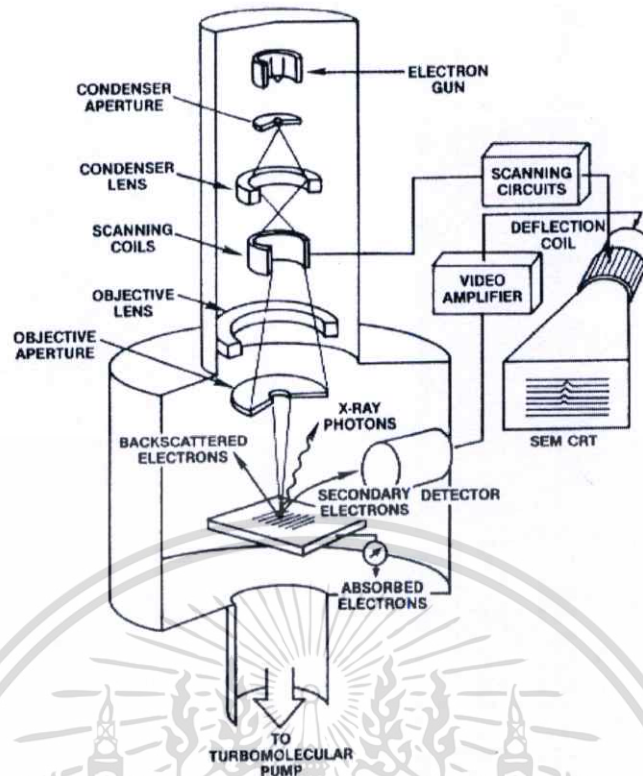
การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์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

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์นี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก  $\text{CaF}_2$  และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ไบแอสศักดาไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกวาดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกวาดบนพื้นผิวนี้นี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกวาดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT โดกว่าพื้นที่การกวาดบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$



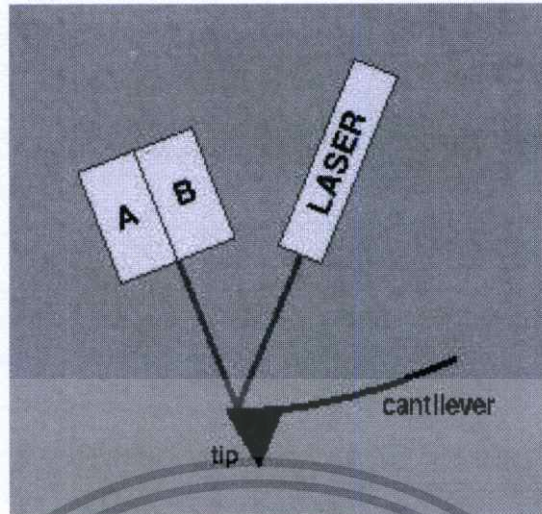
**รูปที่ 2.22** องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกวาดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกวาดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกวาดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกวาดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกวาด แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ดังรูปที่ 2.22

### 2.7.3 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM)

AFM ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโพรบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่โพรบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (Cantilever) ที่สามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน ในช่วงเริ่มแรก AFM ใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน AFM ใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทนดังรูปที่ 2.23 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของ AFM ซึ่งคานสามารถโค้งงอได้ โดยแสงเลเซอร์เดินทางตกกระทบลงบนคานแล้วสะท้อนออกมาตกกระทบลงบนตัวตรวจจับทางแสงสองตัวที่อยู่ติดกัน จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสง A และ B จึงทำให้สามารถวัดการโค้งงอของคานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

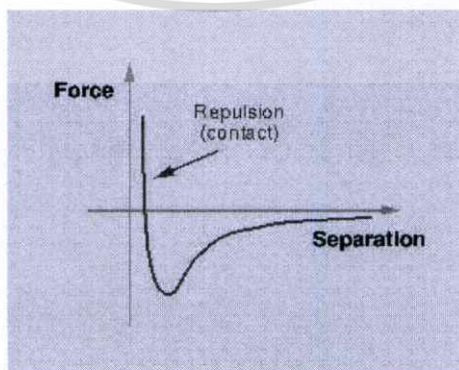


รูปที่ 2.23 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการ โค้งงอของคาน (Cantilever)

การ โค้งงอของคานนั้นเป็นไปตามกฎของฮุค โดยระยะของการ โค้งขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ คำนึงถึงแรงที่กระทำระหว่างปลายเข็มกับตัวชิ้นงานจึงสามารถวัดได้ การเคลื่อนที่ของเข็มหรือ ชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้น ใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิกเปียโซอิเล็กทริก ซึ่งส่วนมากมี ลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่นี้สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอมใน แนวแกน x, y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

#### อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงาน

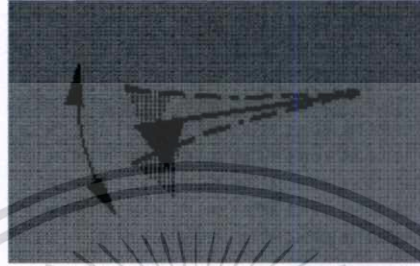
การวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยการใช้อันตรกิริยาที่แตกที่ เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงานต่าง ซึ่งอันตรกิริยาที่ใช้วัดหลักๆมีอยู่ด้วยกันสามวิธี คือ โหมดสัมผัส (contact mode), โหมดสัมผัสแบบตื้น (tapping mode) และ โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)



รูปที่ 2.24 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่าง โมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมคสัมผัส คือ เป็นวิธีการวัดพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปของ AFM ซึ่งเข็มและชิ้นงานมีระยะใกล้กันมากขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน โดยการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นใกล้กันในระดับที่มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น (รูปที่ 2.24) บริเวณที่เกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลคือบริเวณที่เส้นกราฟอยู่เหนือแกน x ปัญหาที่สำคัญของโหมคสัมผัส นั่นคือมีแรงซึ่งมีค่ามากเกิดในแนวตามพื้นผิวขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน



รูปที่ 2.25 ลักษณะการสั่นของคาน

โหมคสัมผัสแบบสั่น เป็น โหมคการทำงานพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กับ AFM ทั่วไป ขณะทำงานคานจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่เหมาะสมและมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน ด้วยการสัมผัสพื้นผิวชิ้นแบบสั่นนี้ทำให้แรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นยังอยู่ในช่วงที่เกิดการผลักระหว่างโมเลกุล เนื่องจากว่าการสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงตามแนวพื้นผิวลดลงขณะที่เข็มลากผ่านพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความอ่อนมาก การวัดด้วยโหมคสัมผัสแบบสั่นจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการวัดด้วยโหมคสัมผัส

โหมคไม่สัมผัส เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพของ AFM ได้ คานต้องอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานต้องไม่ห่างเกินกว่าขอบเขตของแรงผลักระหว่างโมเลกุล โหมคการทำงานนี้สร้างขึ้นได้ยากภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถใช้วัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนผิวหน้าของน้ำได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้า

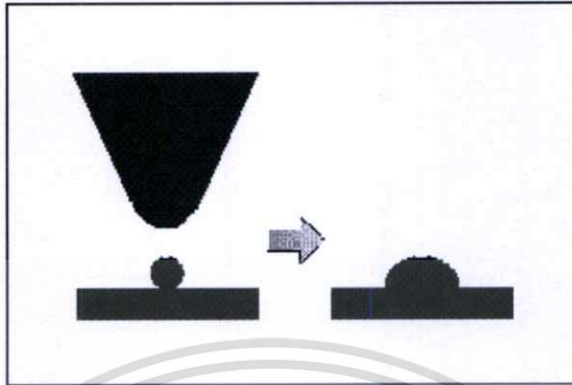
ตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อความละเอียดของการวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM คือความแหลมของปลายหัวเข็มที่ใช้ในการวัด AFM เริ่มแรกหัวเข็มที่ใช้กับ AFM สร้างมาจากเพชรปลายแหลมที่นำไปติดบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยทั่วไปในปัจจุบันหัวเข็มที่ใช้เป็นหัวเข็มที่ผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งหัวเข็มที่ดีที่สุดในตอนนี้ปลายเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 นาโนเมตร ความแหลมของปลายเข็มจำเป็นต้องอธิบายในรูปแบบของตัวแปรผลกระทบเนื่องจากปลายเข็ม ตัวแปรเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากปลายเข็มที่มีต่อภาพ AFM ที่ได้ มีตัวแปรที่สำคัญดังนี้

1.) การขยายออกของภาพ (Broadening)

2.) ผลของแรงกดของปลายเข็ม (Compression)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.) แรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงาน (Interaction forces)
- 4.) มุมตันของปลายเข็ม (Cone angle)

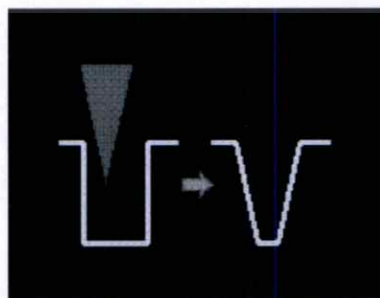


**รูปที่ 2.26** ลักษณะการขยายออกของภาพเมื่อปลายเข็มใหญ่กว่าพื้นผิวที่วัด

การขยายออกของภาพเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของปลายหัวเข็มใหญ่กว่าขนาดของพื้นผิวที่วัด รูปที่ 2.26 แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อปลายเข็มลากผ่านพื้นผิวของชิ้นงาน ด้านข้างของปลายเข็มสัมผัสก่อนที่จะถึงปลายซึ่งระบบจะตอบสนองต่อแรงที่เกิดขึ้นทำให้ภาพที่ได้เกิดการขยายออก

ผลของแรงกดของปลายเข็มเกิดขึ้นเมื่อปลายเข็มลากผ่านพื้นผิว ปรัชญาการณีนี้น่าที่จะพิจารณาว่าเกิดขึ้นเมื่อใด แต่จากการศึกษาชีววิทยา เช่น DNA ที่วัดความกว้างของ DNA จากภาพ AFM พบว่าขึ้นอยู่กับแรงกดของเข็ม เนื่องจากว่าแม้ว่าแรงกดระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานจะมีค่าเพียงนาโนนิวตัน แต่ความกดดันอาจมีค่าถึงเมกกะปาสคาล

แรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงานที่แตกต่างกันทำให้ได้ภาพ AFM ที่แตกต่างกัน ถึงอย่างไรก็ตามทำให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวบางอย่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงานก็ได้ แรงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานก็มีความสำคัญกับการวัด AFM ที่ได้ ดังนั้นการเลือกสารที่ใช้ทำหัวเข็มก็มีความสำคัญเหมือนกัน



**รูปที่ 2.27** แสดงผลลักษณะมุมตันของเข็มที่มีต่อการวัด

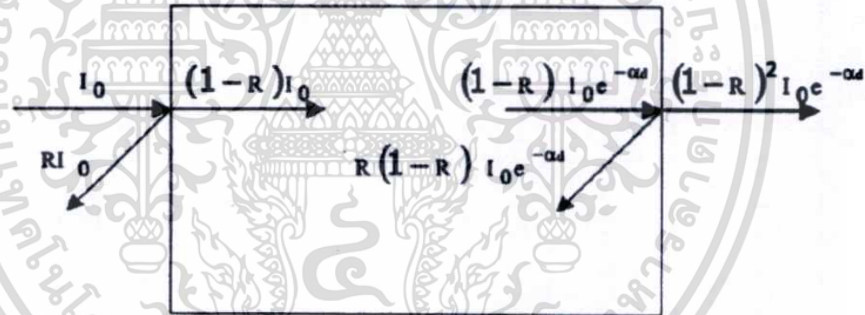
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมตันของปลายเข็มมีความสำคัญต่อการวัดพื้นผิวที่ลักษณะสูงชัน หัวเข็มจากการสร้างด้วยวิธีปลูกด้วยลำอิเล็กตรอนใช้วัดกำแพงที่มีความสูงได้น่าเชื่อถือกว่าใช้หัวเข็มแบบปิรามิด ซึ่งผลกระทบนี้ยืนยันด้วยการทดลองวัดการเสื่อมสลายของเอนไซม์ด้วยวิธี AFM

#### 2.7.4 การศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดการทะลุผ่านของแสง

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำนั้น เราจะทำการวัดวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง ซึ่งจะทำให้เราทราบค่าระดับพลังงานของ localized states และได้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าแถบพลังงานต้องห้าม เนื่องจากทั้งการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานใดๆหรืออยู่ที่ localized states ดูดกลืนแล้วคลายพลังงานที่เปลี่ยนแปลง (transition) ค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีค่าเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมา

เมื่อแสงเดินทางไปที่ตกกระทบวัสดุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุและจะมีแสงบางส่วนเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุ แสงบางส่วนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและจะมีบางส่วนที่ทะลุออกมา ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

- เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ
- $I_r$  คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ
- $I_t$  คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

เราสามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง  $R$  (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืน  $\alpha$  (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง} \quad R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่วัตถุมีค่า

$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R)I_0 \quad (2.24)$$

จากนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง  $d$

ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มขึ้นของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุ คือ

$$I_t = (1-R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.25)$$

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง  $T_t = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.26)$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[ \frac{T_t}{(1-R)^2} \right] \quad (2.27)$

ในกรณีที่สมมติให้แสงส่วนใหญ่สะท้อนเฉพาะผิวหน้าที่รับแสงเท่านั้น ความเข้มขึ้นแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุคือ

$$I_t = (1-R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.28)$$

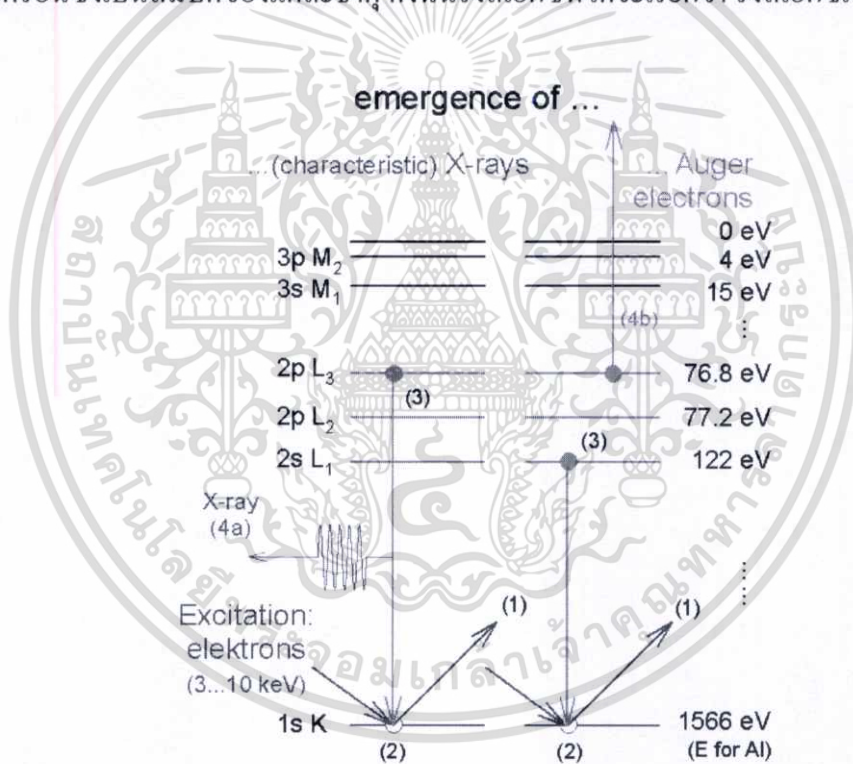
สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง  $T_t = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.29)$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[ \frac{T_t}{1-R} \right] \quad (2.30)$

ในการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่ตกกระทบและทะลุผ่านฟิล์มบางนั้น เราจะใช้ระบบวัด Transmittance Spectroscopy ในการวัด

### 2.7.5 ออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี (Auger Electron Spectroscopy)

เป็นระบบวัดที่อาศัยหลักการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวหรือสเปกตรัมแบบเส้น (spectrum line) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์สูงเคลื่อนที่ไปที่เป้าโลหะและเข้าชนอิเล็กตรอนในชั้นโคจรของอะตอมโลหะที่เป็นเป้า เช่นระดับพลังงานชั้น K, L, M หรือ N เป็นต้น แล้วมีการถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นโคจรที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นและชนะแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร อิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นจะหลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้น ตอนที่อะตอมของธาตุที่เป็นเป้าจะอยู่ในสภาวะเร้าและจะลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะพื้นในเวลาอันสั้น โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่ในวงโคจรชั้นที่ว่างของอิเล็กตรอนพร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระดับพลังงานของสองระดับในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นสมบัติของแต่ละธาตุ ดังนั้นรังสีเอกซ์ที่ได้จะเรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว



รูปที่ 2.29 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

จากรูปที่ 2.28 อธิบายได้ว่า

- (1) เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์ สูงชนอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น K ทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น K หลุดออกมา เรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า photoelectron (2) ทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น K เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานชั้น L จะเข้ามาแทนที่
- (3) พร้อมให้รังสีเอกซ์ขึ้น คือรังสีเอกซ์ชั้น K (K-shell X-ray) (4) รังสีเอกซ์นี้แทนที่จะหลุดออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

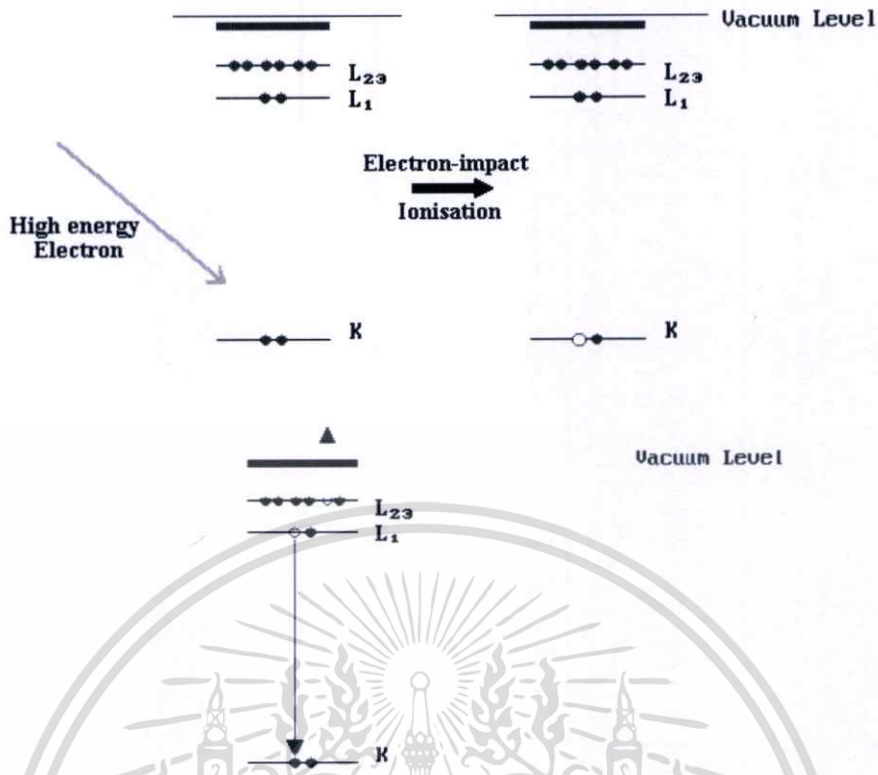
แต่กลับไปเกิดอัตรากิริยากับอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น L อีก (5) อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น L จะหลุดออกไปเรียกว่า Auger electron อิเล็กตรอนจากพลังงานชั้น M จะเข้ามาแทนที่พร้อมทั้งปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมาเป็น L-shell X-ray

อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น L, M และ N เข้ามาแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น K พร้อมทั้งปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวออกมา จะได้รังสีเอ็กซ์กลุ่มชุดชั้น L (L-series line spectrum) จะเรียกว่า  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$  และ  $K_{\gamma}$  ตามลำดับ

อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น M และ N เข้ามาแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น L พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวออกมา จะได้รังสีเอ็กซ์กลุ่มชุดชั้น L (L-series line spectrum) และเรียกว่า  $L_{\alpha}$  และ  $L_{\beta}$  ตามลำดับ

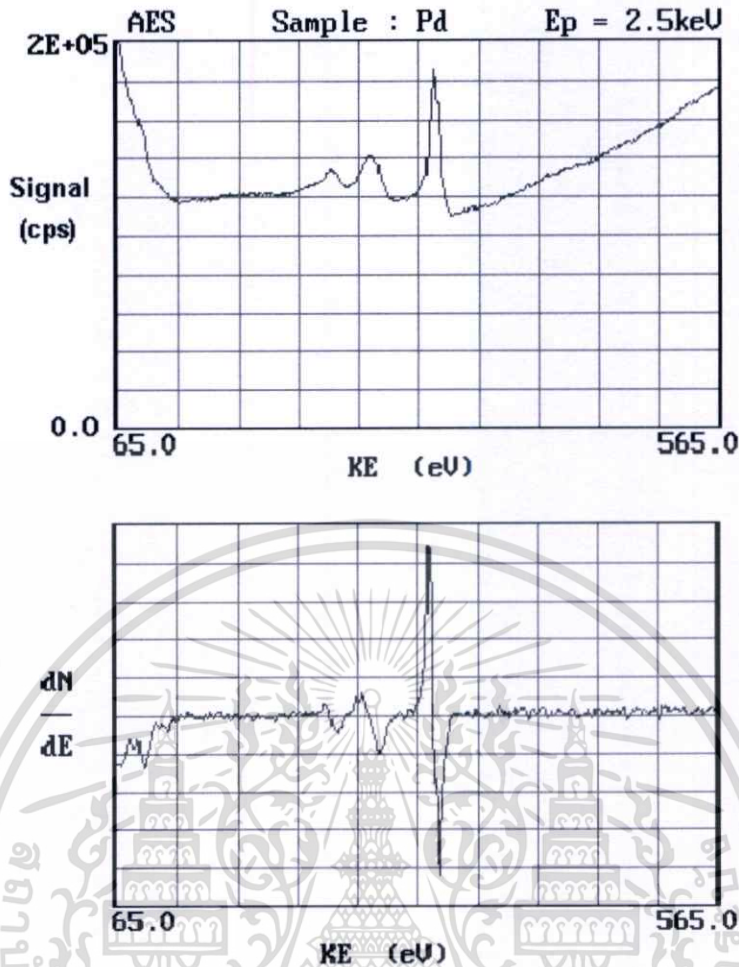
อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น N เข้ามาแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น M พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวออกมา จะได้รับรังสีเอ็กซ์กลุ่มชุดชั้น M (M-series line spectrum) และเรียกว่า  $M_{\alpha}$

ออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1960 โดย Pierre Auger นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron beam) ในการตรวจสอบบริเวณผิวของวัสดุของแข็ง อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาจากกระบวนการออเจอร์ถูกวิเคราะห์และคำนวณค่าพลังงานจลน์ของมัน คุณลักษณะและปริมาณของอิเล็กตรอนคำนวณจากพลังงานจลน์และความเข้มของสเปกตรัมที่ได้ โดยทั่วไปกระบวนการเกิดออเจอร์อิเล็กตรอนเกิดขึ้นลึกจากพื้นผิวประมาณ 5-50 อังสตรอม ผลอันนี้ทำให้ AES เป็นเทคนิคที่ค่อนข้างไวต่อลักษณะพื้นผิว ถ้าอิเล็กตรอนที่โฟกัสได้อย่างละเอียดสามารถสแกนเพื่อสร้างอิเล็กตรอนทุติยภูมิและภาพของออเจอร์และสามารถระบุตำแหน่งเพื่อแสดงการวิเคราะห์ตัวอย่างในระดับจุลภาค AES สามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์สมบัติของสาร วิเคราะห์ข้อบกพร่อง วิเคราะห์ฟิล์มบาง และคุณลักษณะเฉพาะสำหรับสารกึ่งตัวนำและฟิล์มบางที่ใช้ในโรงงาน



รูปที่ 2.30 การเกิด Auger spectrum ของทองแดง

Auger electron หรืออิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเหมือนรังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่มีค่าพลังงานที่จำเพาะของแต่ละระดับพลังงานของแต่ละธาตุด้วย อย่างไรก็ตาม Auger electron สเปกตรัมค่อนข้างซับซ้อนมากกว่าสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ เช่น พีกของรังสีเอกซ์  $L_{\alpha}$  และ  $L_{\beta}$  ของ Cu สามารถจะเห็นได้ชัด เนื่องจากอิเล็กตรอนได้หลุดออกไปจากชั้นระดับพลังงาน  $L_2$  และ  $L_3$  จากนั้นจะเห็นพีกที่เกิดจาก Auger electron รูปที่ 2.31 แสดง Auger spectrum ของทองแดงเนื่องจากอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน M จะลงมาแทนที่ว่างในระดับพลังงานชั้น  $L_2$  หรือ  $L_3$  และทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้น M ที่สูงขึ้นหลุดออกไป



รูปที่ 2.31 Auger spectrum ของทองแดง

### 2.7.6 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุชนิดของสารและใช้ในการวิเคราะห์โมเลกุลของสาร โดยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลที่คล้ายกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แต่จะมีข้อดีที่ได้เปรียบที่สำคัญกว่าคือ ไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากและบางครั้งก็สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้เลยโดยไม่ต้องผ่านการเตรียมตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์สารที่อยู่ในภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะใสได้แก่แก้วหรือพลาสติก หรือสารละลายที่อยู่ในน้ำ

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากได้ชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ โดยการผ่านคลื่นแสงเอกรงค์ไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตร คลื่นแสงเมื่อชนกับโมเลกุลแล้ว ถ้าเป็นการชนกันแบบยืดหยุ่น จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนมีพลังงานเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงดังกล่าวเรียกว่า “การกระเจิงแบบเรย์ลี” (Rayleigh scattering) แต่ถ้าการชนนั้นเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น จะได้คลื่นแสงที่

กระเจิงหลังจากการชนที่มีพลังงานสูงหรือต่ำกว่าพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงดังกล่าวเรียกว่า “การกระเจิงแบบรามาน” (Raman scattering)

ปรากฏการณ์รามานแบบปกติสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแผนเดิม(classical wave theory) โมเมนต์ไฟฟ้า  $m$  ในพันธะโมเลกุลถูกเหนี่ยวนำ เมื่อโมเลกุลนี้อยู่ในสนามของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า  $E$  โมเมนต์  $m$  ซึ่งแปรผันตรงกับสนาม ดังนั้น

$$m = \alpha E \quad (2.30)$$

$\alpha$  เป็นสภาพมีขั้วได้ (polarizability) ของพันธะ ซึ่งเป็นการวัดความผิดปกติของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของโคไซน์ สามารถเขียนได้เป็น

$$E = E_0 \cos 2\pi\nu t \quad (2.31)$$

$E_0$  คือแอมพลิจูดสูงสุด และ  $\nu$  คือความถี่

สภาพมีขั้วจะเปลี่ยนไปเมื่อโมเลกุลที่มีสองอะตอมเกิดการสั่นแบบยืด สภาพมีขั้วจึงขึ้นกับระยะห่างระหว่างอะตอม  $r$  และมีความถี่ขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างอะตอมเพิ่มและมีความถี่ลดลงเมื่อพันธะหดสั้น ระหว่างที่โมเลกุลมีการสั่น สภาพมีขั้วได้ของพันธะจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นจังหวะด้วยอัตราเร็วที่กำหนดค่าอนุพันธ์ย่อย (partial derivative) ของสภาพมีขั้วได้เป็นฟังก์ชันระยะทาง  $\partial\alpha / \partial r$  สภาพมีขั้วได้ขณะใดขณะหนึ่งเขียนแทนด้วย

$$\alpha = \alpha_0 + (\partial\alpha / \partial r)r_0 \cos 2\pi\nu_m t \quad (2.32)$$

เมื่อ  $r_0$  ระยะสมดุระหว่างอะตอม  $\alpha_0$  สภาพมีขั้วได้ของพันธะที่ระยะนี้  $\nu_m$  ความถี่โมเลกุลที่มีการสั่น เมื่อแทนสมการที่ 2.32 ลงในสมการ 2.30 จะได้

$$m = |\alpha_0 + (\partial\alpha / \partial r)r_0 \cos 2\pi\nu_m t| E_0 \cos 2\pi\nu t \quad (2.33)$$

$$m = \alpha_0 E_0 \cos 2\pi\nu t + (\partial\alpha / \partial r)r_0 \cos 2\pi\nu_m t E_0 \cos 2\pi\nu t \quad (2.34)$$

จาก

$$\begin{aligned} m &= \alpha_0 E_0 \cos 2\pi\nu t + (\partial\alpha / \partial r)r_0 E_0 \cos 2\pi(\nu + \nu_m) \\ \cos x \cos y &= \frac{1}{2} \cos(x + y) + \cos(x - y) \\ &+ \frac{1}{2} (\partial\alpha / \partial r)r_0 E_0 \cos 2\pi\nu t (-\nu_m) \end{aligned} \quad (2.35)$$

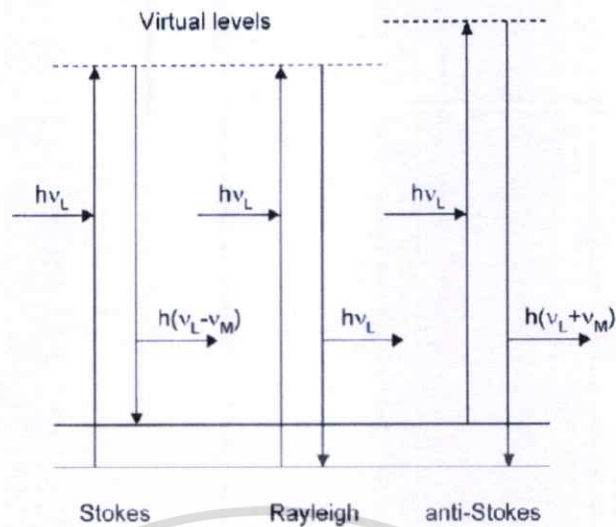
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบโมเมนต์ไฟฟ้าในส่วนของทอมแรกคือ การกระเจิงแบบเรย์ลีที่มีความถี่  $\nu$  ของลำรังสีที่ชน ทอมที่สองและสามเป็น โมเมนต์ไฟฟ้าของรังสีที่ถูกกระเจิงขณะที่ความถี่ของรังสีที่ชนถูกมอดูเลตมีค่า  $\pm \nu_m$  หรือความถี่การสั่นของพันธะ ความถี่ของรังสีที่ชนจึงเปลี่ยนไปโดยความถี่ของโมเลกุลที่มีการสั่นทำให้เห็นแถบรามานเส้นรามานจะเกิดเมื่อสภาพมีขั้วได้ของพันธะเปลี่ยนไปเมื่อระยะห่างของอะตอมเปลี่ยนนั้นคือ  $\partial\alpha/\partial r$  ไม่เป็นศูนย์ถ้าพันธะเป็นแบบ active raman

ทฤษฎีอนุภาค(the particle theory) จากทฤษฎีคลื่นจะได้เส้นสโตกส์และแอนติสโตกส์ที่มีความเข้มเท่ากัน แต่ในความเป็นจริงเส้นสโตกส์มีความเข้มมากกว่า ทฤษฎีคลื่นจึงไม่สามารถอธิบายอัตราส่วนความเข้มของรังสีแอนติสโตกส์ต่อสโตกส์ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงต้องหันมาใช้ทฤษฎีอนุภาคและกลศาสตร์ควอนตัมในการอธิบายดังกล่าว

ความเข้มของการกระเจิงแบบรามานมีค่าประมาณ  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  เท่าของคลื่นแสงตกกระทบโมเลกุล จึงทำให้การตรวจวัดเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้คลื่นแสงที่มีความเข้มแสงสูง โดยในการวัดโดยเทคนิครามานนี้จะใช้คลื่นแสงจากแสงเลเซอร์ และการกระเจิงแบบรามานเกิดจากคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียว ไปชนโมเลกุลและเกิดการกระเจิงจนทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้น ไปอยู่ที่ระดับพลังงานกึ่งสถานะเร้า(virtual state หรือ quasi-excited state) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างสถานะพื้น และสถานะเร้า แล้วกลับสู่ระดับพลังงานสถานะพื้น จากนั้นจะเกิดการกระเจิงแบบรามาน โดยสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจะเป็นสเปกตรัมที่มีความถี่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- เส้นสโตกส์(Stoke line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่คลื่นแสงเลเซอร์ ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับ โมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นของระดับพลังงานการสั่น( $V=0$ ) เป็นผลทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลง ส่วนโมเลกุลที่ได้รับพลังงานจาก โฟตอนจะอยู่ในสถานะเร้าและกลับลงมาสู่ระดับพลังงาน  $E_0$  ให้พลังงาน  $E_{ST}$  ซึ่งเป็นพลังงานของเส้นสโตกส์
- เส้นแอนติสโตกส์(Anti-stoke line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับ โมเลกุลที่อยู่ในสถานะเร้าของระดับพลังงานการสั่น( $V=1$ ) ทำให้โฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุล ซึ่งผลที่เกิดขึ้นคือโมเลกุลกลับลงสู่สถานะพื้น  $E_0$  และโฟตอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ให้พลังงาน  $E_{AST}$  ซึ่งเป็นพลังงานของเส้นแอนติสโตกส์



รูปที่ 2.32 ระดับพลังงานในการเกิดรามานสเปกตรัม

โดยสรุปคือกลไกของการเกิดอินฟราเรดและรามานสเปกตรัมเกิดจากการสั่นของโมเลกุล แต่แตกต่างกันตรงกลไกการสั่นของโมเลกุล โมเลกุลที่เกิดการสั่นและมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ภายใน โมเลกุลจะดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลนั้นและทำให้อิเล็กตรอนของโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนพลังงานจากระดับพลังงานสถานะพื้นไปยังสถานะเร้าจึงได้อินฟราเรดสเปกตรัม ส่วนรามานสเปกตรัมนั้นเกิดจากโมเลกุลเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) อันเนื่องมาจากการกระจายของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนรอบๆพันธะเคมีในโมเลกุลตามด้วยการกระเจิงแสงขณะกลับมาสู่สถานะพื้น ซึ่งโมเลกุลที่บิดเบี้ยวนี้เป็นผลจากการที่โมเลกุลถูกโพลาไรซ์และเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นมาชั่วคราว สภาพขั้วจะหายไปเมื่อโมเลกุลนั้นปลดปล่อยคลื่นแสงออกมา (relaxation) ซึ่งการกระเจิงแสงขึ้นอยู่กับว่าในโมเลกุลนั้นมีพันธะเคมีที่สามารถจะถูกทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปจากตำแหน่งสมดุลมากน้อยเพียงใด จึงกล่าวได้ว่าการโพลาไรซ์ของพันธะเคมีมีผลต่อการกระเจิงและทำให้เกิดการเลื่อนของสเปกตรัมรามาน (Raman shift) มากกว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ ซึ่งสเปกตรัมรามานสามารถใช้ศึกษาสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ได้โดย

### 1. สเปกตรัมรามานในการวิเคราะห์สารอนินทรีย์ (Raman spectra of Inorganic Species)

เทคนิครามานที่ใช้วิเคราะห์สารอนินทรีย์นั้นเป็นเทคนิคที่เหนือกว่าเทคนิคอินฟราเรด เนื่องจากสามารถหาพลังงานการสั่นของพันธะลิแกนด์ซึ่งอยู่ในช่วง 1000 ถึง 700 ต่อเซนติเมตร วิธีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รามานยังใช้หาค่าประกอบ โครงสร้าง ความเสถียร ของสารเชิงซ้อน และสเปกตรัมที่เกิดจากพันธะโลหะกับออกซิเจน

## 2. สเปกตรัมรามานในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ (Raman spectra of organic Species)

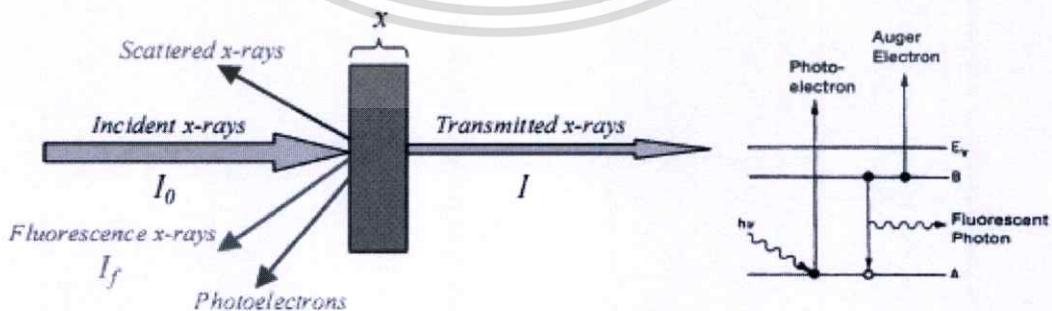
เทคนิครามานที่ใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้หาข้อมูลรูปแบบของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ความเข้มในการสั่นแบบยืดของพันธะสองของโอเลฟิน หรืออนุพันธ์ของไซโคลโอเลฟินในช่วง 700 ถึง 1200 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเกิดจากการที่นิวเคลียสไอเคลื่อนเข้าและออกแบบสมมาตรเทียบกับวงตรงกลาง เป็นต้น

### 2.7.7 การวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีเอกซ์ (X-ray Absorption Spectroscopy)

หลักการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์ เมื่อรังสีเอกซ์ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 0.3-4 อังสตรอม (พลังงานในช่วง 3 ถึง 40 keV) ตกกระทบสารตัวอย่าง เมื่ออะตอมในสารได้รับรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนหรือค่า Work function ของสารนั้น อิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นใน (core-level electron) ของอะตอม เช่น อิเล็กตรอนในชั้น K-shell L-shell หรือ M-shell จะถูกปลดปล่อยออกมา พลังงานที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของสาร การหาค่าพลังงานที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นหาได้จากการวัดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่พลังงานตกกระทบค่าต่างๆ ดังรูป 2.34 รูปแบบการวัดแสดงในรูปที่ 2.33 โดยสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนหาได้จาก

$$\ln(I_0/I) = \mu x$$

เมื่อ  $\mu$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเชิงเส้น ซึ่งขึ้นอยู่กับเลขอะตอมและความหนาแน่นของตัวอย่าง ส่วน  $x$  เป็นความหนาของฟิล์ม

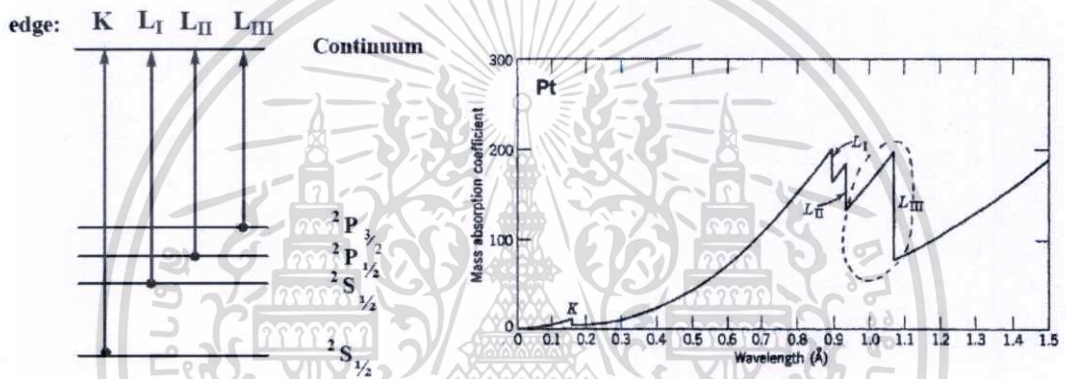


รูปที่ 2.33 เทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์

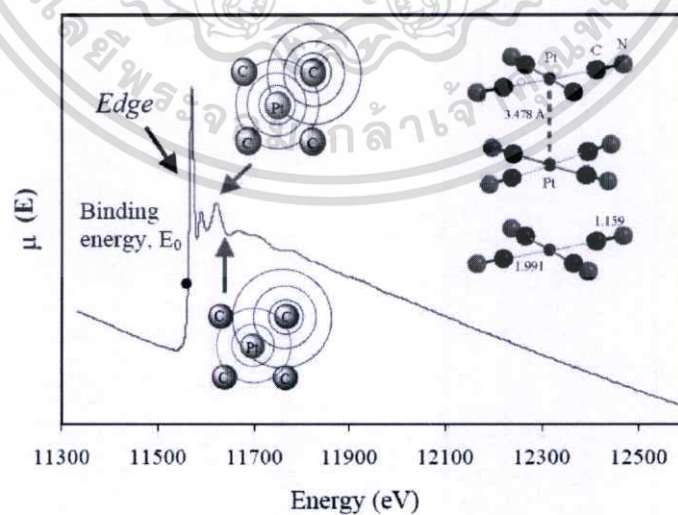
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.34 แสดงระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้นอะตอมของแพลตินัม พลังงานที่ถูกดูดกลืนจะสัมพันธ์กับพลังงานพันธะในชั้น  $K, L_I, L_{II}, L_{III}, M$  ซึ่งสอดคล้องกับการกระตุ้นอิเล็กตรอนจาก  $1s (S_{1/2}^2), 2s (S_{1/2}^2), 2p (P_{1/2}^2), 2p (P_{3/2}^2), 3s (S_{1/2}^2), \dots$  ตามลำดับ เมื่อโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม คลื่นโฟโตอิเล็กตรอนที่กระจายออกไปจะสะท้อนกับอะตอมข้างเคียง ในรูปที่ 2.35 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของแพลตินัมที่ระดับพลังงาน  $L_{III}$  การแกว่งของสเปกตรัมหลังขอบการดูดกลืนสอดคล้องกับการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างกันระหว่างคลื่นโฟโตอิเล็กตรอนที่กระจายออกกับที่สะท้อนกลับมา

### การวิเคราะห์สเปกตรัมของ XANES



รูปที่ 2.34 แสดงระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้นอะตอมของแพลตินัม

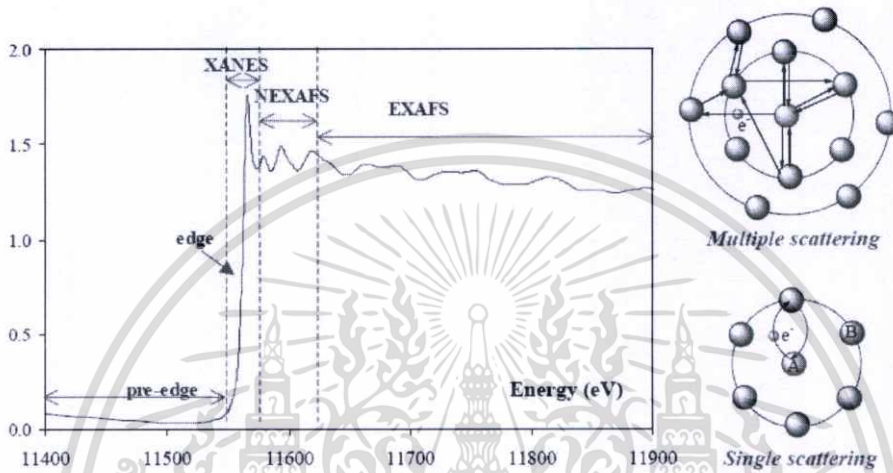


รูปที่ 2.35 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของแพลตินัมที่ระดับพลังงาน  $L_{III}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมของการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์สามารถแยกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.36 ได้แก่

- 1) (pre-edge) เป็นช่วงก่อนการดูดกลืน
- 2) (XANES) หรือ NEXAFS เป็นช่วงที่นับจากตำแหน่งขอบการดูดกลืนถึงตำแหน่งที่ห่างจากขอบการดูดกลืน 50 eV
- 4) extended x-ray absorption fine structure (EXAFS) เป็นสเปกตรัมที่ถัดจาก NEXAFS



รูปที่ 2.36 การแยกสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ

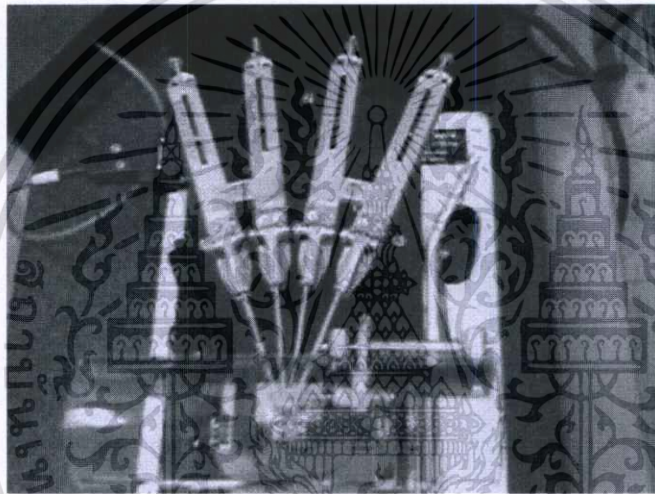
สำหรับเทคนิคการวัด XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงาน โฟตอนที่ตกกระทบ การใช้พลังงานไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในระดับชั้นในของอะตอม จะต้องมีค่าน้อยเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยว เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นถึงพลังงานยึดเหนี่ยว เกิดขอบของการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับระดับพลังงานย่อยของอะตอม (K,L,M)

ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมของ XANES ร่วมกับการคำนวณแบบ first principle ทำให้ทราบถึงตำแหน่งของอะตอมข้างเคียง ระยะห่างระหว่างอะตอมและมุมของอะตอมที่สร้างพันธะกัน สเปกตรัมที่ได้จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับสมบัติทางเคมี เช่นการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กตรอนในชั้นวาเลนซ์หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation state) ผลของการรีโซแนนซ์เนื่องจากการกระเจิงแบบซ้อนกัน (multiple scattering resonance) ทำให้สเปกตรัมของ XANES มีลักษณะเด่นขึ้นมา เมื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณสามารถเข้าถึงลักษณะภายใน โครงสร้างอะตอมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.8 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น (Linear 4 point probes)

เป็นวิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด แต่มีปัญหาอยู่บ้างคือปัญหาที่จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่าง ๆ ดังนั้น วิธี 4 ขั้วในแนวเส้นตรงนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งด้านให้กระแสเข้าออกจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าสารตัวอย่างซึ่งเป็นโลหะแข็ง โดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตน มีลักษณะเส้นเล็กและแหลมวางเป็นแนวเส้นตรงระยะห่างกัน จัดให้ห่างเท่ากันหมดหรือบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไม่เท่ากันในบางกรณี ที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน ลักษณะของหัววัดทั้ง 4 ขั้วเชิงเส้นดังแสดงดังรูปที่ 2.37 เป็นตัวอย่างอันหนึ่งของรูปหัววัด ซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่าๆกัน



รูปที่ 2.37 ตัวอย่างหัววัดซึ่งยึดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ในแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่าๆกัน



รูปที่ 2.38 เครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้น (Linear 4 point probes)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้ซึ่งค่าค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ พอลจะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากตามหลักการวิเคราะห์จริงๆแล้วจะใช้การหาศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการปัวซอง (poisson's equation) ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้จากสูตรการคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าความจำเพาะโดยทั่วไปนั้นจะคำนวณได้จากกระแสที่ทำการให้เข้าไปในสารตัวอย่าง และทำการวัดศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปมีข้อจำกัดในการวัดกระแสจะต้องให้มีลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานจำเพาะด้วยวิธีการใช้หลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้นสูตรการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความเหมาะสมดังจะแสดงให้เห็นต่อไป

ในการวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้นนี้มีขั้วจำกัดอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ กล่าวคือ

1. ขั้วทั้ง 4 จะต้องมิลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันหมด ลวดที่ใช้ทำเป็นขั้วจะต้องเป็น โลหะที่มีความต้านทานน้อย
2. สารตัวอย่างตรงบริเวณขั้วทั้ง 4 ที่วางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณไม่เกินรูกลวงด้านใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งวงกลม (demisphere)

โดยอาศัยหลักแห่งไฟฟ้าสถิตเมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่างจะสามารถหาศักย์ที่เกิดขึ้นภายในตัวสารอย่างในระยะ  $r$  ใดๆได้

$$V = \frac{K}{r} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $r$  คือระยะใดๆที่หาศักย์ไฟฟ้าเทียบกับจุดที่ให้กระแสและ  $K$  คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของกระแสที่ฉีดเข้าไปและรูปร่างของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในได้จาก

$$E = -\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) = \frac{K}{r^2} \quad (2.37)$$

เนื่องจากขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 อยู่ไม่ห่างกันมาก ดังนั้นจึงคิดได้ว่าการไหลของกระแสจะมีค่าสม่ำเสมอจากความสัมพันธ์เบื้องต้นจะได้ความหนาแน่นของกระแส  $J$  คือ

$$J = qn\mu E \quad (2.38)$$

โดยคิดว่า  $\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) = 0$  หมายความว่าความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการแพร่ร้อยละมาก และสมมติว่าที่ระยะ  $r$  โดยกำหนดให้  $n$  คือ ความหนาแน่นของพาหะ,  $\mu$  คือ ความคล่องตัวของพาหะและ  $q$  คือ ประจุไฟฟ้า

สมการที่ (2.38) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของความต้านทานจำเพาะจะได้ว่า

$$J = \left(\frac{E}{\rho}\right) \quad (2.39)$$

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า การกระจายของกระแสจะมี ลักษณะเป็นครึ่งวงกลม ดังนั้นสามารถหากระแสรวมทั้งหมด  $i$  คือ

$$i = J * A = \left(\frac{E}{\rho}\right) * 2\pi r^2 \quad (2.40)$$

เมื่อ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของครึ่งทรงกลมรัศมี  $r$   
นำสมการ (2.37) แทนลงใน (2.40) จะได้ค่าคงที่  $K$  คือ

$$K = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \quad (2.41)$$

และนำค่า  $K$  นี้แทนลงไปนสมการ (2.36) จะได้

$$V = \left(\frac{\rho I}{2\pi r}\right) \quad (2.42)$$

สมการที่(2.42)เป็นสมการพื้นฐานสำหรับใช้หาค่าความต้านทานจำเพาะแบบขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว ที่คิดว่าสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่และหนามาก แต่ถ้านำมาใช้กับสารตัวอย่างที่มีความบางมากๆ  $w$  จะต้องใช้สมการที่แก้ไขแล้วดังนี้

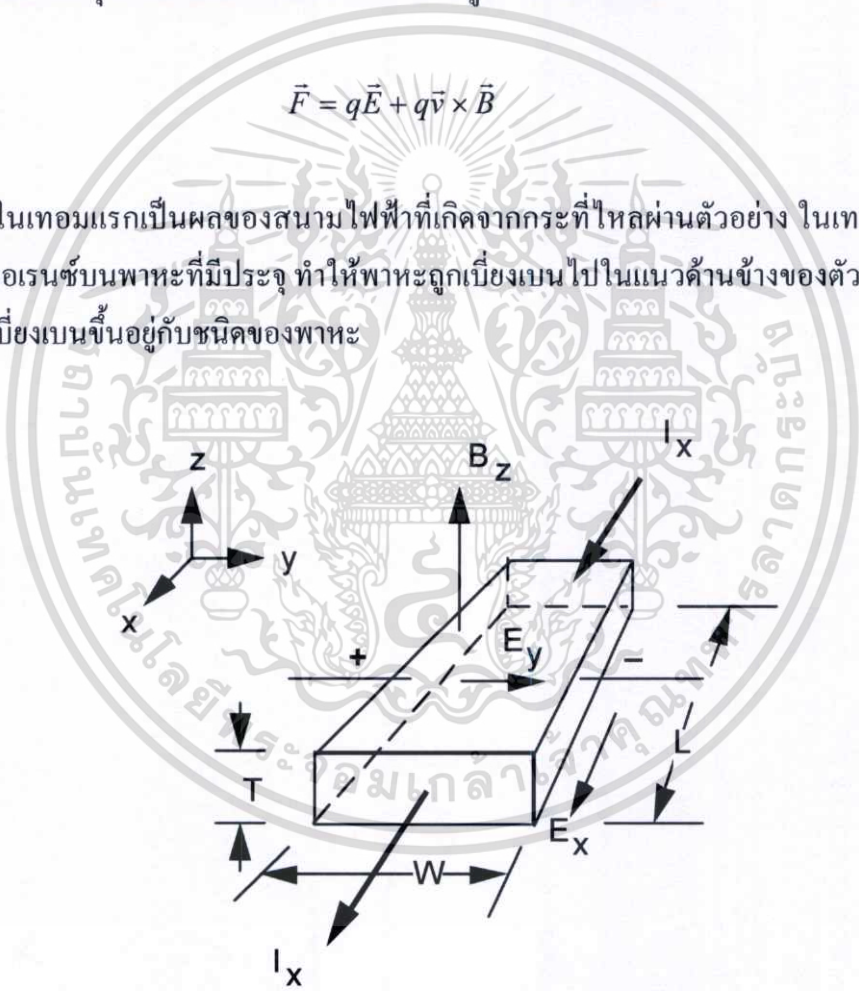
$$V = \left(\frac{\rho I \ln 2I}{\pi W}\right) \quad (2.43)$$

### 2.7.9 ปปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

ปรากฏการณ์ของฮอลล์เป็นปรากฏการณ์ที่นำมาใช้ในการหาสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ โดยเฉพาะสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของพาหะในวัสดุ ค่าความคล่องตัวของพาหะในวัสดุ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าในวัสดุ อาศัยหลักการที่ว่า เมื่อจ่ายกระแสให้กับสารกึ่งตัวนำแล้วให้สนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมในแนวตั้งฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็กดังกล่าว แรงดันดังกล่าวเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Voltage) จุดเริ่มต้นของศักย์ไฟฟ้าฮอลล์สามารถพิจารณาได้จากแรงกระทำบนพาหะที่มีประจุในสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตามรูปที่ 4.38 ตามสมการ

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.44)$$

ในเทอมแรกเป็นผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวอย่าง ในเทอมที่สองเกิดจากแรงลอเรนซ์บนพาหะที่มีประจุ ทำให้พาหะถูกเบี่ยงเบนไปในแนวด้านข้างของตัวอย่าง ทิศทางของการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะ



รูปที่ 2.39 รูปแบบการวัดฮอลล์

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าในแกน x สนามแม่เหล็กที่จ่ายให้อยู่ในทิศแกน z สมมติว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี สนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นอยู่ในทิศของแกน y องค์ประกอบของแรงในแกน y หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_y = qE_y - qv_x B_z \quad (2.45)$$

สมการนี้แสดงว่า พาหะทั้งหมดที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวอย่างจะเกิดแรงที่จะผลักดันไปทางด้านข้างด้านหนึ่ง ในกรณีนี้โฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง -y

ถ้าจำนวน โฮลถูกรวมทางด้านขวาของตัวอย่าง ด้านดังกล่าวจะมีประจุเป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านซ้ายเกิดสนามไฟฟ้าในทิศของแกน +y สังเกตว่าสนามไฟฟ้าที่มีเฉพาะในแกน x แรงเนื่องจากสนามภายในจะตรงข้ามกับแรงลอเรนซ์เพื่อที่จะรักษาการไหลของกระแสให้คงที่เราต้องมีการสมดุลแรงตามสมการ

$$F_y = v_x B_z \quad (2.46)$$

กรณีไม่มีแรงสุทธิบนพาหะในทิศของแกน y สนามภายในจะทำให้โฮลเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ไปทางขวาเท่านั้น

ถ้ามีสนามภายในสามารถพิจารณาได้จากการวัดแรงดันตกคร่อมตัวอย่าง

$$E_y = \frac{V_y}{w} \quad (2.47)$$

เมื่อ w เป็นความกว้างของตัวอย่าง

พาหะเคลื่อนที่เข้าไปในสนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เรียกว่าความเร็วลอยเลื่อน

(drift velocity) กระแสโฮลสามารถเขียนได้ว่า

$$I_p = qp v_d A \quad (2.48)$$

เมื่อ +q เป็นประจุโฮล p เป็นความหนาแน่นของโฮล  $v_d$  เป็นความเร็วลอยเลื่อน และ A เป็นพื้นที่หน้าตัด ถ้าเรากลับสมการให้อยู่รูปของเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแส ที่มีขนาด  $J = I/A$  และมีทิศทางขนานกับความเร็วลอยเลื่อน จะได้ว่า

$$\vec{J}_p = qp \vec{v}_d \quad (2.49)$$

ความเร็วลอยเลื่อนสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าผ่านค่าคงที่ที่เรียกว่าค่าความคล่องตัว (mobility)

$$\vec{v}_d = \mu_p \vec{E} \quad (\text{สำหรับโฮล}) \quad \vec{v}_d = \mu_n \vec{E} \quad (\text{สำหรับอิเล็กตรอน}) \quad (2.50)$$

แทนค่าในสมการที่ (2.49)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} \quad (\text{สำหรับโฮล}) \quad \vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} \quad (\text{สำหรับอิเล็กตรอน}) \quad (2.51)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad E_y = v_x B_z = \frac{J_x}{qp} B_z = R_H J_x B_z \quad (2.52)$$

เมื่อ  $R_H = 1/qp$  คือสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient) และ  $R_H = -1/qn$  สำหรับตัวอย่างชนิดเอ็น

เราสามารถขยายรูปแบบที่ใช้พิจารณาปรากฏการณ์ของฮอลล์ เมื่อมีทั้งพาหะที่เป็นประจุบวกและประจุลบ

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (2.53)$$

### การประยุกต์ใช้งาน

#### 1) การหาค่าความเข้มข้นของการเจือ

จากสมการที่ (2.52) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B} = \frac{(V_y/W)}{(IB/WT)} = \frac{TV_y}{IB} \quad (2.54)$$

จะเห็นได้ว่า เราสามารถวัดความต่างศักย์ฮอลล์ สนามแม่เหล็ก กระแสและความหนาของตัวอย่างชิ้นงานได้ เพื่อนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ของตัวอย่างชนิดต่างๆ จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นในการเจือ ชนิดของตัวอย่าง

#### 2) Mobility

ถ้ามีการวัดความต้านทานเชิงแผ่น R เราสามารถนำไปคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะได้

จาก

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{ดังนั้น} \quad \rho = \frac{RWT}{L} = \frac{V_x / I_x}{L/WT} \quad (2.55)$$

$$\text{ค่าความนำ} \quad \sigma = 1/\rho = q\mu_p p$$

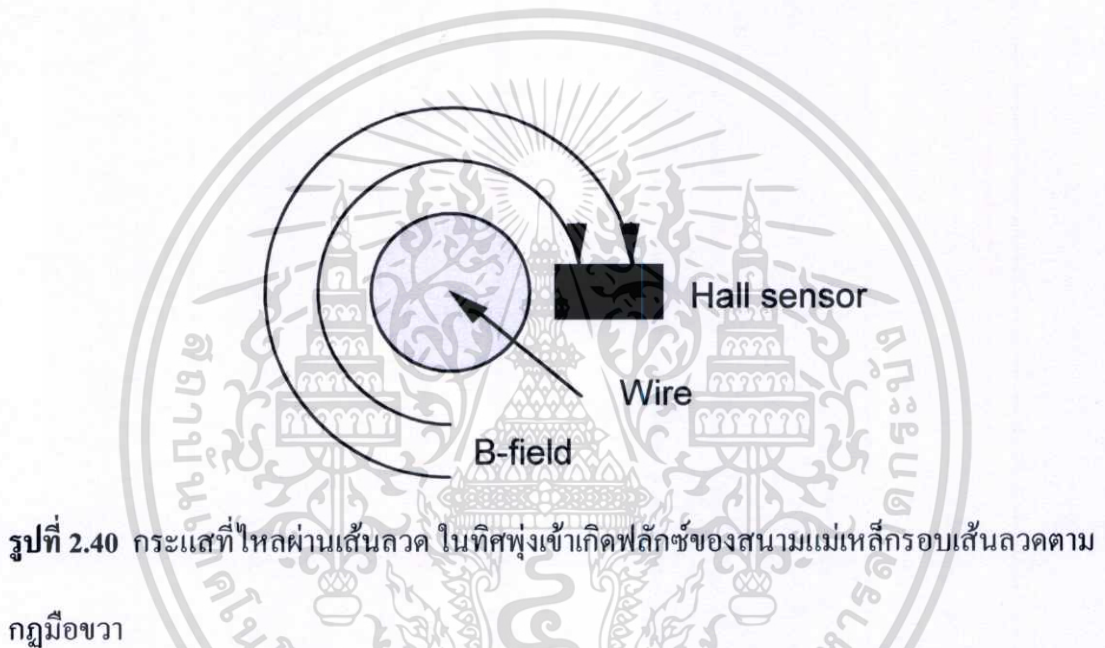
โดย  $\mu_p$  เป็นค่าความคล่องตัวของพาหะ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ กับค่าความต้านทานจำเพาะ

## 3) Current measurement

การนำปรากฏการณ์ของฮอลล์ไปประยุกต์ใช้อีกด้านหนึ่งก็คือ เป็นตัวตรวจวัดกระแส ทั้งกระแสดีซีและเอซี ที่ไหลผ่านเส้นลวดตามรูปที่ 4.40 ซึ่งจะเกิดสนามแม่เหล็กเท่ากับ

$$B = \frac{\mu_0 I_w}{2\pi r} \quad (2.56)$$

เมื่อ  $I_w$  เป็นกระแสที่ไหลผ่านเส้นลวด และ  $r$  เป็นระยะในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเส้นลวด ถ้าอุปกรณ์ในการวัดฮอลล์ถูกวางใกล้เส้นลวดและมีกระแสค่าคงที่  $I_s$  ไหลผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นโดยเส้นลวดจะสร้างความต่างศักย์ฮอลล์  $V_y$  ในอุปกรณ์วัด



จากสมการที่ (2.54) หา  $B$  ได้จาก

$$B = \frac{TV_y}{I_s R_H} \quad (2.57)$$

จากสมการ (2.56), (2.57) หากระแสได้จาก

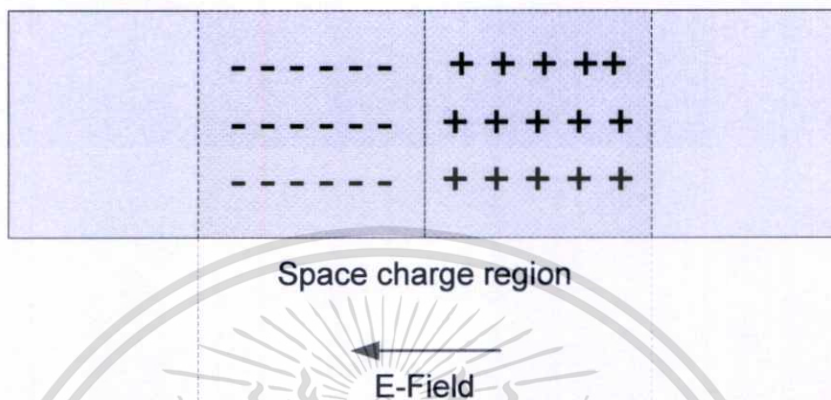
$$I_w = \frac{2\pi V_y T}{\mu_0 I_s R_H} \quad (2.58)$$

ดังนั้น ถ้าเราทราบลักษณะของตัวตรวจวัดและระยะห่างของอุปกรณ์วัดกับเส้นลวดและการวัดความต่างศักย์ฮอลล์ เราสามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านเส้นลวดได้ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่รบกวนระบบ (non invasive)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.10 การหาศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อโดยวิธีการวัดค่าความจุที่ขึ้นกับแรงดัน

พิจารณากรณีรอยต่อพีเอ็น (pn-junction) บริเวณเขตปลอดพาหะตรงรอยต่อเกิดจากระดับพลังงานเฉลี่ยในชั้นพีและชั้นเอ็นไม่เท่ากัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนผ่านรอยต่อจนถึงจุดสมดุล ความกว้างของรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการเจือ



รูปที่ 2.41 การเกิด space charge ของรอยต่อชนิดพีเอ็น

ศักย์ไฟฟ้าภายในหาได้จาก

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \tag{2.59}$$

ศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของการเจือ โดยทั่วไปการเจือสารเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นจะมีการเจือในระดับ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ความกว้างของเขตปลอดพาหะคำนวณได้จาก

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[ \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \tag{2.60}$$

กรณีที่มีสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการไบแอส ความกว้างของเขตปลอดพาหะคำนวณได้จาก

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V_R)}{e} \left[ \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \tag{2.61}$$

สำหรับค่าความจุของรอยต่อ หาได้จาก

$$C = \left\{ \frac{e\epsilon_s N_a N_d}{2(V_{bi} + V_R)(N_a + N_d)} \right\}^{1/2} \tag{2.62}$$

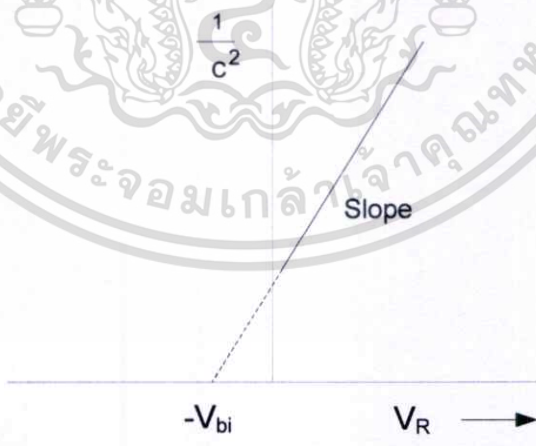
กรณีที่มีการเจือสารด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้าน ความกว้างของเขตปลอดพาหะด้านที่มีการเจือสูงจะมีแนวโน้มลดลง ถ้ามีการเจือมากๆ (heavy doped) เช่น  $(N_a \gg N_d)$  เกิดรอยต่อด้านเดียว ซึ่งพบว่า มีลักษณะคล้ายรอยต่อแบบชอตต์กี โดยคำนวณความความกว้างของเขตปลอดพาหะได้จาก

$$W = \left\{ \frac{e\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{eN_d} \right\}^{1/2} \tag{2.63}$$

ค่าความจุของรอยต่อ หาได้จาก

$$C = \left\{ \frac{e\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/2} \tag{2.64}$$

$$\left(\frac{1}{C}\right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e\epsilon_s N_d} \tag{2.65}$$



รูปที่ 2.41 การหาศักย์ไฟฟ้าตรงรอยต่อจากกราฟค่าความจุกับแรงดันไบเอส

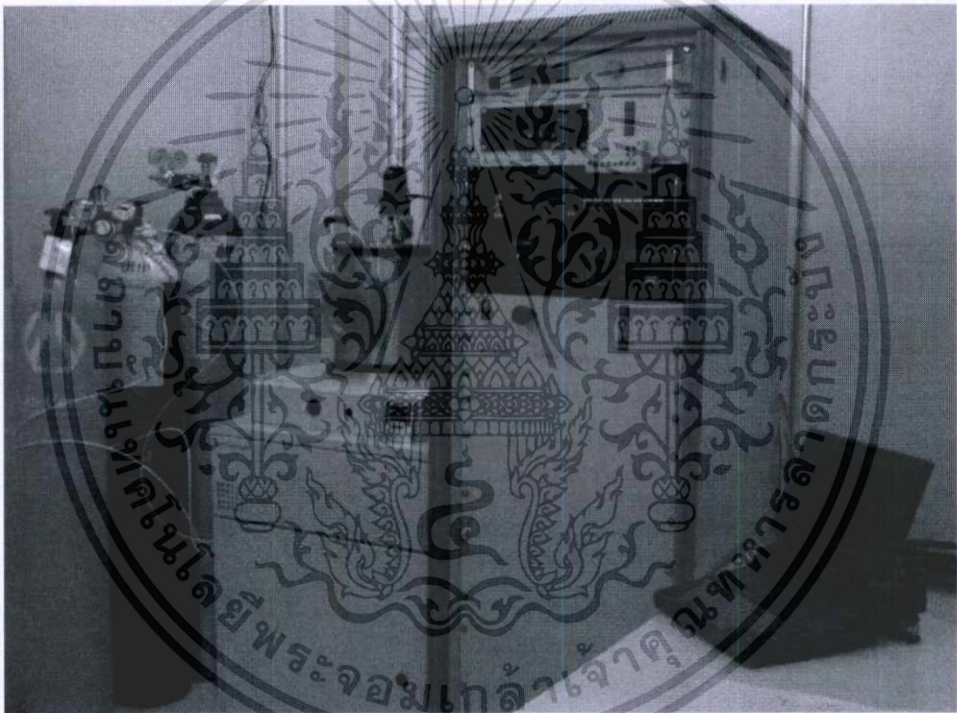
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การเตรียมระบบปลูกฟิล์มบาง

ฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์สำหรับงานวิจัยนี้ปลูกโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงของ Adward รุ่น Auto 500 โดยมีการปรับปรุงระบบเล็กน้อยเพื่อใช้ในการศึกษาการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่าเทคนิคควบคุมเวลาก๊าซ โดยระบบสามารถควบคุมการไหลของก๊าซไวปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ อาร์กอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงแสดงในรูปที่ 3.1

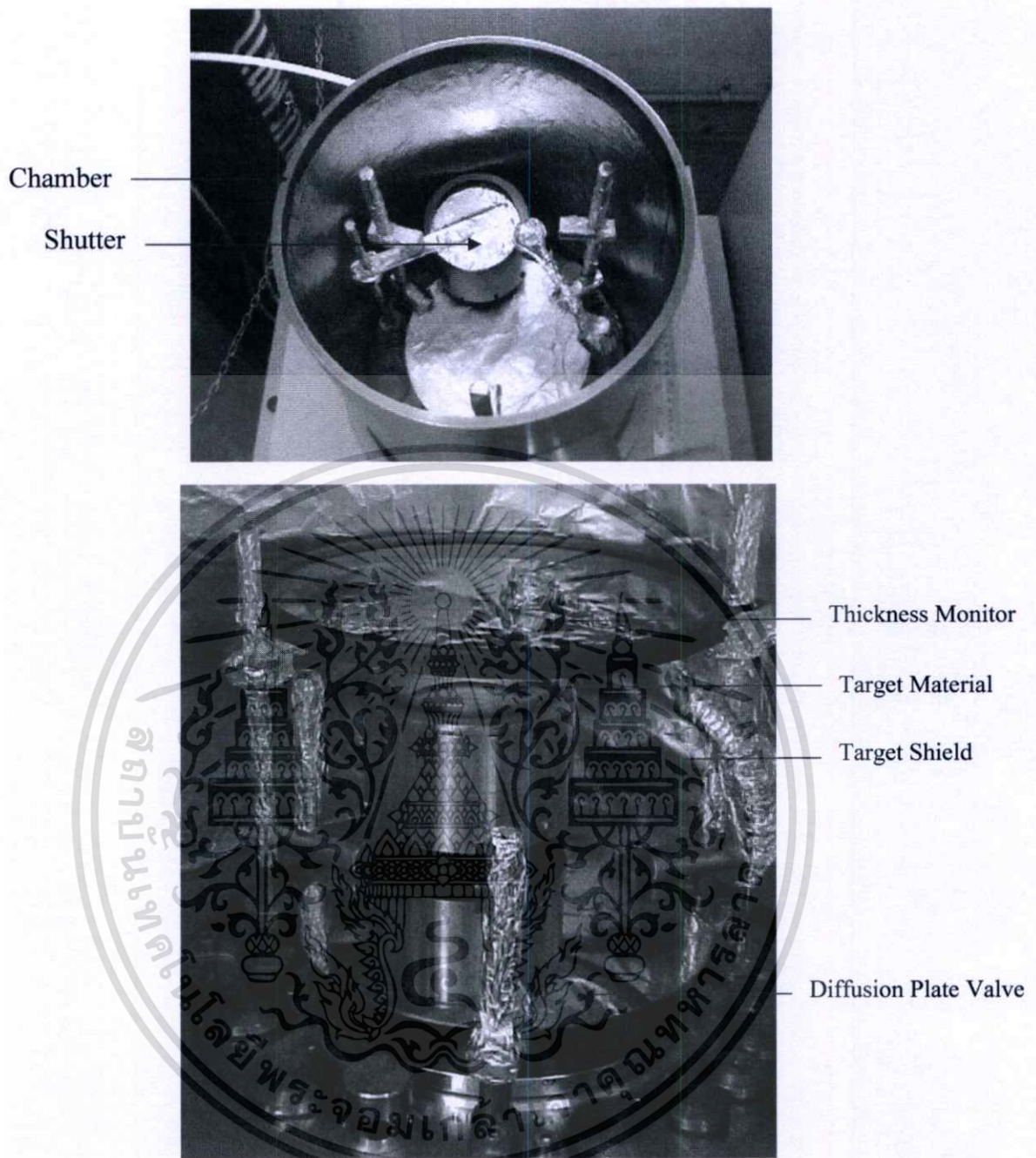


รูปที่ 3.1 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

##### 3.1.1 ห้องสุญญากาศ

ทำมาจากเหล็กสแตนเลส สามารถทนต่อความดันสุญญากาศ  $10^{-7}$  มิลลิบาร์ (mbar) ได้ดี ภายในติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วย หัวแมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering head) สำหรับวางเป้าสารเคลือบ (target material) ขนาด 3 นิ้ว อุปกรณ์ติดตั้งฐานรองรับ (substrate holder) อุปกรณ์เปิด-ปิดเป้าสารเคลือบ (shutter) และอุปกรณ์วัดความหนาของฟิล์ม (thickness monitor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลักษณะการวางอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศ

### 3.1.2 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วย

1. ปั๊มกลโรตารี (Rotary pump: Edward; RV12) ใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึงความดันประมาณ  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ หลักการอย่างง่ายคือ ก๊าซหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวของลูกสูบ ทำให้ก๊าซในห้องสุบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอก ก๊าซจะถูกขับออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pump; E04K) สามารถทำความดันตั้งแต่  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-10}$  มิลลิบาร์ จะเห็นว่าปั๊มไอฟุ้งกระจายไม่สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ความดันบรรยากาศ จึงต้องใช้งานร่วมกับปั๊มกลโรตารี ใช้หลักการการเคลื่อนย้ายก๊าซโดยการต้มน้ำมันให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า จนน้ำมันเดือดเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามช่องท่อกลวง ไอน้ำมันจะปะทะเข้ากับช่องเจ็ตที่บังคับทิศทางลงด้านล่างในมุมและระดับความสูงต่าง ๆ กันซึ่งมีการระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นตลอดเวลา ไอน้ำมันจะถูกฉีดออกมาจากท่อเจ็ตอย่างรุนแรงปะทะเข้ากับโมเลกุลของก๊าซที่บริเวณตอนบน ทำให้โมเลกุลของก๊าซภายในห้องสุญญากาศเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง โมเลกุลของก๊าซที่มาอยู่ด้านล่างจะทำให้ความดันของก๊าซส่วนล่างมากกว่าส่วนบน แล้วใช้ปั๊มกลโรตารีดึงโมเลกุลของอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจายต่ออีกทีหนึ่ง

3. เกจพิรานี (pirani gauge) ใช้วัดความดันอยู่ในช่วงความดันบรรยากาศถึง  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ ภายในเกจพิรานีมีเส้นลวดซึ่งเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าอุณหภูมิของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากความร้อนถูกพาไปโดยโมเลกุลของก๊าซที่มาปะทะ การสูญเสียความร้อนจะมากที่ความดันสูง ที่ความดันต่ำอุณหภูมิของลวดจะสูงขึ้นค่าความต้านทานของลวดก็จะสูงขึ้นด้วย ความต้านทานของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ วัดได้โดยใช้วงจรวีตสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge)

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



รูปที่ 3.3 ระบบปั๊มสุญญากาศประกอบด้วยปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) เกจพิรานี (pirani gauge)

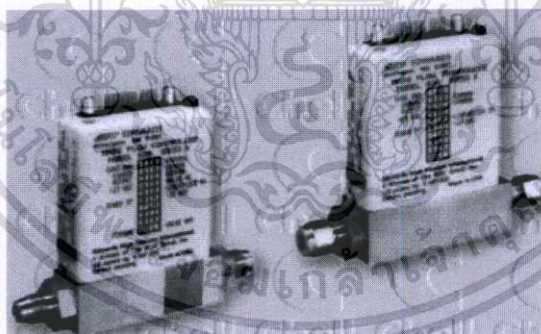


ข) เกจเพนนิง (penning gauge)

รูปที่ 3.4 เกจวัดความดันในระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

### 3.1.3 ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ

สำหรับงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมก๊าซ 3 ชนิด ได้แก่ อาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน ก๊าซที่ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศจะผ่านชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (mass flow controller) และชุดควบคุมเวลาในการปล่อยก๊าซ (gas-timing control) เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซได้ในช่วง 0-20 sccm/min

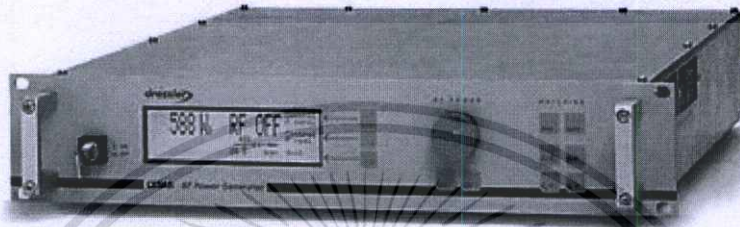


รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ยี่ห้อ EDWARDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุของระบบปลุกฟิล์มแบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดคลื่นวิทยุ (RF Generator: CESAR 136) ความถี่ 13.56 MHz มีกำลังเอาต์พุตสูงสุด 600 วัตต์ (Watts) ดังรูปที่ 3.6 อุปกรณ์ประกอบได้แก่ชุดปรับแมตซิงอัตโนมัติ (Auto matching box) สำหรับปรับอิมพีแดนซ์ของเอาต์พุตให้เหมาะสมกับโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามลักษณะการเกิดพลาสมา



รูปที่ 3.6 เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุขนาด 600 วัตต์ (model CESAR 136).

### 3.2 การเตรียมฐานรองรับ

ฐานรองรับที่ใช้สำหรับปลุกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ ได้แก่ แผ่นแก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glass) ซิลิกอน (silicon wafer) และพลาสติกชนิดพีอีที (Polyethylene terephthalate; PET)

โดยในการทำความสะอาดแผ่นแก้วมีกระบวนการดังนี้

- 1) ล้างกระจกด้วยน้ำไร้ประจุให้น้ำยาล้างคราบไขมันหมดไป
- 2) กัดออกไซด์และสิ่งปนเปื้อนบนผิวกระจกด้วย PIRANHA process ( $H_2SO_4 : 30\% H_2O_2 = 4 : 1$ ) เป็นเวลา 30 นาที
- 3) ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- 4) เป่าด้วยไนโตรเจนให้แห้ง
- 5) อบที่อุณหภูมิ 120 องศา ประมาณ 30 นาที

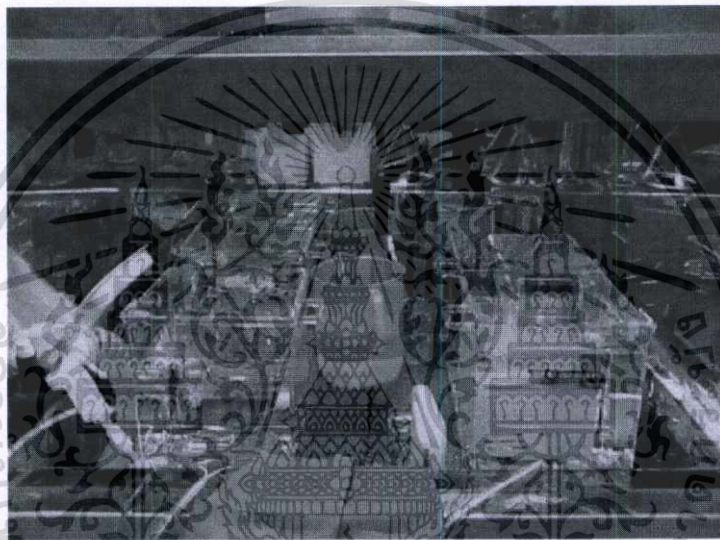
การทำความสะอาดฐานรองรับที่เป็นซิลิกอนมีกระบวนการดังนี้

- 1) ล้างแผ่นซิลิกอนด้วยน้ำไร้ประจุเพื่อกำจัดฝุ่นออกให้หมด
- 2) กัดชั้นออกไซด์และสิ่งปนเปื้อนบนผิวด้วยกระบวนการ PIRANHA ( $H_2SO_4 : 30\% H_2O_2 = 4 : 1$ ) ที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 30 นาที
- 3) ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- 4) เป่าด้วยไนโตรเจนให้แห้ง
- 5) อบที่อุณหภูมิ 120 องศา ประมาณ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำความสะอาดฐานรองรับที่เป็นพลาสติกมีกระบวนการดังนี้

- 1) ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
- 2) ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- 3) เป่าด้วยไนโตรเจนให้แห้ง
- 4) ทำความสะอาดด้วยเมทานอลและไอโซโพรพานอลตามลำดับในอัลตราโซนิกอย่างละ 5 นาที
- 5) เป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- 6) อบในตู้อบสุญญากาศ ประมาณ 30 นาที



รูปที่ 3.7 ตู้ทำความสะอาดในกระบวนการล้างด้วยกระบวนการ PIRANHA

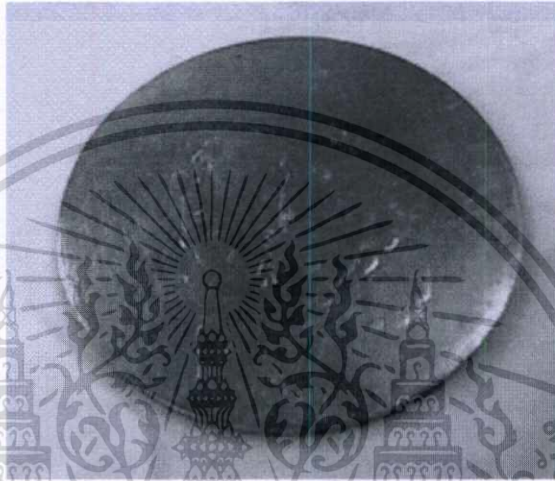


รูปที่ 3.8 การอบแผ่นฐานรองรับในตู้อบที่อุณหภูมิ 120 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การปลูกฟิล์มบางอินเดียม (Indium thin film growth)

ในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปวิเคราะห์สำหรับการอ้างอิงในการปลูกและวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดซ์ในไตรด์ในเงื่อนไขต่างๆ โดยทำการปลูกฟิล์มบางอินเดียมบนฐานรองรับที่เป็นกระจกที่ความหนา 800 นาโนเมตร ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน อัตราการไหลของก๊าซ 10 sccm ใช้เป้าสารเคลือบอินเดียม (Indium target; Kurt J. Lesker) ความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา 3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เป้าสารเคลือบอินเดียมสำหรับการปลูกฟิล์มบาง

เริ่มจากติดตั้งฐานรองรับบนฐานวาง (holder) ในห้องสุญญากาศ จากนั้นทำการปั๊มระบบจนความดันในห้องสุญญากาศอยู่ในระดับ  $10^{-7}$  mbar ซึ่งพร้อมที่จะทำการปล่อยก๊าซเข้าห้องสุญญากาศเพื่อสร้างพลาสมา ก่อนการปลูกฟิล์มต้องทำความสะอาดผิวหน้าของเป้าสารเคลือบโดยการปิดชุดเตอร์บนเป้าสารเคลือบ ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ จากนั้นเปิดระบบกำเนิดคลื่นวิทยุ โดยใช้กำลังของควมถี่วิทยุอยู่ที่ 100 วัตต์ เพื่อสร้างพลาสมา ไอออนของก๊าซอาร์กอนที่แตกตัวออกมาจะพุ่งชนผิวเป้าสารเคลือบ วิธีนี้จะช่วยทำให้ออกไซด์ที่เกิดอยู่บนผิวเป้าสารเคลือบหลุดออกไป จากนั้นเปิดชุดเตอร์เพื่อทำการสเปดเป้าสารอินเดียมให้เกิดเป็นฟิล์มบางบนฐานรองรับ โดยมีการหมุนฐานรองรับด้วยความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มอินเดียม

System	RF Magnetron Sputtering System
Target	99.999% Indium target, 3" diameter
Substrate	Borosilicate glass, Si
Substrate holder speed	30 rpm
Target to substrate distance	70 mm
Base pressure	$9 \times 10^{-7}$ mbar
RF power	100 w
Ar Gas flow rate	10 sccm
thickness	800 nm

### 3.4 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมไนไตรด์ อินเดียมออกไซด์ และอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ (InN, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and InON films growth)

#### 3.4.1 การปลูกฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์ (InN growth)

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์นั้นมียุ่ด้วยกัน 2 เงื่อนไข ได้แก่

- เงื่อนไขแรกปลูกฟิล์มในบรรยากาศของไนโตรเจนและอาร์กอน โดยกำหนดให้เวลาการปล่อยก๊าซไนโตรเจนคงที่ เปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอน เท่ากับ 1, 2, 4 วินาที ตามลำดับ
- เงื่อนไขที่สองปลูกฟิล์มในบรรยากาศของไนโตรเจนและอาร์กอน โดยกำหนดให้เวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนคงที่ เปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซไนโตรเจน เท่ากับ 10, 20, 30 วินาที ตามลำดับ

ทั้งสองเงื่อนไข กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 10 sccm เท่ากัน ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนและไนโตรเจนต่างกัน

sample	Condition 1			Condition 2		
	N <sub>2</sub> -flow rate (sccm)	Ar-frow rate (sccm)	Ar:N <sub>2</sub> timing	N <sub>2</sub> -flow rate (sccm)	Ar-frow rate (sccm)	Ar:N <sub>2</sub> timing
1	10	10	1:10	10	10	1:10
2	10	10	2:10	10	10	1:20
3	10	10	4:10	10	10	1:30

### 3.4.2 การปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ growth)

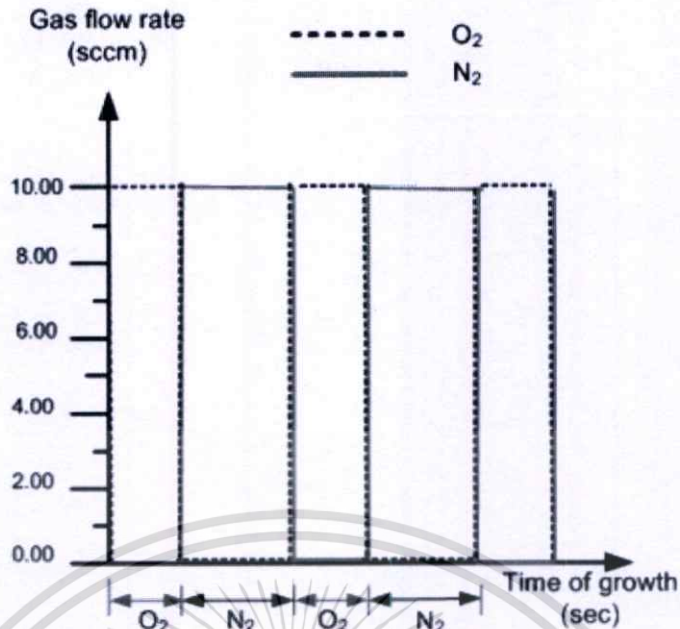
ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ปลูกในบรรยากาศของออกซิเจนและอาร์กอน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอาร์กอนเท่ากับ 10 sccm ทำการควบคุมเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 1s : 10s เพื่อใช้เป็นฟิล์มอ้างอิงในการปลูกฟิล์มในเงื่อนไขต่างๆ

### 3.4.3 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ (InON growth) โดยการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา (gas-timing control)

ในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนปริมาณอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนที่ทำปฏิกิริยากับอินเดียม ซึ่งจะทำให้สมบัติของฟิล์มที่ได้เปลี่ยนไป ในการเตรียมฟิล์มบางนั้น หลังจากทำการปั๊มระบบสุญญากาศแล้ว ทำการควบคุมก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนที่ใช้เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา (reactive) ก๊าซทั้งสองจะถูกควบคุมอัตราการไหลโดย mass flow controller เงื่อนไขในการปลูกฟิล์มแสดงในตารางที่ 3.3 โดยให้อัตราการไหลของก๊าซให้อยู่ที่ 10 sccm ควบคุมเวลาเปิดและปิดก๊าซผ่านระบบคอมพิวเตอร์ ลำดับการปล่อยก๊าซไวปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 3.11 การปลูกฟิล์มบางในทุกๆ เงื่อนไขไม่มีการให้อุณหภูมิแก๊สฐานรองรับในขณะที่ปลูก (substrate temperature) และหลังจากปลูกฟิล์ม (annealing)

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ในการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา

<b>System</b>	RF Magnetron Sputtering System
<b>Target</b>	99.999% Indium target, 3" diameter
<b>Substrate</b>	Borosilicate glass, Si
<b>Substrate holder speed</b>	30 rpm
<b>Target to substrate distance</b>	70 mm
<b>Base pressure</b>	$9 \times 10^{-7}$ mbar
<b>RF power</b>	100 w
<b>Gas flow rate (<math>\text{O}_2:\text{N}_2</math>)</b>	10:10 sccm
<b>thickness</b>	800 nm
<b>Gas timing (<math>\text{O}_2:\text{N}_2</math>) sec</b>	<b>10:30, 20:30, 30:30</b>



รูปที่ 3.10 โดอะแกรมการควบคุมเวลาแก๊สไว้ปฏิบัติการในการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์

#### 3.4.4 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ด้วยกำลังของคลื่นวิทยุต่างกัน

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของกำลังคลื่นวิทยุต่างกันตามตารางที่ 3.4 อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนเท่ากับ 10 sccm ควบคุมอัตราการปล่อยแก๊สออกซิเจนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:30 ฟิล์มที่ได้นำไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ วิธีการกระเจิงแบบรามาน วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคเออร์อีเล็กตรอน

ตาราง 3.4 พารามิเตอร์ในการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ด้วยกำลังคลื่นวิทยุต่างกัน

Base pressure	$9 \times 10^{-7}$ mbar
RF power	50 w, 100 w, 120 w, 150 w
Gas flow rate (O <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> )	10:10 sccm
Gas timing (O <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> ) sec	10:30
Substrate	Borosilicate, Si
thickness	800 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 การปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์บนฐานรองรับที่ต่างกัน

ในการศึกษาผลของฐานรองรับที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์นั้น จะทำการปลูกฟิล์มบนฐานรองรับ 3 ชนิด ได้แก่ กระจกชนิดโบโรซิลิเกต ฐานรองรับซิลิกอน และ ฐานรองรับพลาสติก เงื่อนไขการปลูกดังตารางที่ 3.5

ก่อนการปลูกฟิล์มจะต้องทำความสะอาดผิวหน้าของเป่าสารเคลือบทุกครั้งในบรรยากาศของอาร์กอน เนื่องจากออกไซด์ที่ผิวจะทำให้สมบัติของฟิล์มบางเปลี่ยนไป การเกิดออกไซด์ที่ผิวมากขึ้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ผิวของเป่าสารเคลือบอยู่ในอากาศ หรือระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์มในเงื่อนไขที่มีการปล่อยก๊าซออกซิเจน โดยเฉพาะเป่าสารเคลือบที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน การพิจารณาความสะอาดของผิวเป่าสารเคลือบสังเกตได้หลายทางประกอบกัน เช่น ดูจากค่าต่างๆ ที่วัดได้จากแหล่งกำเนิดความถี่วิทยุ ซึ่งได้แก่ ค่าความจุและ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วขณะทำพลาสมา หรือดูจากอัตราการปลูกฟิล์ม โดยเทียบกับการอัตราการปลูกฟิล์มอินเดียมในบรรยากาศของอาร์กอนอย่างเดียว โดยปกติอัตราการปลูกฟิล์มจะสูงมากในกรณีที่มีออกไซด์เมื่อเทียบกับกรณีที่มีชั้นออกไซด์ นอกจากนี้ยังสังเกตได้จากสีของพลาสมาซึ่งแตกต่างกันในแต่ละชนิดของก๊าซ ดังในรูปที่ 3.11

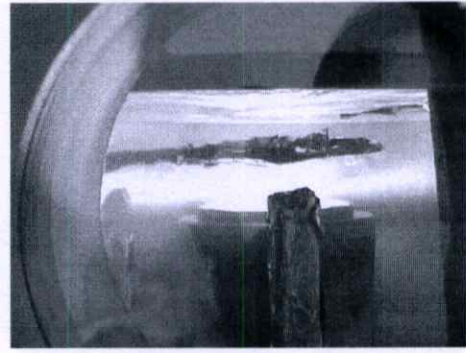
ตาราง 3.6 พารามิเตอร์ในการปลูกฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์บนฐานรองรับต่างกัน

<b>System</b>	RF Magnetron Sputtering System
<b>Target</b>	99.999% Indium target, 3" diameter
<b>Substrate</b>	Borosilicate glass, Si, PET
<b>Substrate holder speed</b>	30 rpm
<b>Target to substrate distance</b>	70 mm
<b>Base pressure</b>	$9 \times 10^{-7}$ mbar
<b>RF power</b>	100 w
<b>Gas flow rate (O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>)</b>	10:10 sccm
<b>Gas timing (O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>) sec</b>	10:30
<b>Thickness</b>	<b>500 nm</b>

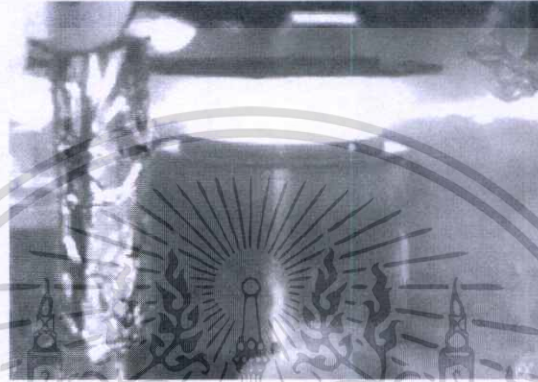
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) พลาสมาของก้ำซอร์คอน



ข) พลาสมาของก้ำซไนโตรเจน



ค) พลาสมาของก้ำซออกซิเจน

รูปที่ 3.11 ลักษณะการเกิดพลาสมาในบรรยากาศของก้ำซต่างชนิดกัน

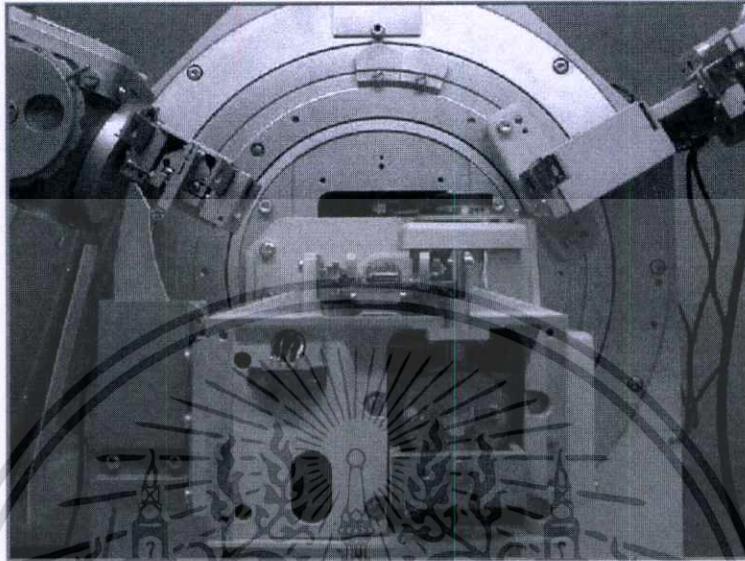
### 3.5 การศึกษาสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียม อินเดียมไนไตรด์ อินเดียมออกไซด์ และอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ (In, InN, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, InON films characterizations)

ในการปลูกฟิล์มใดๆ นั้น จำเป็นต้องมีเครื่องมือในการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแสง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มที่ปลูกได้ดังต่อไปนี้

- XRD
- FE-SEM
- AFM
- UV-VIS spectroscopy
- AES
- Raman spectroscopy
- XANES
- Hall Measurement
- I-V Measurement
- Photocurrent spectroscopy

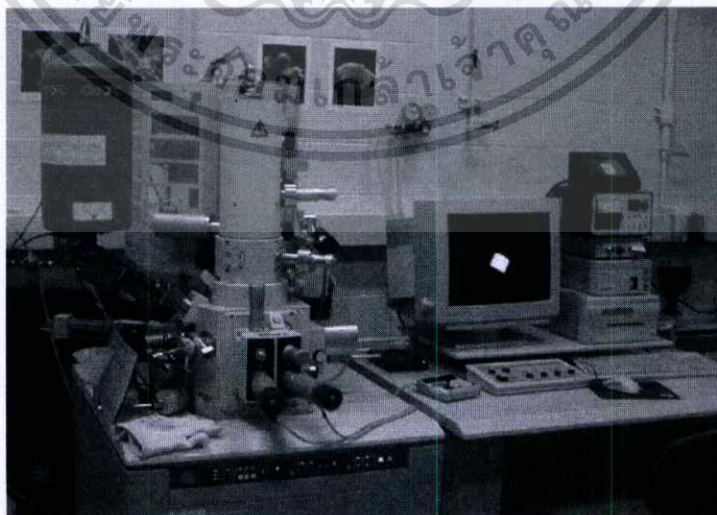
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำฟิล์มบางที่ได้จากการปลูกด้วยเงื่อนไขต่างๆ มาทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker ตามรูปที่ 3.12 ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 1.54 อังสตรอม (Å)



รูปที่ 3.12 เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance

ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิวเมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการปลูก ตรวจสอบขนาดของเม็ดผลึก โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของบริษัท Hitachi รุ่น 4700 ดังรูปที่ 3.13 และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม(ของบริษัท SEIKO รุ่น SPA400) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของบริษัท Hitachi รุ่น 4700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของบริษัท SEIKO รุ่น SPA400

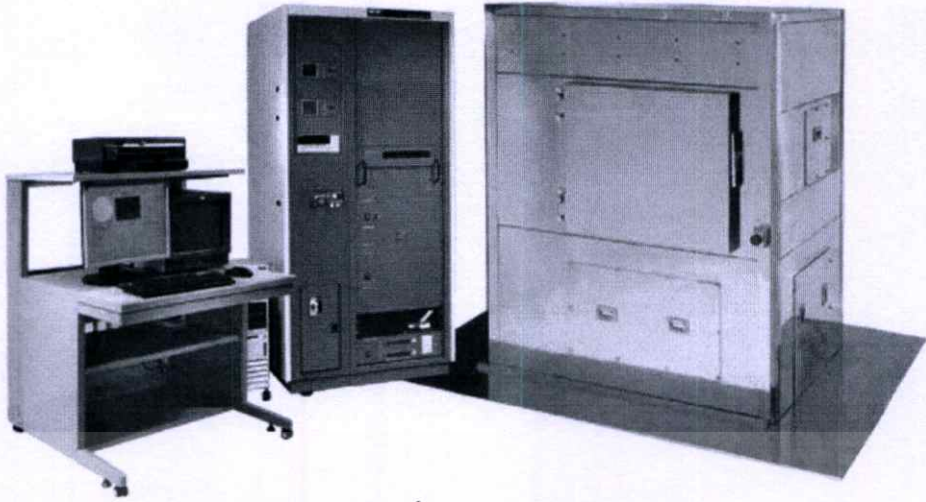
ตรวจสอบการทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของบริษัท PG Instrument รุ่น T90+ ชนิดลำแสงคู่ (double beam) ตามรูปที่ 3.19 ตรวจสอบในช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตร ข้อมูลการทะลุผ่านของแสงนำไปหาค่าคงที่ทางแสงโดยวิธี Pointwise Unconstrained Minimization Approach หรือวิธีการทำให้มีค่าน้อยลงโดยไม่มีเงื่อนไขในจุดที่ทราบชัดเจน ค่าที่ได้สามารถนำไปหาค่าแถบพลังงานทางแสงของฟิล์มบางที่ปลูกในเงื่อนไขต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.19 แสดงเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ของบริษัท PG Instrument รุ่น T90+

ตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มโดยเครื่องออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี ยี่ห้อ PHI 700 ของบริษัท Physical Electronics มี ion gun สำหรับทำ depth profile ดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปี ยี่ห้อ PHI 700

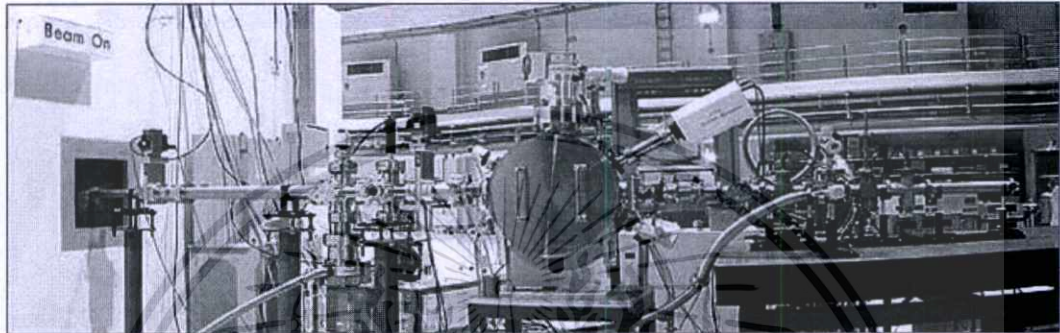
จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างพันธะด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (ยี่ห้อ Renishaw ของ Jobin Yvon) โดยใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ชนิดอาร์กอนที่ความยาวคลื่น 514.5 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.15



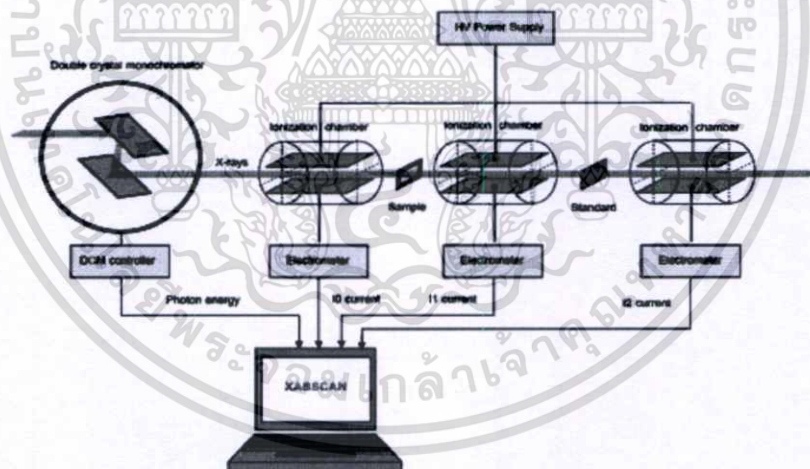
รูปที่ 3.15 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Renishaw ของบริษัท Jobin Yvon

ทำการตรวจสอบฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดร์ด้วยเทคนิค XANES โดยทีมนักวิจัยของ ศูนย์วิจัยเชิงโครตรอนแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อหาโครงสร้างที่แท้จริงของฟิล์มบางที่ปลูก เทคนิคดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ถึง local structure ที่อยู่รอบอะตอมที่มีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ซึ่งในที่นี้ก็คืออะตอมอินเดียม ทำการตรวจสอบการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมอินเดียมที่ตำแหน่ง  $L_{2,3}$ -edge ซึ่ง electron binding energy ที่ระดับชั้นพลังงาน  $L_{2,3}$  ของอะตอมอินเดียมอยู่ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3730 eV โดยแหล่งกำเนิดแสงของศูนย์วิจัยรังสีโครตรอนแห่งชาติ (พลังงานอิเล็กตรอน 1.2 GeV) ใช้โมโนโครมาเตอร์ผลึกซิลิกอนแบบคู่ในการสแกนพลังงานของโฟตอนในช่วง 3700 eV ถึง 3850 eV หัววัดชนิดเจอมาเนียม (ของ Canberra) สำหรับวัดโนโหมด fluorescent เทคนิคดังกล่าวจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างที่คาดว่าเป็นไปได้ เมื่อผลจากการคำนวณสอดคล้องกับผลจากการวัด สามารถอธิบายรูปแบบของโครงสร้างและสัดส่วนของอะตอมภายในโครงสร้างดังกล่าวได้ ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18



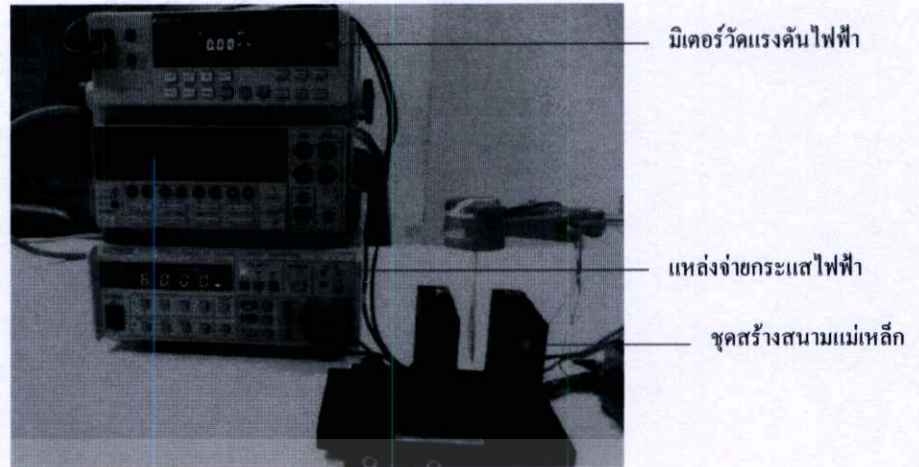
รูปที่ 3.17 ระบบวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของศูนย์วิจัยรังสีโครตรอนแห่งชาติ



รูปที่ 3.18 โค้ดโปรแกรมในการตรวจสอบการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์ม

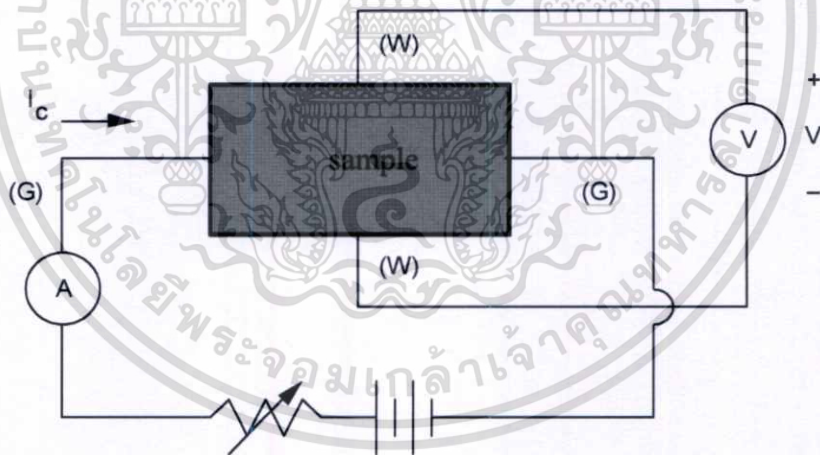
ในการหาค่าความคล่องตัวของพาหะ (mobility) ในฟิล์มที่ปลูกได้ ใช้หลักการของการวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสให้กับตัวอย่าง (film sample) มิเตอร์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า และชุดสร้างสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ระบบการวัดค่าความคล่องตัวของพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์

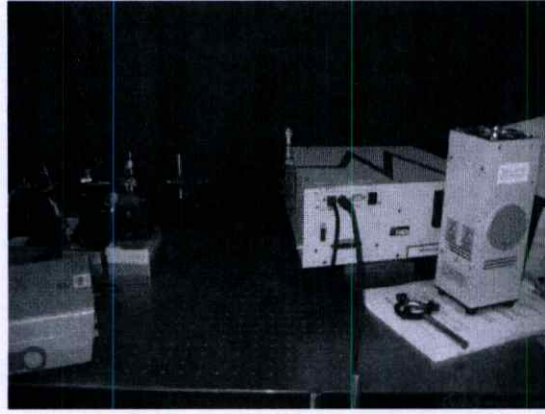
การเตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ แสดงดังรูปที่ 3.21 ขนาดตัวอย่างมีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวเท่ากับ 1:3 และลักษณะของตัวอย่างต้องมีความสมมาตรเพื่อให้กระแสไหลผ่านตัวอย่างในทิศตามความยาวเท่านั้น กรณีไม่สมมาตรจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าด้านตรงข้าม เป็นศักย์ไฟฟ้าชนิดเริ่มซึ่งทำให้การวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์มีความผิดพลาด วิธีการแก้ปัญหาตัวอย่างไม่สมมาตร โดยการต่อวงจรปรับระดับแรงดันชนิดเริ่ม



รูปที่ 3.21 การเตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปวัดศักย์ไฟฟ้าฮอลล์

สำหรับการตรวจสอบสมบัติทางแสง ทำการวัดสมบัติการตอบสนองต่อแสงโดยวิธีโฟโตเคอเรนซ์ ซึ่งระบบประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงชนิดซินอน เลนส์ ลอกอินแอมพลิไฟเออร์ ควบคุมการวัดโดยระบบคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ระบบการวัดการตอบสนองต่อแสง



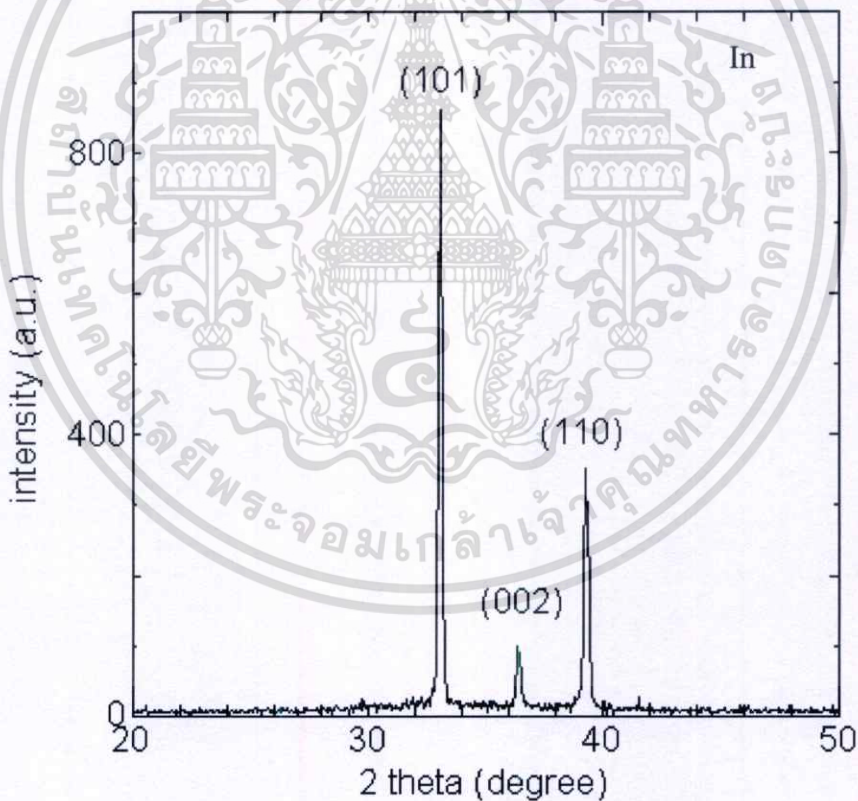
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

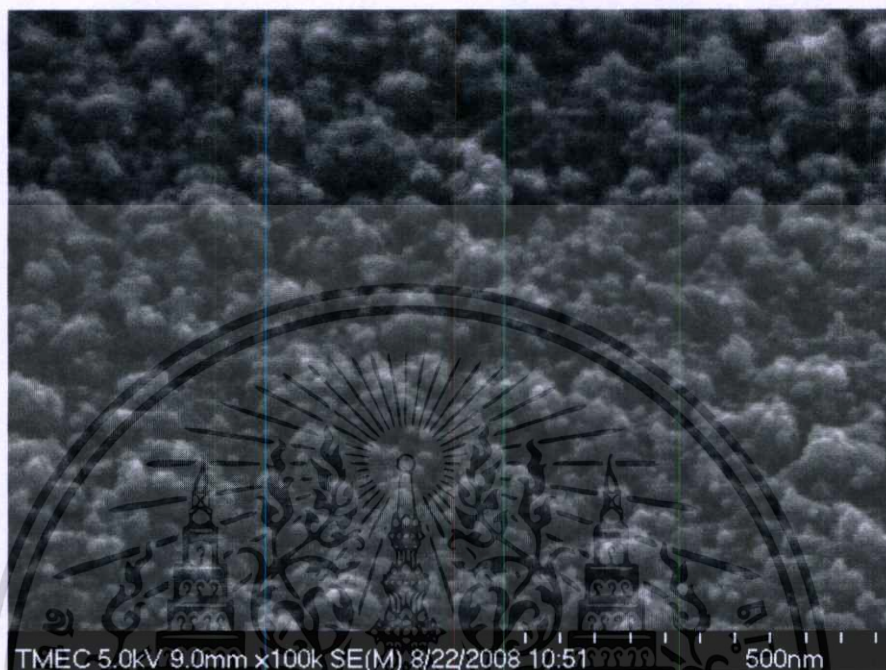
#### 4.1. สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียม

ฟิล์มบางอินเดียมที่ได้จากการปลูกตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.1 เมื่อนำไปตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มที่ปลูกได้โดยวิธี XRD พบว่าเกิดพีคที่มุม  $32.9^\circ$ ,  $36.3^\circ$  และ  $39.1^\circ$  ตามรูปที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ของอินเดียมที่ระนาบ (101), (002) และ (110) ตามลำดับ [ 33 ] จากรูปแสดงถึงความเป็นผลึกแบบโพลิ ที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกอินเดียมได้ดีที่สุดในระนาบ (101) ผลการวิเคราะห์ฟิล์มอินเดียมดังกล่าวจะใช้เป็นฟิล์มอ้างอิงในการวิเคราะห์ผลของฟิล์มบางอินเดียมใน ไตรค์ อินเดียมออกไซด์ใน ไตรค์ และอินเดียมออกไซด์ต่อไป



รูปที่ 4.1 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางอินเดียมความหนา 800 นาโนเมตร

เมื่อตรวจวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าที่ภาพขนาดกำลังขยาย 100,000 เท่า ฟิล์มอินเดียมที่ได้มีลักษณะพื้นผิวขรุขระที่ประกอบด้วยก้อนผลึกขนาดประมาณ 30 นาโนเมตร



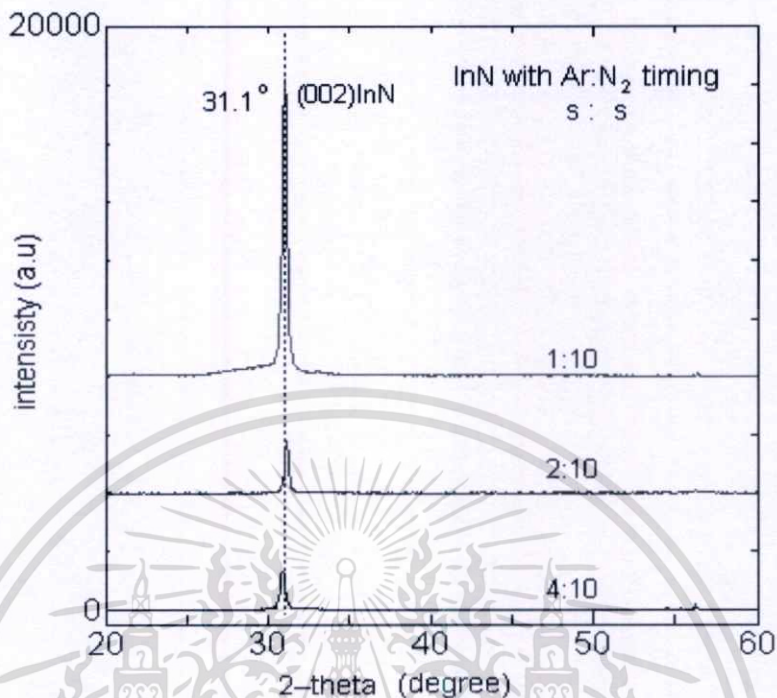
รูปที่ 4.2 ลักษณะ โครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมความหนา 800 นาโนเมตร

#### 4.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียมในไตรด์

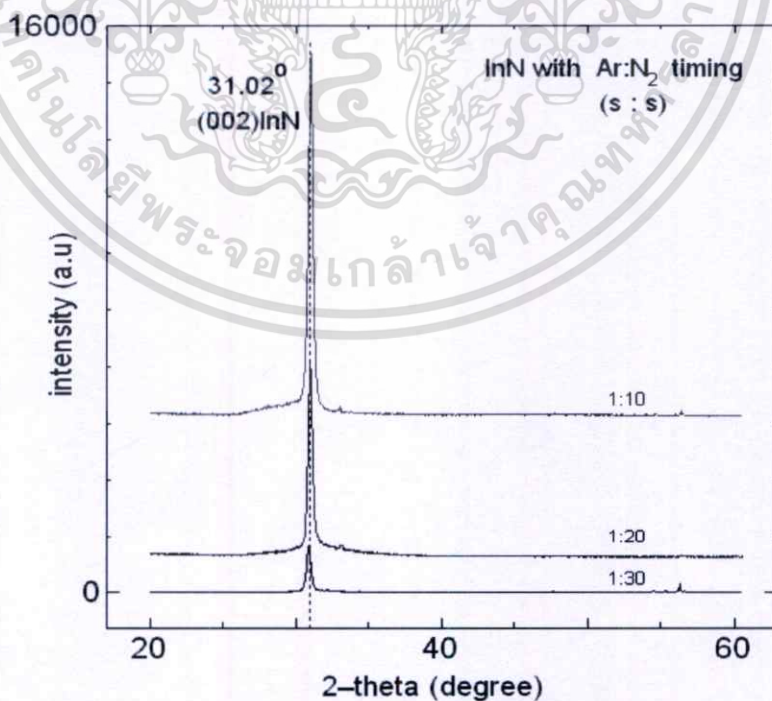
รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัม XRD ของอินเดียมในไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนตามตารางที่ 3.2 พบว่าเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $31.1^{\circ}$  ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของอินเดียมในไตรด์ที่ระนาบ (002) พีคการเลี้ยวเบนสูงสุดที่อัตราเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:10 เมื่อเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มของพีค XRD ลดลง แสดงให้เห็นว่าก๊าซไนโตรเจนที่ป้อนอยู่ในระบบทำหน้าที่เป็นทั้งอ็อกซิเจนที่ใช้ชนเป้าสารอินเดียมและอ็อกซิเจนที่เข้ากับปฏิกิริยาจับกับอะตอมอินเดียม เกิดเป็นอินเดียมไนไตรด์ ส่วนก๊าซอาร์กอนที่เพิ่มเข้าไปในการทดลองนี้ยังมีปริมาณมากก็ยิ่งทำให้อ็อกซิเจนของอาร์กอนเข้าไปชนกับอะตอมอื่นๆ การเกิดสารประกอบเนื่องจากอะตอมอินเดียมจับกับไนโตรเจนจึงลดลง

ในรูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัม XRD ของอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยการควบคุมเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนคงที่เท่ากับ 1 วินาที ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนตามตารางที่ 3.2 พบว่าเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $31.1^{\circ}$  ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลของอินเดียม

ในไตรด์ที่ระนาบ (002) พิกการเลี้ยวเบนสูงสุดที่อัตราเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:10 และเมื่อเพิ่มเวลาการปล่อยก๊าซไนโตรเจนมากขึ้นทำให้ความเข้มของพิก XRD ลดลง



รูปที่ 4.3 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอน



รูปที่ 4.4 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราเวลาการปล่อยอาร์กอนต่อในโตรเจนเท่ากับ 1:10 จะเห็นว่าขนาดของเม็ดผลึกมีลักษณะเป็นก้อนเล็กๆ ขนาดสม่ำเสมอ ประมาณ 20 นาโนเมตร



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของอินเดียมไนไตรด์ที่อัตราเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอนต่อในโตรเจนเท่ากับ 1:10

#### 4.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์

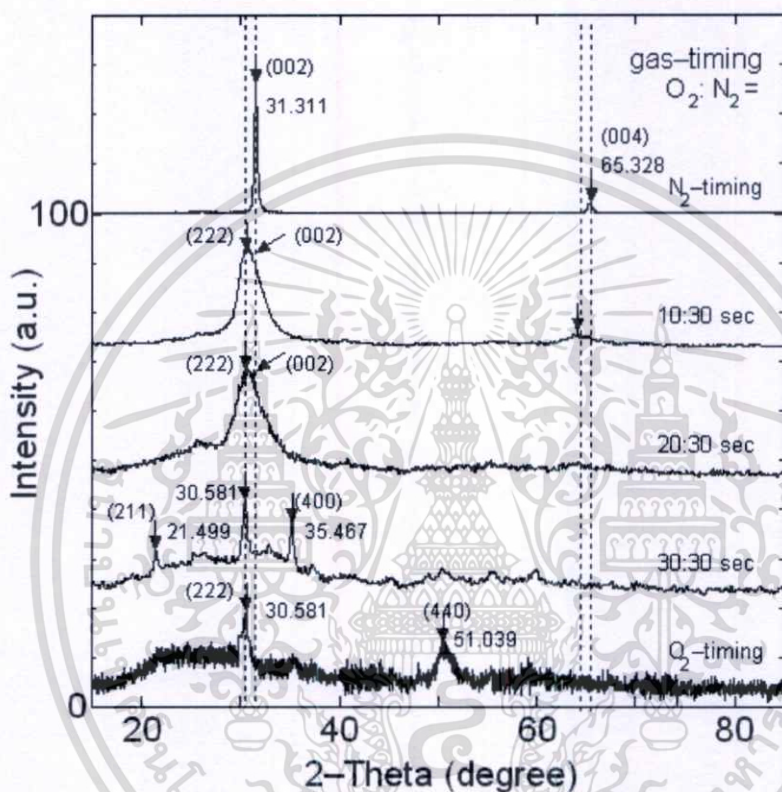
##### 4.3.1 ฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจน

จากการตรวจสอบสมบัติโครงสร้างผลึกโดยวัดสเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางที่ปลูกโดยอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์เกิดพีคที่มุม  $31.311^\circ$  และ  $65.328^\circ$  สอดคล้องกับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลที่ระนาบ (002) และ (004) ตามลำดับ

สำหรับฟิล์มที่ปลูกที่เวลาของออกซิเจนต่อในโตรเจนเท่ากับ 10:30 และ 20:30 เกิดพีคที่มีฐานขยากว้างและสเปกตรัมเลื่อนไปเล็กน้อย กรณีของการเลื่อนของสเปกตรัม อาจเกิดจากการซ้อนทับกันของพีคที่อยู่ใกล้กันระหว่างระนาบ (002) ของ hexagonal-InN ซึ่งตรงกับมุม  $31.311^\circ$  กับ ระนาบ (222) ของ cubic-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มุม  $30.581^\circ$  [34] ในทำนองเดียวกันอาจเกิดการซ้อนทับของระนาบ (208) ของ In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มุม  $\sim 64.593^\circ$  กับระนาบ (004) ของ InN ที่มุม  $\sim 65.328^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นผลึกของโครงสร้าง InN จะลดลงเมื่อออกซิเจนมากขึ้น สังเกตว่า ที่อัตราส่วนเวลาของออกซิเจนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 30:30 เฟสที่เป็น InN หายไป กรณีนี้อาจจะอธิบายได้ว่า แม้ว่าจะมีไนโตรเจนอยู่ในระบบ แต่เนื่องจากอะตอมออกซิเจนจับกับอะตอมของอินเดียมได้ดีกว่า จึงเกิดเฟสของ  $\text{In}_2\text{O}_3$  มากขึ้นทับเฟสที่เป็น InN จนไม่สามารถสังเกตฟีดของ InN ได้ และจะเปลี่ยนเฟสจาก  $\text{InN} + \text{In}_2\text{O}_3$  เป็น  $\text{In}_2\text{O}_3$  ทั้งหมดในกรณีที่ปลูกฟิล์มในบรรยากาศของออกซิเจนอย่างเดียว



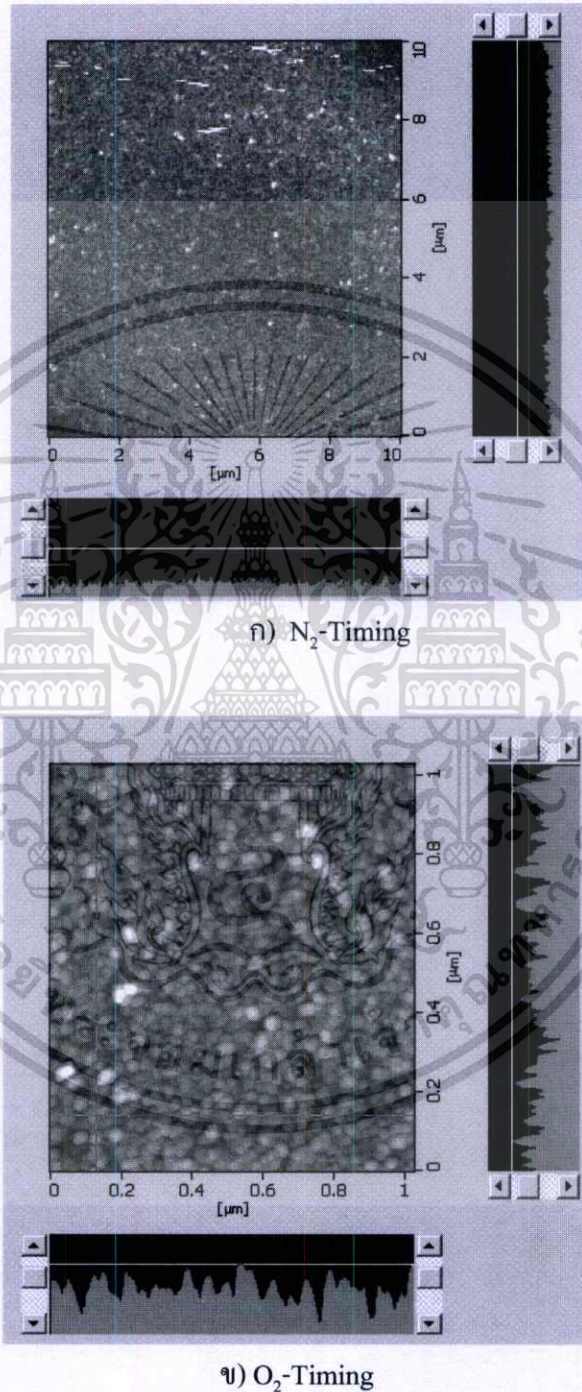
รูปที่ 4.6 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางที่ปลูกโดยอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน

โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมไนไตรที่ปลูกก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียวแต่มีการควบคุมเวลาในการปล่อยก๊าซ และฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ปลูกก๊าซออกซิเจนอย่างเดียวแต่มีการควบคุมเวลาในการปล่อยก๊าซ ตรวจสอบโดยกล้อง AFM แสดงดังรูปที่ 4.7 ก) และ ข) ตามลำดับ

จากภาพ AFM พบว่าทั้งฟิล์มบางอินเดียมไนไตรที่ปลูกก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียวแต่มีการควบคุมเวลาในการปล่อยก๊าซ พื้นผิวฟิล์มค่อนข้างเรียบ และมีผลึกมีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร ส่วนฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ และฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ที่ปลูกด้วยก๊าซออกซิเจนอย่างเดียวแต่มีการควบคุมเวลาในการปล่อยก๊าซ มีขนาดของเม็ดผลึกใหญ่กว่า คือประมาณ 50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

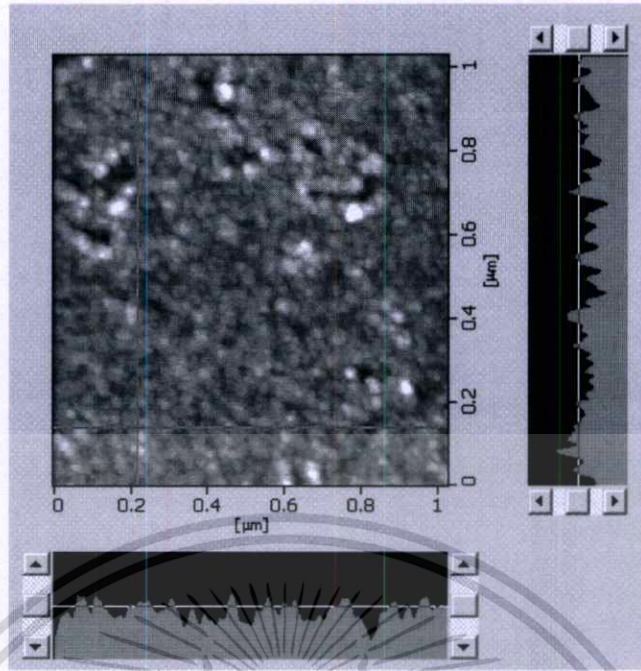
ในขณะที่โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มบางที่ปลูกโดยเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน (อินเดียมออกซีไนไตรด์) คือ  $O_2:N_2 = 30:30$  วินาที และ  $O_2:N_2 = 10:30$  วินาที จะพบว่าขนาดของเม็ดผลึกประมาณ 30 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.8 ก) และ ข) ตามลำดับ



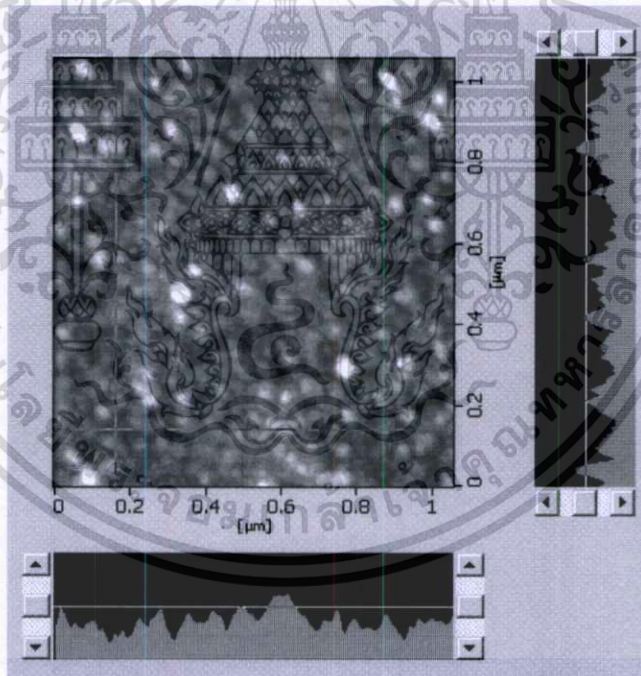
รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มบางที่ปลูกโดยเงื่อนไข ก)  $N_2$ -Timing

ข)  $O_2$ -Timing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)  $O_2:N_2 = 30:30\text{sec}$

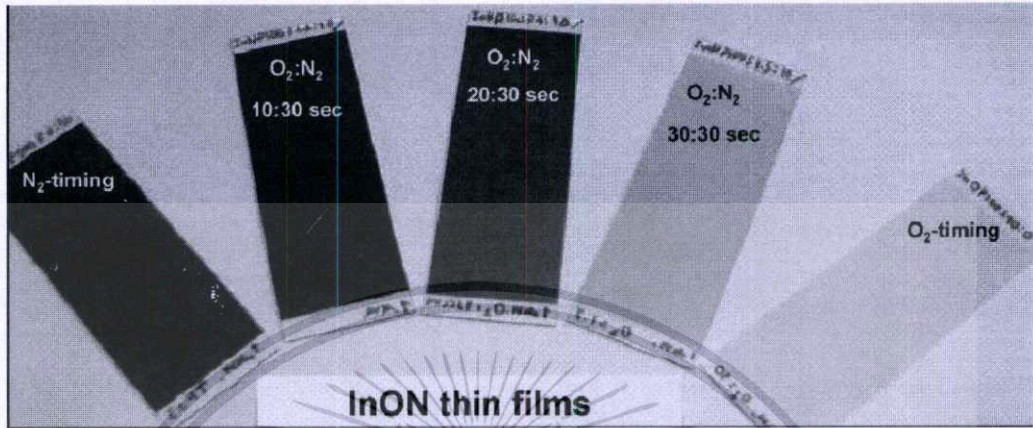


ข)  $O_2:N_2 = 10:30\text{sec}$

รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มบางที่ปลูกโดยเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน ก)  $O_2:N_2 = 30:30\text{sec}$  ข)  $O_2:N_2 = 10:30\text{sec}$

จากการตรวจสอบฟิล์มบางที่ปลูกโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอรืงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นแก้วชนิดโบโรซิลิเกต โดยมีเงื่อนไขการปลูกฟิล์มแสดงในตารางที่ 3.3 พบว่าฟิล์มบางที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องแจ้งเจ้าหน้าที่การค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

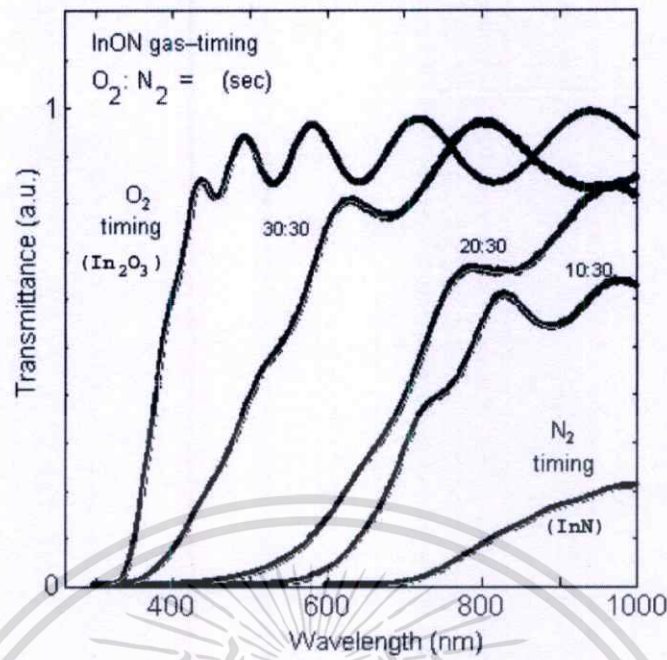
ปลูกในบรรยากาศอาร์กอนและไนโตรเจน ลักษณะของฟิล์มที่ได้มีสีน้ำตาลเข้มออกดำ และเริ่มมีความใสมากขึ้นเมื่อเวลาในการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟิล์มที่ปลูกในบรรยากาศของออกซิเจนอย่างเดียว จะมีลักษณะใส ดังแสดงรูปที่ 4.9



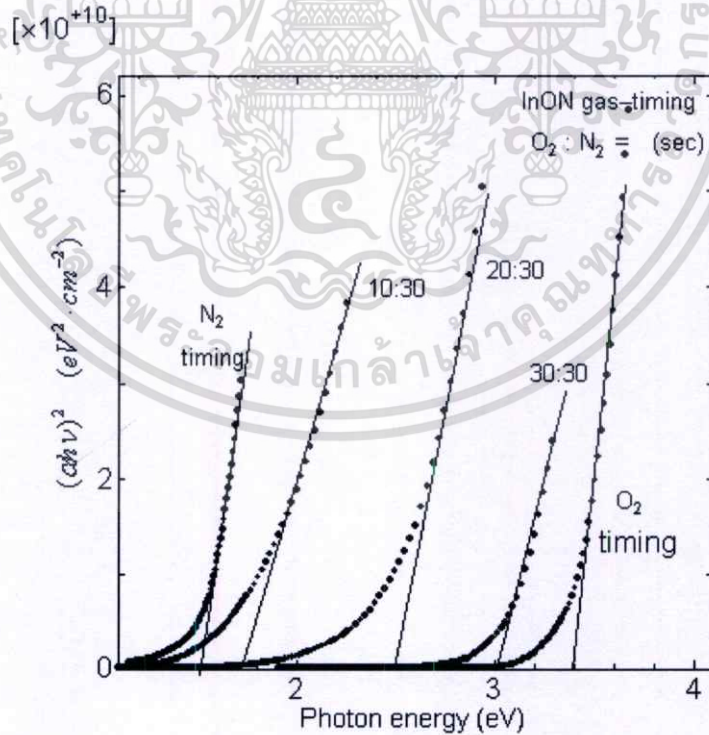
รูปที่ 4.9 ฟิล์มบางที่ปลูกโดยอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

เมื่อตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่ปลูกโดยเงื่อนไขเวลาของก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน โดยตรวจสอบค่าการทะลุผ่านของแสง (transmittance) โดยใช้เทคนิค UV-VIS spectroscopy ได้สเปกตรัมการส่องผ่าน แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์ยอมให้แสงผ่านเฉพาะย่านใกล้อินฟราเรด (near-IR) และเมื่อเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้สเปกตรัมของการทะลุผ่านเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าจนเข้าสู่ย่านยูวี (UV) แสดงให้เห็นว่าการปลูกฟิล์มอินเดียมออกซิไนไตรด์ด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยาดังที่กล่าวมานั้น สามารถกำหนดย่านการส่องผ่านของแสงได้กว้างมาก ครอบคลุมจากย่านยูวีไปจนถึงใกล้แดง

และจากผลของการวัดการทะลุผ่านของแสง นำข้อมูลที่ได้ไป Fitting โดยวิธี Pointwise Unconstrained Minimization Approach [40] หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงที่ขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เพื่อหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม (optical bandgap) พบว่าค่าแถบพลังงานต้องห้ามเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1.5 eV ถึง 3.4 eV แสดงค่าดังในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงแถบพลังงานต้องห้ามที่ขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนในฟิล์ม [41-42]



รูปที่ 4.10 ผลการวัดการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกซิไดรด์ที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซต่างกัน



รูปที่ 4.11 สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงที่ขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางผลึกนาโน

อินเดียมออกซิไดรด์ที่ปลูกโดยเวลาของก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

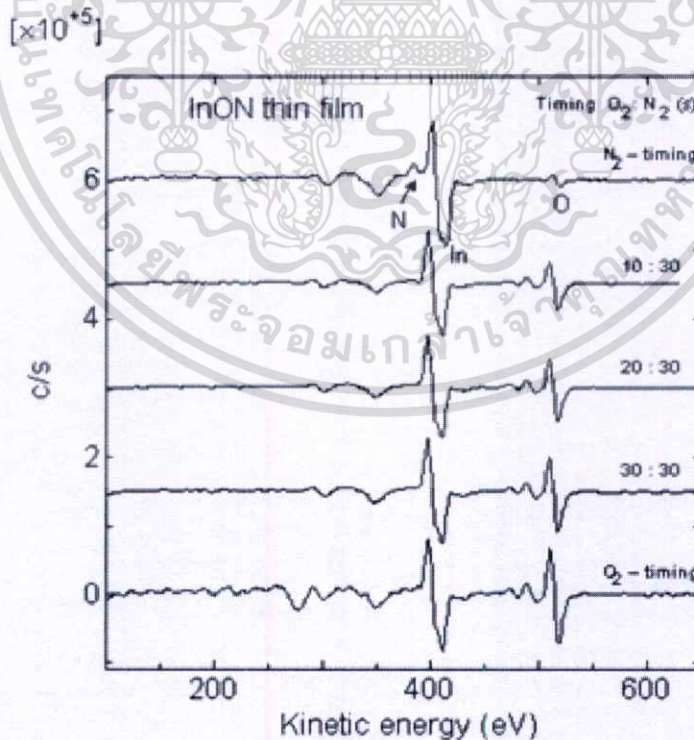
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อต่าง ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนต่างกัน

sample	Gas timing (s)		Optical bandgap (eV)
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
1	N <sub>2</sub> -timing		1.5
2	10	30	1.6
3	20	30	2.4
4	30	30	3.0
5	O <sub>2</sub> -timing		3.4

สำหรับองค์ประกอบของธาตุ (atomic composition) ในฟิล์ม ถูกตรวจวัดโดยเทคนิค AES ผลการตรวจวัดแสดงในรูปที่ 4.12 จากรูปพบว่าความเข้มสเปกตรัมของออกซิเจนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการปล่อยก๊าซออกซิเจนมากขึ้น ความเข้มสเปกตรัมของไนโตรเจนจะลดลง และสเปกตรัมของอินเดียมจะสูงที่สุดเมื่อปล่อยก๊าซออกซิเจนอย่างเดียว ในขณะที่ความเข้มสเปกตรัมของอินเดียมค่อนข้างคงที่ องค์ประกอบของฟิล์มสรุปได้ตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมออเจอร์ของฟิล์มบางที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของฟิล์มบางที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจน

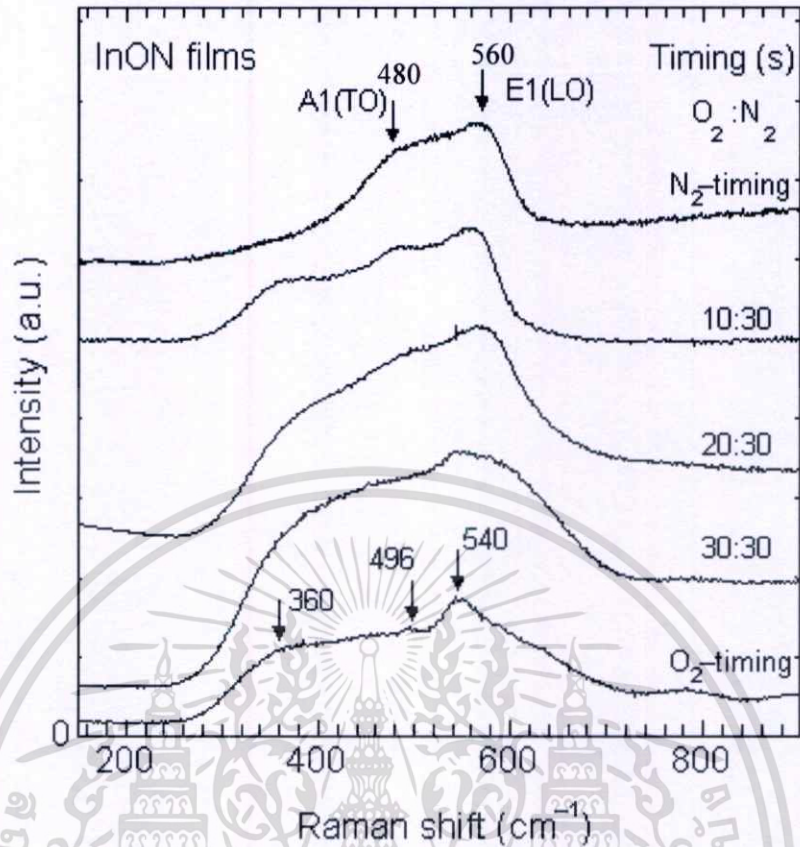
sample	Gas timing (s)		% Atomic		
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	In	N	O
1	N <sub>2</sub> -timing	49.7	39.9	10.4	
2	10	30	32.5	38.5	32.5
3	20	30	27.2	37.5	35.5
4	30	30	27.5	35.2	37.3
5	O <sub>2</sub> -timing	43.2	0	56.8	

เมื่อนำฟิล์มฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกในทุกเงื่อนไข ไปตรวจสอบโครงสร้างพันธะโดยเทคนิคการวัดรามานสเปกโตรสโกปี ผลการตรวจสอบได้สเปกตรัมรามานของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่แสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นลักษณะพีกอินเดียมในไตรด์ ซึ่งมีลักษณะขยายกว้าง (broad peak) ปรากฏที่ตำแหน่ง  $480\text{ cm}^{-1}$  และ  $560\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับโหมดการสั่นของโฟนอนของอินเดียมในไตรด์ที่ตำแหน่ง  $A_1(\text{TO})$  และ  $E_1(\text{LO})$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลอินเดียมในไตรด์ [37-38]

เมื่อเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในโตรเจนเพิ่มขึ้น เกิดการขยายของพีกมากขึ้น โดยเกิดไหล่ของสเปกตรัมที่ตำแหน่ง  $360\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับพันธะของอินเดียมออกไซด์ สำหรับฟิล์มอินเดียมออกไซด์ จะปรากฏพีกเพิ่มเติมที่ตำแหน่ง  $496\text{ cm}^{-1}$  และ  $540\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างแบบคิวบิกอินเดียมออกไซด์ [39]

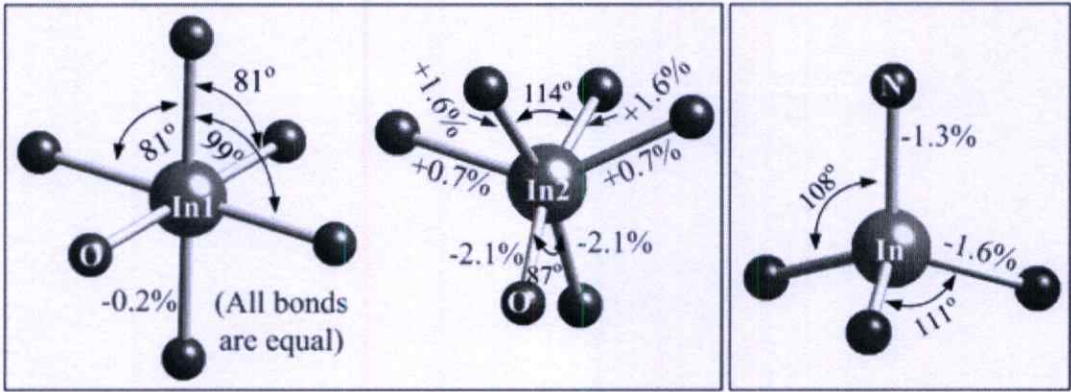
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย AES มีความสอดคล้องกับผลของ XRD และรามาน นั่นคือเมื่อปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่ปลูกได้จะพบเฟสของอินเดียมออกไซด์มากขึ้น และเป็นอินเดียมออกไซด์เมื่อปลูกด้วยออกซิเจนอย่างเดียว จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ฟิล์มอินเดียมออกไซด์ในไตรด์จากทั้งสามเทคนิคนี้คือ XRD, Raman และ AES เป็นไปในทางที่สอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์ด้วยรามานของฟิล์มที่ปลูกในเงื่อนไขการควบคุมเวลาการปล่อยก๊าซในโตรเจนและออกซิเจน เป็นการยืนยันได้ว่าเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยาสามารถปลูกฟิล์มบางผลึกอินเดียมในไตรด์ได้โครงสร้างเฮกซะโกนอล และอินเดียมออกไซด์ได้โครงสร้างคิวบิก ส่วนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ก็จะมีค่าแตกต่างของสเปกตรัมรามานออกไป



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรามานของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

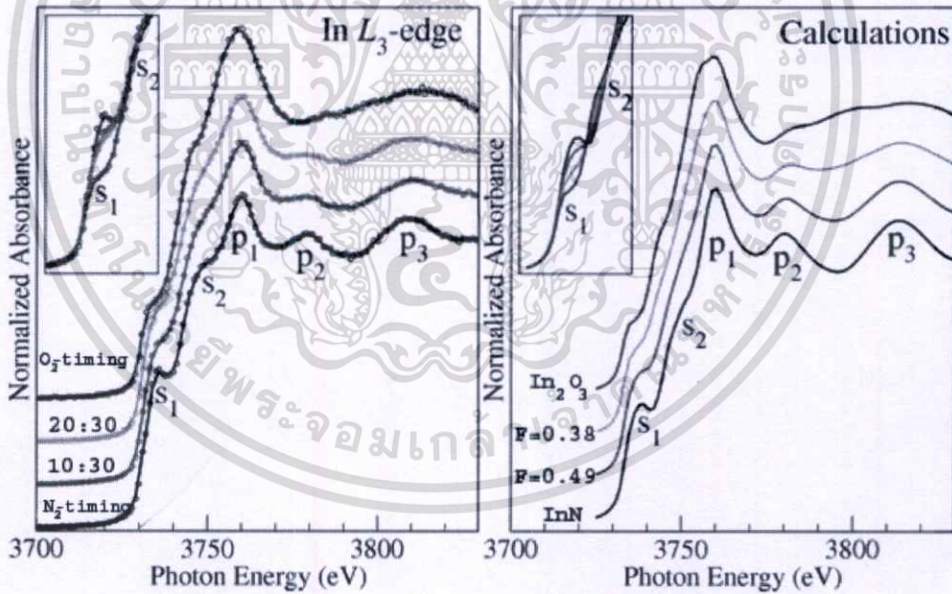
จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์บริเวณขอบการดูดกลืน (X-ray Absorption Near-Edge Structure: XANES) ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซต่างกัน โดยทีมวิจัยของห้องปฏิบัติการแสงสยาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทีมวิจัยได้สร้างแบบจำลองของอินเดียมออกไซด์และอินเดียมไนไตรด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และเมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจวัดด้วยเทคนิค XANES โดยทำการตรวจสอบชั้นพลังงาน  $L_3$ -edge ของอินเดียม ซึ่งมี electron binding energy ที่ชั้นดังกล่าวอยู่ที่ 3730 eV สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์จากการวัดและการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.15 ก) และรูปที่ 4.15 ข) ตามลำดับ [43-44]



ก)

ข)

รูปที่ 4.14 แบบจำลอง โครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ XANES ก)  $In_2O_3$  โครงสร้างแบบ sixfold ข) InN โครงสร้างแบบ fourfold



ก)

ข)

รูปที่ 4.15 สเปกตรัม XANES ที่ระดับพลังงาน  $L_3$ -edge ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ใน ไซตรัสที่เวลาของการปล่อยก๊าซต่างกัน ก) ผลจากการวัด ข) ผลจากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสเปกตรัมที่ได้จากการวัด ดังรูปที่ 4.15 ก) พบว่าเกิดโหลที่ตำแหน่ง  $s_1$  และ  $s_2$  และเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $p_1$ ,  $p_2$  และ  $p_3$  ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงในโหลและพีคเหล่านี้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเวลาของการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน สเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์มีโครงสร้างแบบ fourfold และ  $\text{In}_2\text{O}_3$  มีโครงสร้างแบบ sixfold สำหรับฟิล์มบางอินเดียมไนไตรด์ที่ปลูกได้มีแถบพลังงานต้องห้ามอยู่ที่ 1.5 eV ซึ่งมีค่ามากกว่าที่เคมีรายงานซึ่งอยู่ที่ 0.7 eV [8-10] ค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่มีค่ามากกว่าเกิดจากปรากฏการณ์ของเบอร์สไตน์-มอสส์ (Burstein-Moss effect) อันเนื่องมาจากปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบประมาณ 10% [32] เข้ามาแทรกในโครงสร้างของอินเดียมไนไตรด์ จากผลการคำนวณและผลการวัด XANES พบว่าไม่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยน การเปลี่ยนแปลงเวลาของก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนในระบบเป็น 10:30 และ 20:30 ทำให้โครงสร้างในผลึกนาโนจากการคำนวณและวิเคราะห์โดย XANES อยู่ในรูปของ  $(\text{InN}_{0.6}\text{O}_{0.4})_F(\text{InO}_{1.5})_{1-F}$  โดยฟิล์มบางที่มี  $\text{N}_2:\text{O}_2 = 10:30$  มีค่า F เป็น 0.49 และฟิล์มบางที่มี  $\text{N}_2:\text{O}_2 = 20:30$  มีค่า F เป็น 0.38

จากการตรวจสอบความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน ได้ค่าแสดงตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นตามเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าออกซิเจนในฟิล์ม ทำให้ความต้านทานของฟิล์มเพิ่มขึ้น

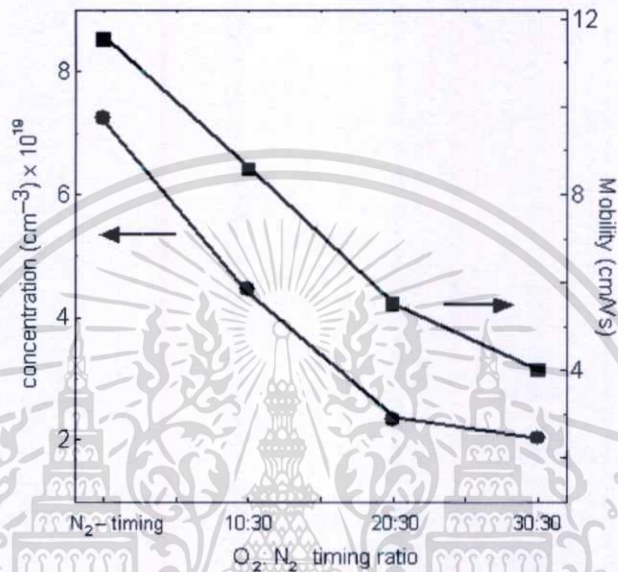
**ตารางที่ 4.3** ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ที่ปลูกโดยเงื่อนไขอัตราเวลาปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

Gas-timing $\text{O}_2:\text{N}_2(\text{sec})$	Sheet resistance $\Omega/\square$
$\text{N}_2$ -timing	15.29
10:30	83.61
20:30	1,251
30:30	$2 \times 10^6$
$\text{O}_2$ -timing	Insulator

ในรูปที่ 4.16 แสดงค่าความเข้มข้นและค่าความคล่องตัวของพาหะที่สัมพันธ์กับเวลาของก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน จากระบบวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ พบว่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเวลาปล่อยก๊าซออกซิเจน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความ

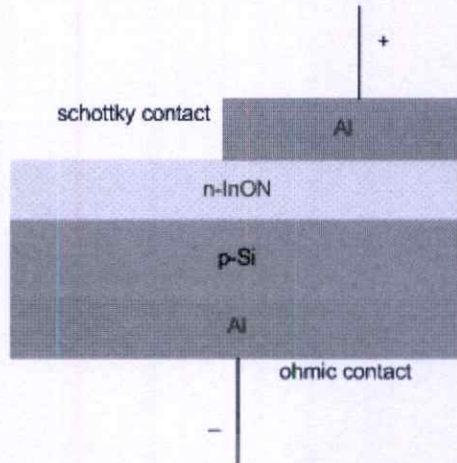
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของพาหะลดลงตามความสัมพันธ์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับค่าความคล่องตัวของพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลดลงของความเข้มข้นของพาหะและค่าความต้านทานจำเพาะ แต่จากการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของฟิล์มพบว่ามีความเพิ่มขึ้นตามเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจน และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความคล่องตัวของพาหะมากกว่าค่าความเข้มข้นของพาหะ ทำให้ค่าความคล่องตัวของพาหะลดลงตามเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจน

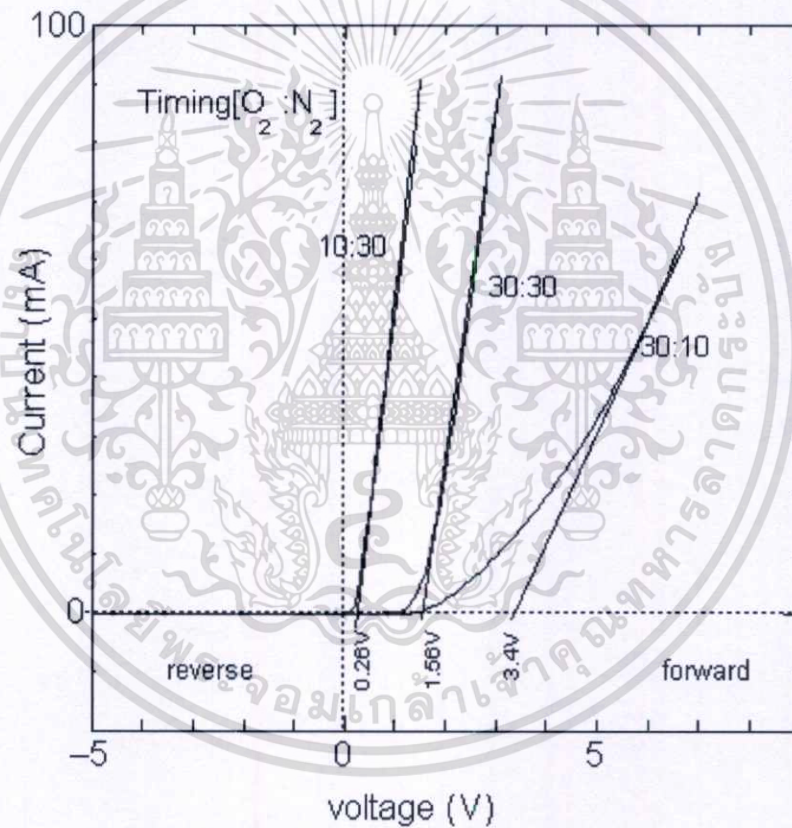


รูปที่ 4.16 ค่าความเข้มข้นและค่าความคล่องตัวของพาหะของอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

ในการวิเคราะห์สมบัติกระแสที่ขึ้นกับแรงดัน จะทำโครงสร้างขั้วไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่ปลูกบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี ชั้นโลหะอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วโลหะทั้งขั้วบนและขั้วล่าง แสดงในรูปที่ 4.17 รอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิกอนเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก และรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมกับชั้นอินเดียมออกซิไนไตรด์เป็นรอยต่อแบบชอตต์กี ในรูปที่ 4.18 แสดงสมบัติทางกระแสที่ขึ้นกับแรงดัน พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะสมบัติเป็นไดโอด ซึ่งแสดงว่ารอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์กับชั้นซิลิกอนเป็นรอยต่อแบบพีเอ็นและฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แรงดันขั้วเริ่มเพิ่มขึ้นตามอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน จากผลของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขึ้นกับอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันขั้วเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อแถบพลังงานต้องห้ามเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 โครงสร้างขั้วโลหะบนรอยต่อชนิดพีเอ็นระหว่างอินเดียมออกไซด์ในไตรด์และซิลิกอน



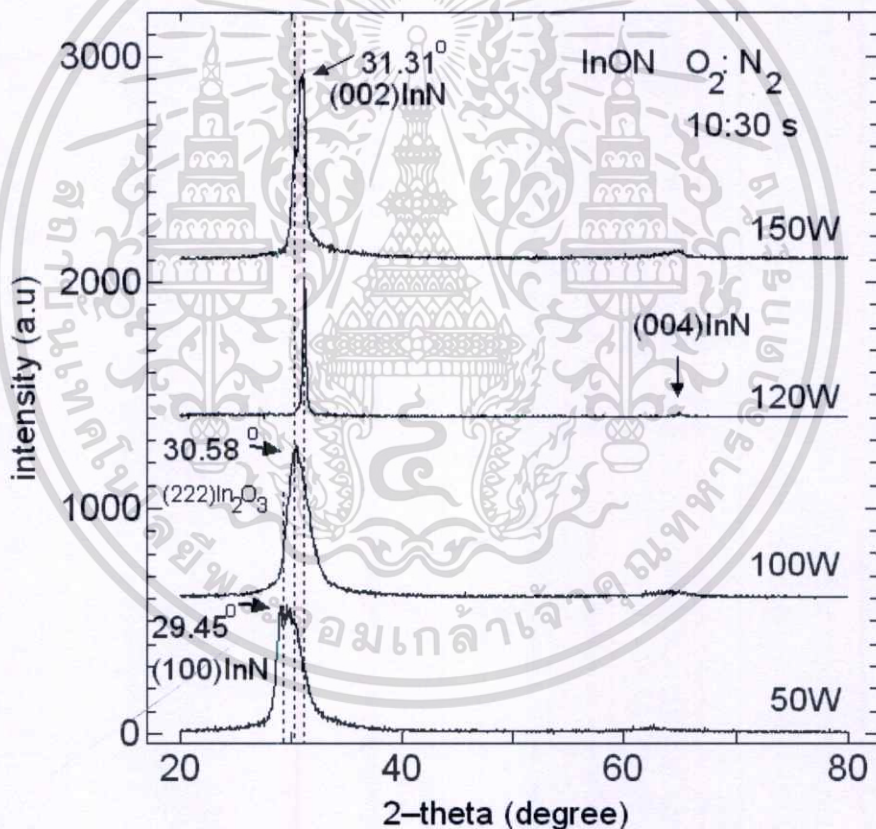
รูปที่ 4.18 สมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนต่างกัน

#### 4.3.2 ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นวิทยุ

ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยเงื่อนไขของกำลังคลื่นวิทยุต่างกัน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนเท่ากับ 10 sccm ควบคุมอัตราการเอกรสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:30 วินาที สเปกตรัม XRD แสดงในรูปที่ 4.19 จากสเปกตรัมพบว่า ความเข้มของพีค XRD เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกำลังของคลื่นวิทยุ แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ทางโครงสร้างผลึก เนื่องจากกำลังของคลื่นวิทยุมีผลโดยตรงต่อการจับพันธะระหว่างอะตอมของอินเดียม ในไนโตรเจน ออกซิเจน จากเงื่อนไขการปลูกพบว่าเวลาในการปล่อยก๊าซในไนโตรเจนจะมากกว่าเวลาในการปล่อยก๊าซออกซิเจน โอกาสที่อะตอมของไนโตรเจนจับพันธะกับอะตอมอินเดียมมีมากกว่า ซึ่งตรวจสอบองค์ประกอบธาตุในฟิล์มได้โดยผลจาก AES ดังแสดงในรูปที่ 4.20

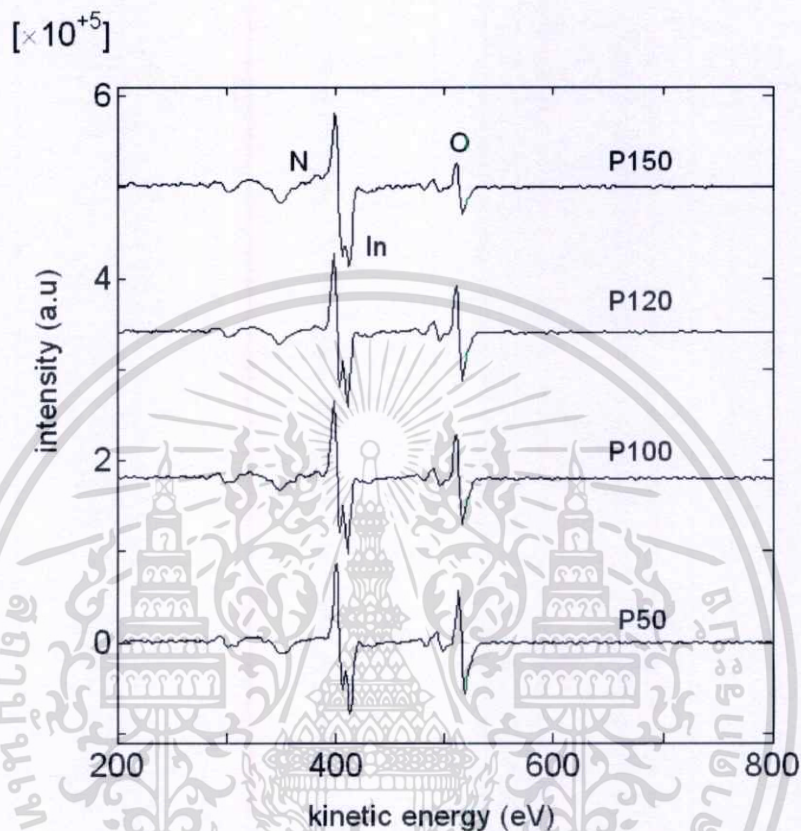
พิจารณาค่า FWHM พบว่าในช่วงแรกค่า FWHM ลดลง เมื่อเพิ่มกำลังของคลื่นวิทยุจนถึง 120 วัตต์ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นที่กำลัง 150 วัตต์ การเพิ่มขึ้นของ FWHM เกิดจากกำลังของคลื่นวิทยุทำให้พลังงานจลน์ของอะตอมมากเกินไป เมื่ออะตอมพุ่งชนฐานรองรับยังคงมีพลังงานเหลือทำให้เกิดการไถลลื่น (lubricate) [ 45] ส่งผลทำให้เกิดความบกพร่องในโครงสร้างผลึกมากขึ้น



รูปที่ 4.19 ผล XRD ฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่เงื่อนไขการปลูกที่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน

รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัม AES ของฟิล์มอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่ปลูกในเงื่อนไขอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10s:30s (O10:N30) โดยทำการเปลี่ยนแปลงกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้ในการปลูก พบว่าปริมาณออกซิเจนในฟิล์มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังคลื่นวิทยุ ซึ่งอธิบายได้ว่า เนื่องจากไนโตรเจนสร้างพันธะกับอินเดียมได้ดีที่ระดับพลังงานสูงๆ และอัตราการเอกซาร์เป็นเอกซาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลูกฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของคลื่นวิทยุ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในฟิล์มลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณไนโตรเจน ผลของ AES สอดคล้องกับผล XRD นั่นคือเมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงทำให้ความเป็นผลึกของอินเดียมไนไตรด์สมบูรณ์ขึ้นพิจารณาได้จาก FWHM ที่แคบลง



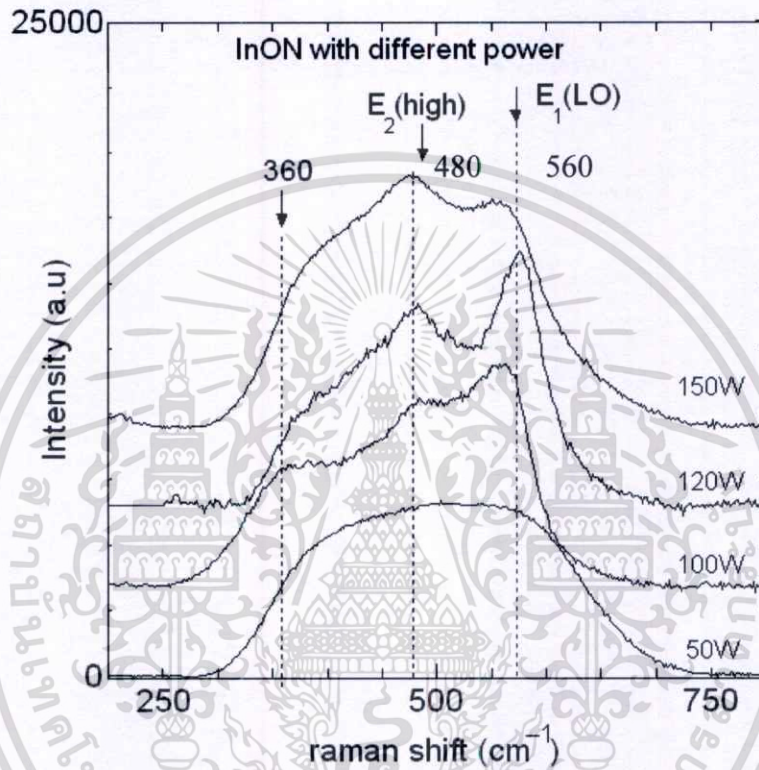
รูปที่ 4.20 สเปกตรัม AES ของฟิล์มบางอินเดียมออกซิไนไตรด์ที่เงื่อนไขการปลูกที่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของฟิล์มบางที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นวิทยุ

sample	Power (W)	% Atomic		
		In	N	O
1	50	29.0	32.3	38.7
2	100	27.6	38.2	34.2
3	120	28.1	38.2	33.7
4	150	33.7	43.1	23.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

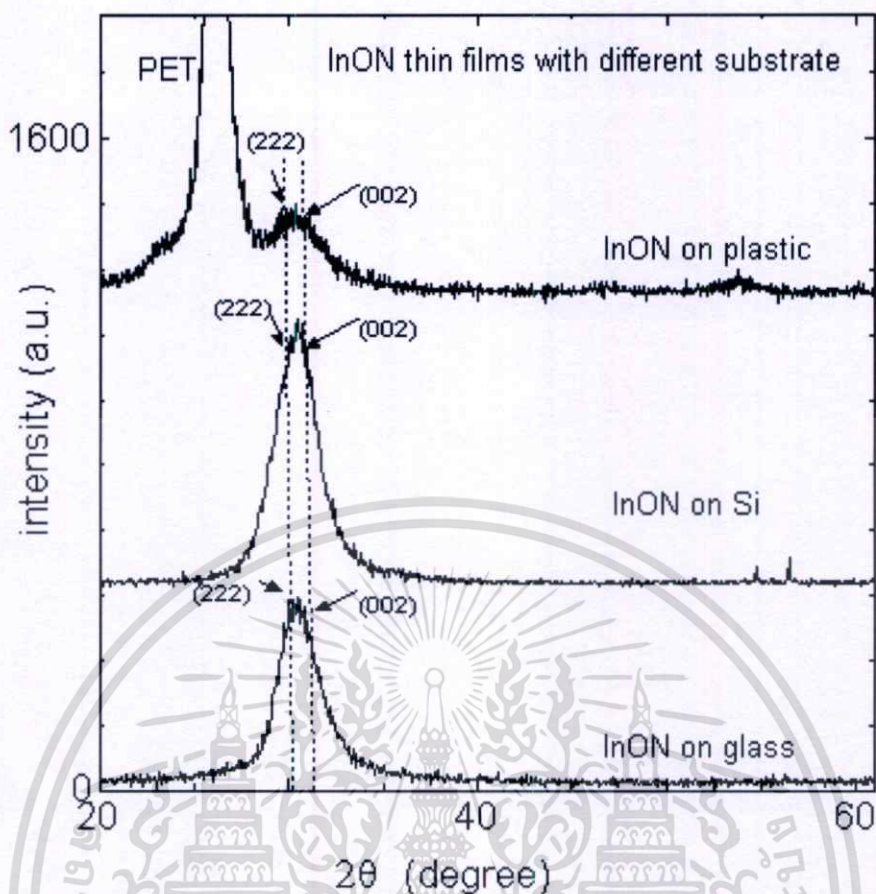
รูปที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของรามาน พบว่า ในช่วงแรกความเข้มของสเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกำลังของคลื่นวิทยุ และลดลงที่กำลัง 150 วัตต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวัดสเปกตรัม XRD สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นของโฟนอนของโครงสร้างอินเดียมไนไตรด์ที่ตำแหน่ง  $E_1(\text{LO})$  และ  $A_1(\text{TO})$  ซึ่งตรงกับตำแหน่ง  $480 \text{ cm}^{-1}$  และ  $560 \text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายและสังเกตได้ง่ายที่สุด ส่วนที่ตำแหน่ง  $360 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของอินเดียมออกไซด์



รูปที่ 4.21 สเปกตรัมรามานของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ที่เงื่อนไขการปลูกที่กำลังคลื่นวิทยุต่างกัน

#### 4.3.3 ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงชนิดของฐานรองรับ

จากการวิเคราะห์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์บนฐานรองรับต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ ซิลิกอน แผ่นแก้วโบโรซิลิเกต และพลาสติก PET โดยให้เวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 10:30 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์แสดงในรูปที่ 4.22 ลักษณะของพีคที่ขยายกว้างแสดงให้เห็นว่าฐานรองรับมีผลต่อความเป็นผลึกของฟิล์มบาง



รูปที่ 4.22 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โดยฐานรองรับต่างกัน

จากการคำนวณขนาดของเม็ดผลึกพบว่าขนาดของเม็ดผลึกจะแตกต่างกันในแต่ละฐานรองรับ ดังแสดงตามตารางที่ 4.5 โดยฟิล์มบางที่ปลูกบนฐานรองรับซิลิกอนจะมีขนาดของเม็ดผลึกโตกว่าฐานรองรับที่เป็นกระจกและพลาสติกและมีความเป็นผลึกที่ดีกว่าฐานรองรับที่เป็นกระจกและพลาสติก

ตารางที่ 4.5 ขนาดของเม็ดผลึกที่คำนวณจาก XRD ของฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่มีฐานรองรับต่างกัน

Substrate	Grain size ( $\text{\AA}$ )
Silicon	80
Borosilicate glass	57
PET plastic	42

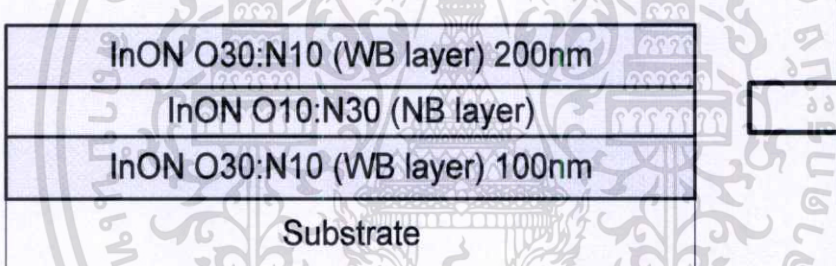
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น

จากสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงแถบพลังงาน ต้องห้ามตามองค์ประกอบของฟิล์ม โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในไตรเจน จึงนำมาเป็นแนวความคิดในการสร้างฟิล์มบางแบบหลายชั้นเพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติใหม่ๆ ในการประยุกต์ใช้ในงานด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบประกบด้วยแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง โครงสร้างมีลักษณะคล้ายบ่อศักย์ เมื่อให้พลังงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้าง

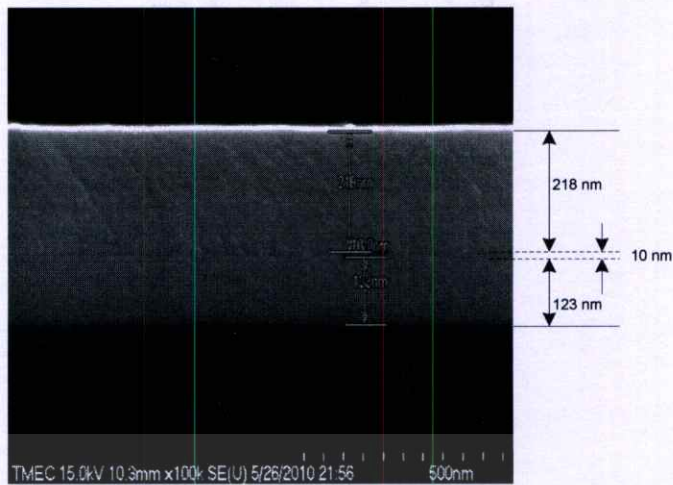
##### 4.4.1 โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบประกบด้วยชั้นแถบพลังงานกว้าง

รูปที่ 4.23 แสดงโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์แบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ (Narrow Band Layer: NB layer) ประกบด้วยชั้นแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง (Wide Band Layer: WB layer) ซึ่งชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ ปลูกโดยเงื่อนไขอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในไตรเจนเท่ากับ 10:30 sec ส่วนชั้นแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง ปลูกโดยเงื่อนไขอัตราการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อในไตรเจนเท่ากับ 30:10 sec



รูปที่ 4.23 โครงสร้างฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์แบบหลายชั้น

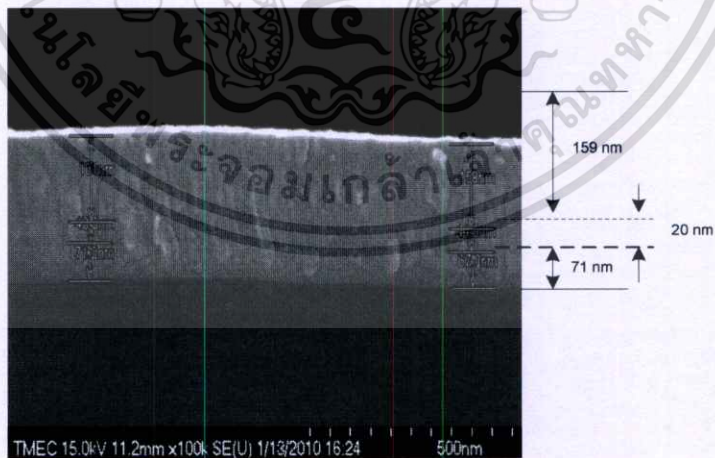
กำหนดให้ความหนาของฟิล์มชั้นแรกที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (buffer) หนา 100 nm ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หนาเท่ากับ 10 nm, 20 nm และ 40 nm ชั้นสุดท้ายหนา 200 nm ตรวจสอบชั้นฟิล์มที่ได้ด้วย SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.24



ก) 10 nm



ข) 20 nm

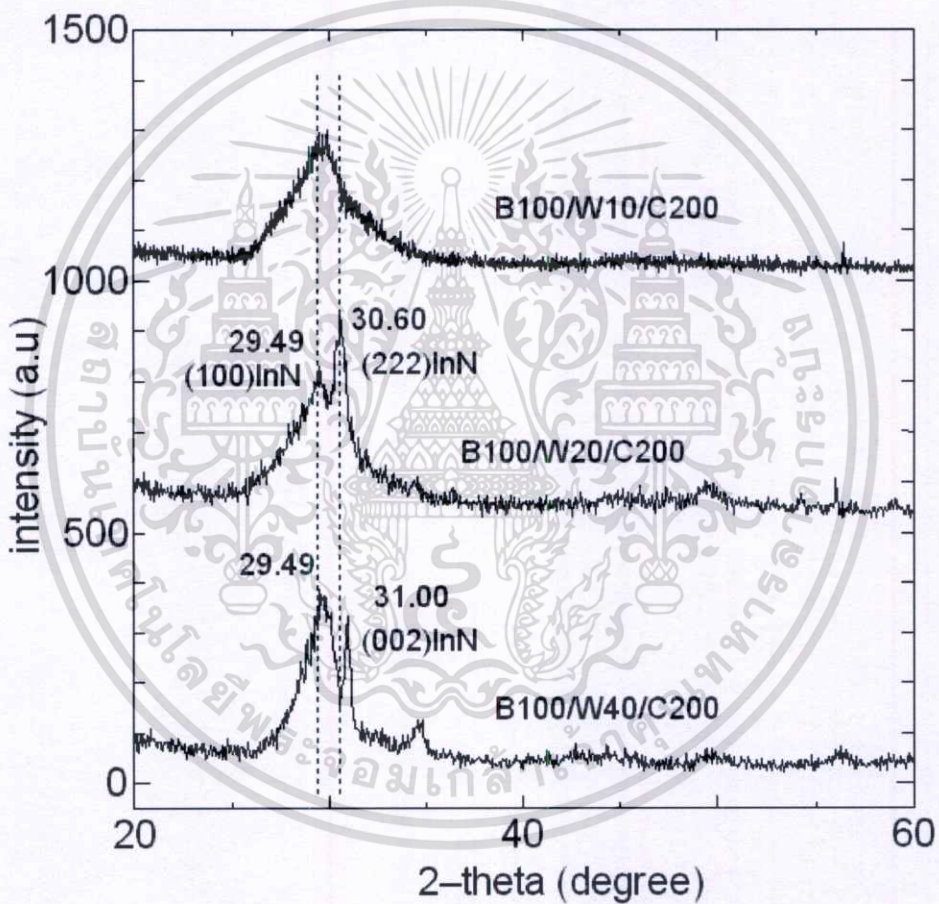


ค) 40 nm

**รูปที่ 4.24** ภาพ SEM ของฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดรด์ โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้น  
แถบพลังงานแคบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.25 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าที่มุมประมาณ  $30^\circ$  มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพีคที่มีลักษณะแผ่ขยายกว้างกลายเป็น 2 พีค ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มความหนาของชั้นบ่อศักย์ อธิบายได้ว่า การแผ่ขยายของพีคการเลี้ยวเบนเกิดจากการซ้อนทับกันของระนาบการเลี้ยวเบนที่อยู่ใกล้กัน โดยไม่มีระนาบใดระนาบหนึ่งเด่นขึ้นมา เมื่อเฟสของอินเดียมไนไตรด์เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มความหนาของชั้นบ่อศักย์ เกิดการแยกของพีคที่ชัดเจนขึ้น ระนาบการเลี้ยวเบนที่มุม  $29.49^\circ$  สอดคล้องกับระนาบ (100) ของอินเดียมไนไตรด์โครงสร้างเฮกซะโกนอล และระนาบการเลี้ยวเบนที่มุม  $30.58^\circ$  สอดคล้องกับระนาบ (222) ของอินเดียมออกไซด์โครงสร้างแบบคิวบิก

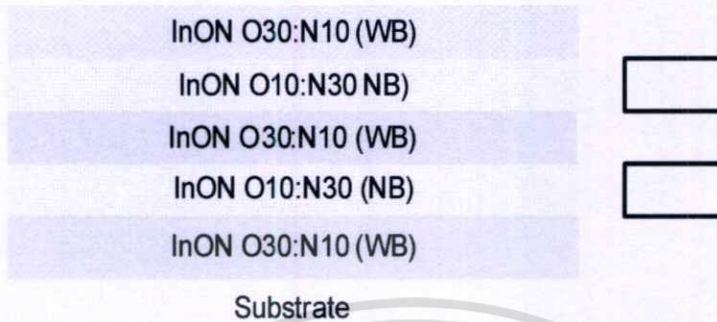


รูปที่ 4.25 สเปกตรัม XRD ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์แบบหลายชั้น

#### 4.4.2 ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบจำนวน 2 ชั้น

ทำการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ไนไตรด์แบบหลายชั้น โดยการเพิ่มชั้นแถบพลังงานแคบ จำนวน 2 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานทั้งในชั้นสารเอกสสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และรอยต่อระหว่างชั้นสาร ทำการเปลี่ยนความหนาของชั้นแถบพลังงานแคบ เท่ากับ 10nm, 20nm และ 40 nm รูปที่ 4.27 แสดงภาพ SEM ของฟิล์มบางที่ความหนาของชั้นแถบพลังงานแคบ เท่ากับ 40 nm



รูปที่ 4.26 อินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบจำนวน 2 ชั้น

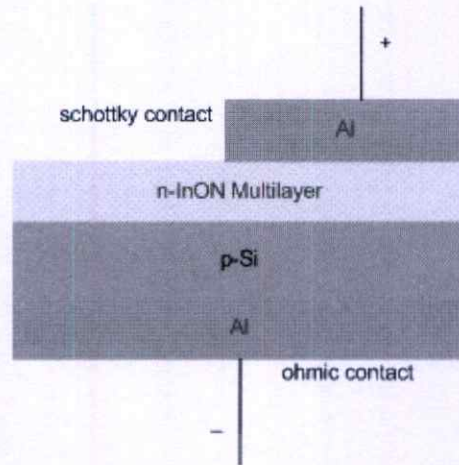


รูปที่ 4.27 ภาพ SEM ของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบจำนวน 2 ชั้น

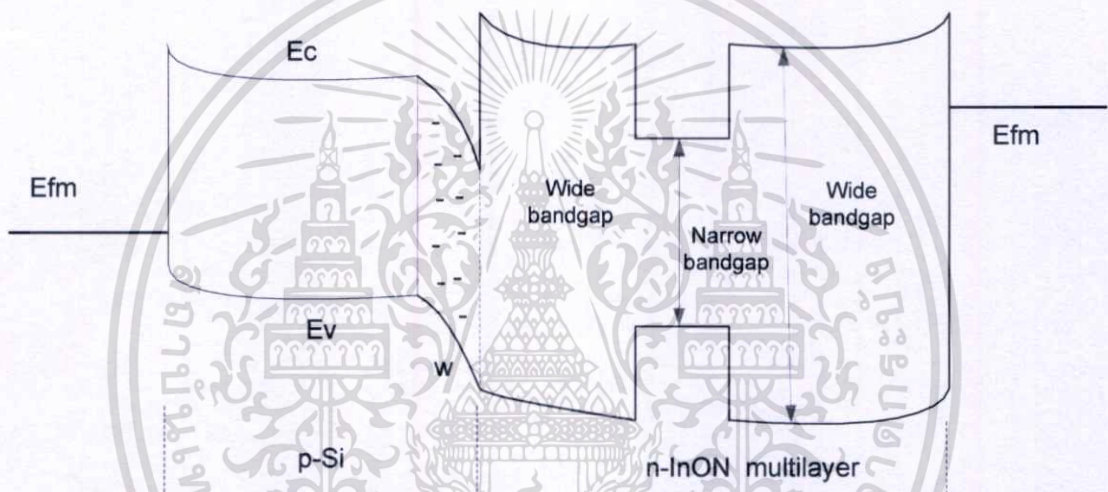
#### 4.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น

ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น นำมาศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยทำการปลูกโครงสร้างขั้วแสดงในรูปที่ 4.28 ชั้นออกซิมนัมที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านซิกอนทำหน้าที่เป็นขั้วโอห์มิก สำหรับชั้นออกซิมนัมที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ทำหน้าที่เป็นขั้วแบบชอตต์กี ซึ่งไดอะแกรมโครงสร้างแถบพลังงานแสดงในรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

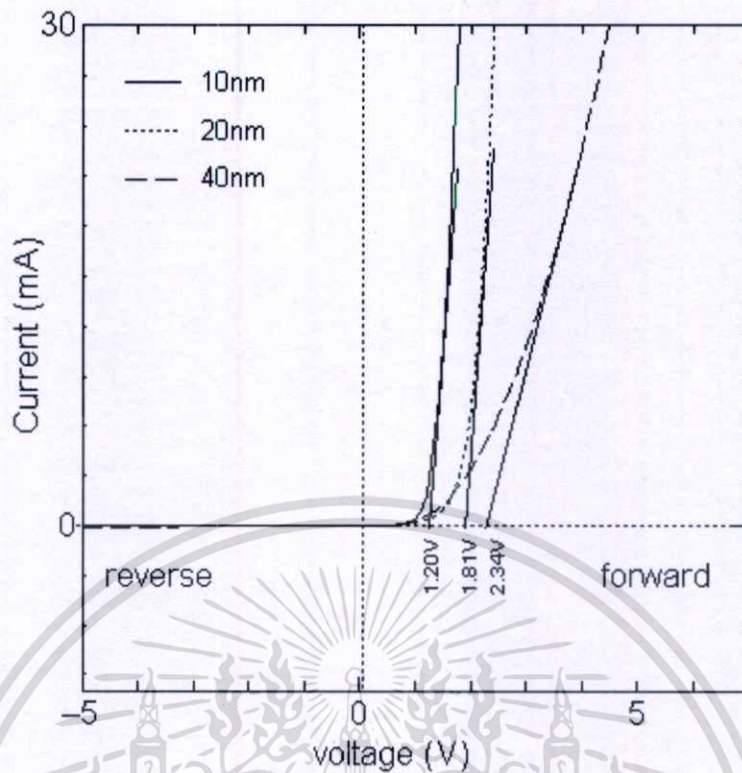


รูปที่ 4.28 โครงสร้างขั้วไฟฟ้าบนฟิล์มบางอินเดียมออกซิได์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น



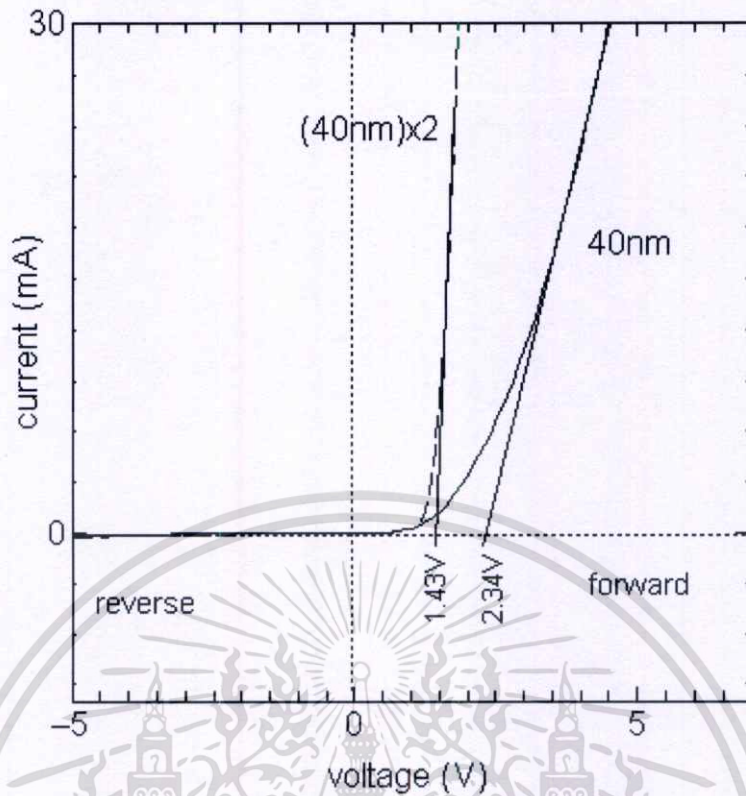
รูปที่ 4.29 โครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางอินเดียมออกซิได์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้น โดยมีแถบพลังงานต้องห้ามแคบประกบด้วยแถบพลังงานต้องห้ามกว้าง

ในรูปที่ 4.30 แสดงสมบัติกระแส-แรงดันของอินเดียมออกซิได์ในไตรด์ที่ความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน พบว่า ทุกเงื่อนไขการปลูกได้โครงสร้างที่มีสมบัติเป็นไดโอด แรงดันขั้วเริ่มเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ โดยที่ความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ ที่ความหนา 10 nm, 20nm และ 40nm มีค่าแรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ 1.20V, 1.81V และ 2.34V ตามลำดับ



**รูปที่ 4.30** สมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในโครงสร้างหลายชั้นที่มีความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน

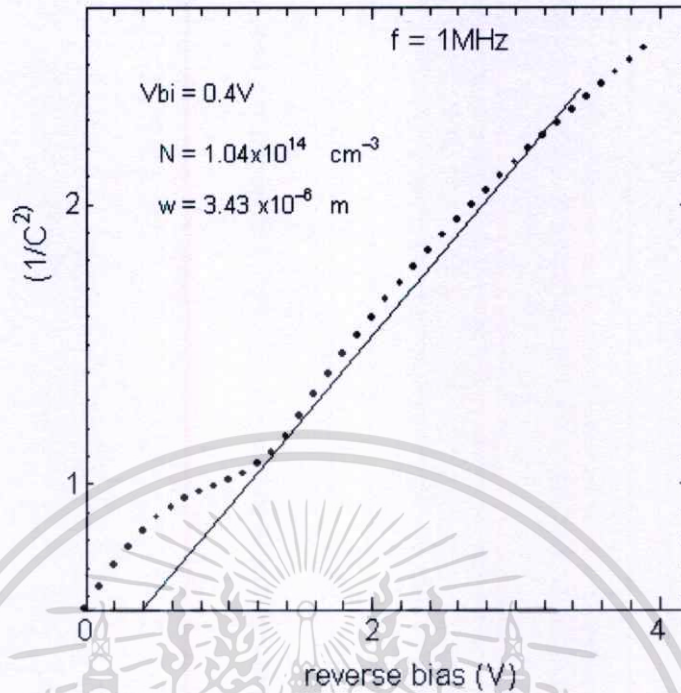
ในรูปที่ 4.31 แสดงสมบัติกระแส-แรงดัน ของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ใน โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน พบว่าการเพิ่มชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบทำให้แรงดันขีดเริ่มลดลง โดยที่แถบพลังงานต้องห้ามแคบจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น มีค่าแรงดันขีดเริ่มเท่ากับ 2.34V และ 1.43V ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวจะอธิบายด้วยผลการทดลองที่จะกล่าวต่อไป



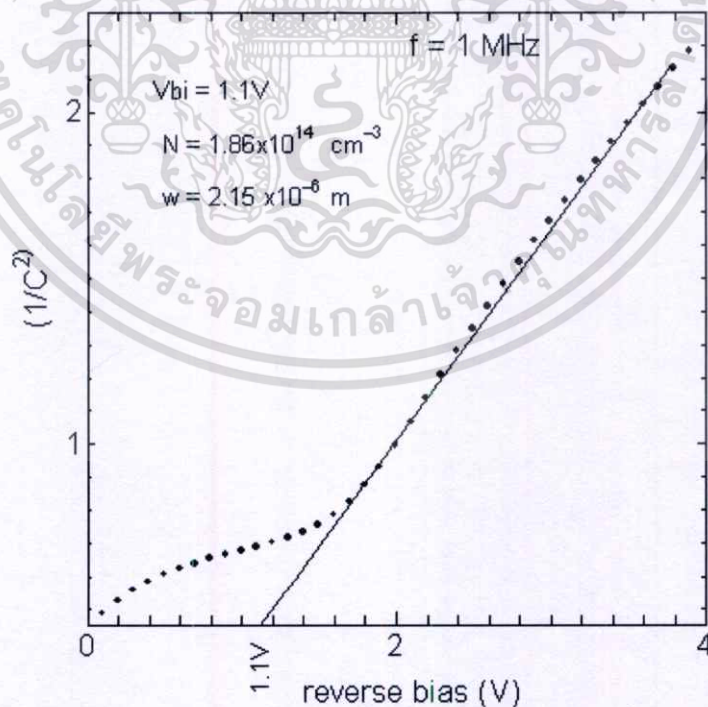
**รูปที่ 4.31** สมบัติกระแส-แรงดันของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างหลายชั้นที่มีจำนวนชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน

การวัดค่าความจุที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบแอสของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างหลายชั้น ในรูปที่ 4.32 -รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับแรงดันไบแอสกลับ ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ต เมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบเท่ากับ 10nm , 20nm และ 40nm ตามลำดับ สำหรับในรูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับแรงดันไบแอสกลับของโครงสร้างที่มีจำนวนชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบหนา 40nm จำนวน 2 ชั้น

จากกราฟที่ได้ ทำให้ทราบค่าศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ และจากความชันของกราฟนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) ตามสมการที่ (2.65) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากสมการที่ (2.63) ผลการคำนวณที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6

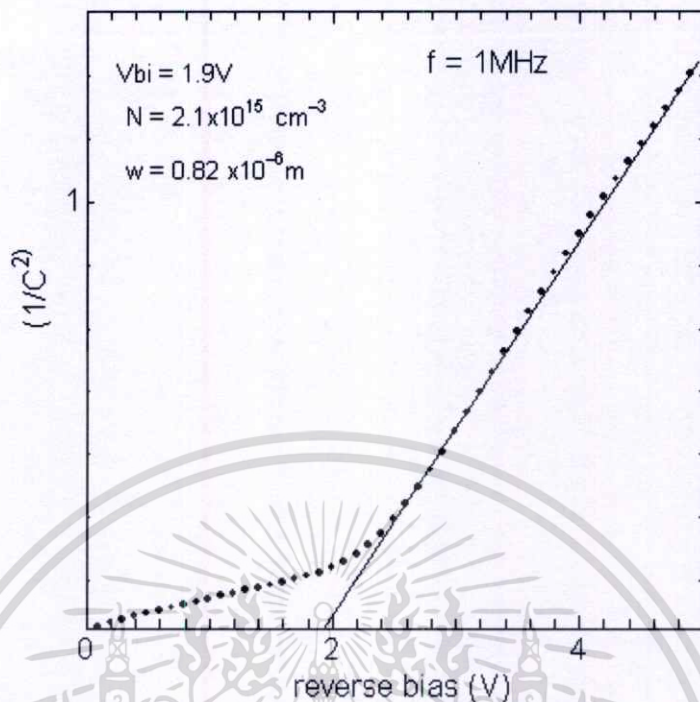
[ $2 \times 10^{17}$ ]

**รูปที่ 4.32** ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หน้า 10 nm

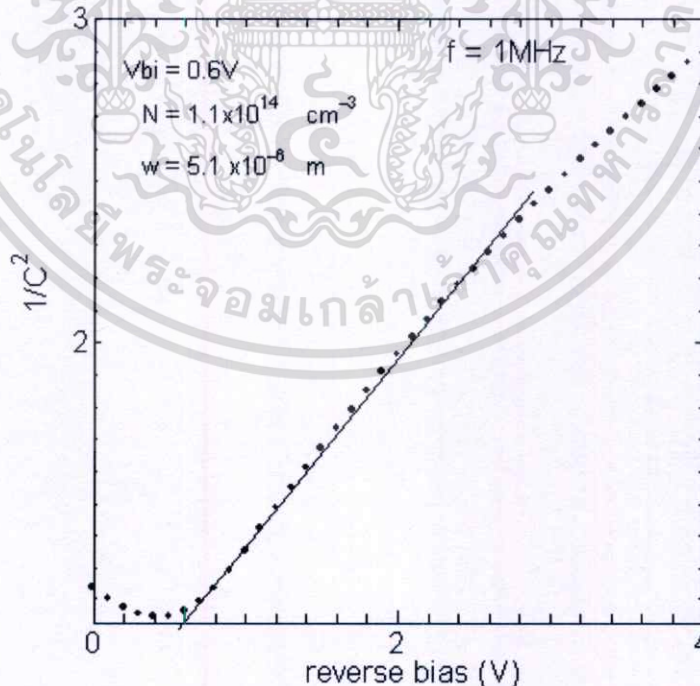
[ $\times 10^{17}$ ]

**รูปที่ 4.33** ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หน้า 20 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[ $2 \times 10^{+16}$ ]

**รูปที่ 4.34** ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หน้า 40 nm

[ $2 \times 10^{+17}$ ]

**รูปที่ 4.35** ค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และความกว้างของชั้นปลอดพาหะ (w) จากค่า C-V ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานแคบหน้า 40 nm จำนวน 2 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ ค่าความเข้มข้นพาหะ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะ และแรงดันขั้วเริ่มต้นที่ขึ้นอยู่กับความหนาและจำนวนชั้นของชั้นแถบพลังงานต้องห้าม แถบ กรณีที่จำนวนชั้นเท่ากัน เมื่อชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบมีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อและค่าความเข้มข้นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความกว้างของเขตปลอดพาหะจะลดลง จากสมบัติของกระแสที่ขึ้นกับแรงดันเนื่องจากค่าความเข้มข้นของพาหะเพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการค่าความเข้มข้นของพาหะ ซึ่งส่งผลทำให้ความกว้างของชั้นปลอดพาหะลดลง

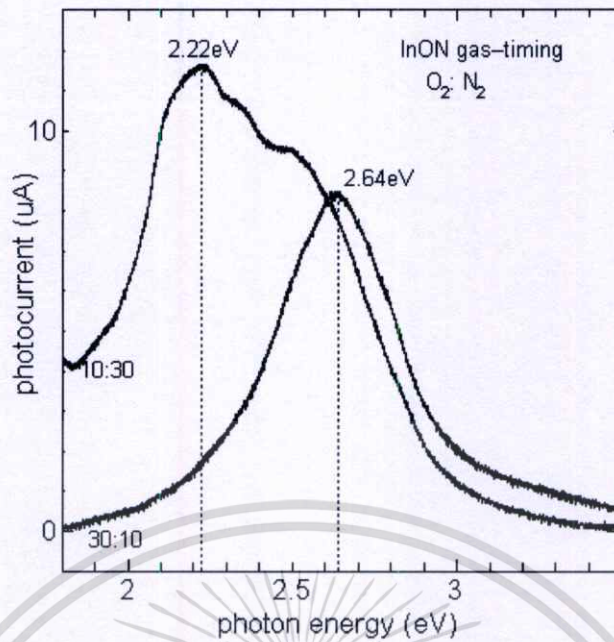
ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดค่าความจุที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส

ชั้นแถบพลังงานต้องห้าม		$V_{bi}$ (V)	N ( $cm^{-3}$ )	W ( $\mu m$ )	$V_{th}$ (V)
แถบ	ความหนา(nm)				
จำนวนชั้น					
1	10	0.4	$1.04 \times 10^{14}$	3.43	1.20
1	20	1.1	$1.86 \times 10^{15}$	2.15	1.81
1	40	1.9	$2.10 \times 10^{15}$	0.82	2.34
2	40	0.6	$1.10 \times 10^{14}$	5.10	1.43

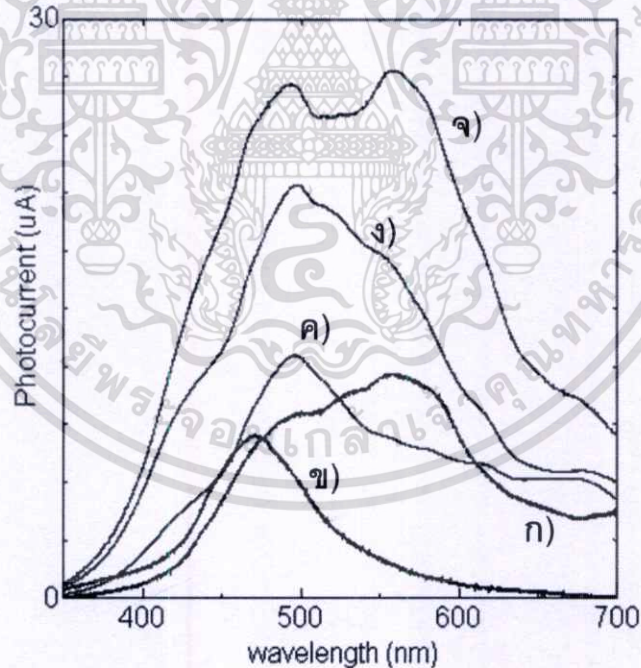
#### 4.6 สมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในโครงสร้างการวัดการตอบสนองต่อแสง

รูปที่ 4.36 แสดงการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในโครงสร้างโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อใน โครงเจน ซึ่งพบว่าฟิล์มบางที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อใน โครงเจนเท่ากับ 10:30 เกิดพีคที่ตำแหน่ง 2.22 eV และฟิล์มบางที่ปลูกโดยเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อใน โครงเจนเท่ากับ 30:10 เกิดพีคที่ตำแหน่ง 2.64 eV แสดงให้เห็นว่าสามารถทำการเปลี่ยนแปลงช่วงการตอบสนองต่อแสงได้โดยการเปลี่ยนปริมาณของออกซิเจนและใน โครงเจนในฟิล์ม

รูปที่ 4.37 แสดงการตอบสนองของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีความหนาของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแตกต่างกัน โดยเทียบกับฟิล์มบางที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว ซึ่งพบว่าเมื่อความหนาลดลงมีการตอบสนองต่อแสงที่ดีขึ้น เมื่อพิจารณาผลจากค่าศักย์ไฟฟ้าภายในที่มีค่าลดลงตามความหนา จึงสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำแพงศักย์ลดลงทำให้กระแสไหลได้ดีขึ้น



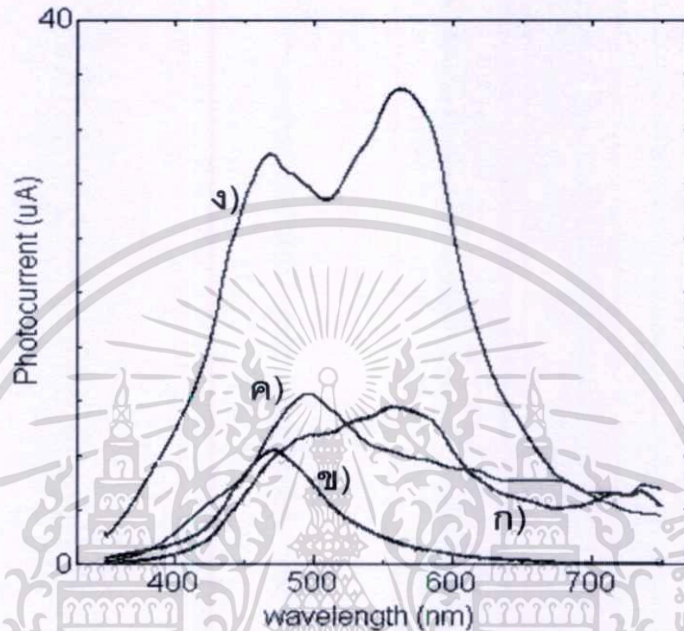
**รูปที่ 4.36** ผลการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซออกซิเจนต่อไนโตรเจน



**รูปที่ 4.37** การตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ ก) InON timing [O:N=10:30] ข) InON timing [O:N=30:10] ค) โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบมีความหนาเท่ากับ 40nm ง) 20 nm และ จ) 10 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.38 แสดงผลการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ โครงสร้างที่มีชั้นพลังงานต้องห้ามแคบมีความหนาเท่ากับ 40 nm จำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ตามลำดับ พบว่าเมื่อจำนวนชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบเพิ่มขึ้น ทำให้ตอบสนองต่อแสงได้ดีขึ้น ซึ่งเกิดจากผลของศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อที่ลดลง

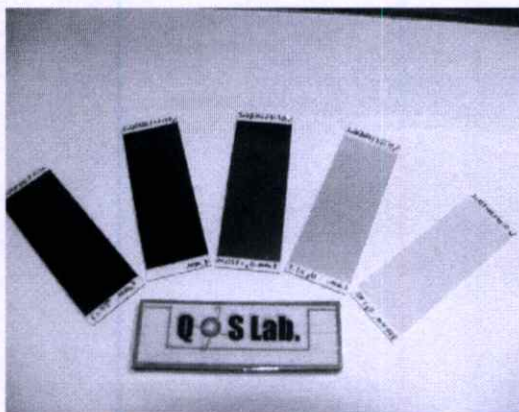


รูปที่ 4.38 การตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ ก) InON timing [O:N=30:10] ข) InON timing [O:N=30:10] ค) โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นพลังงานต้องห้ามแคบมีความหนาเท่ากับ 40 nm จำนวน 1 ชั้น และ ง) 2 ชั้น

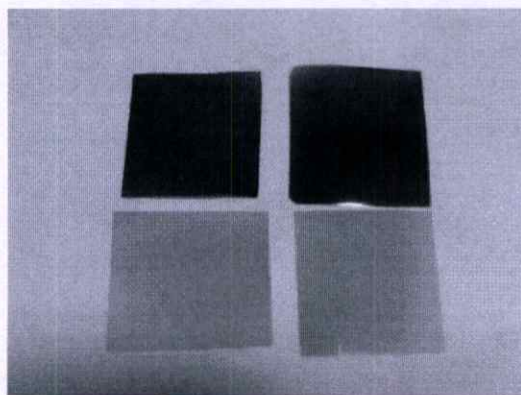
#### 4.7 การประยุกต์ใช้งานอินเดียมออกไซด์ในไตรด์

##### 4.7.1 การประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแสง

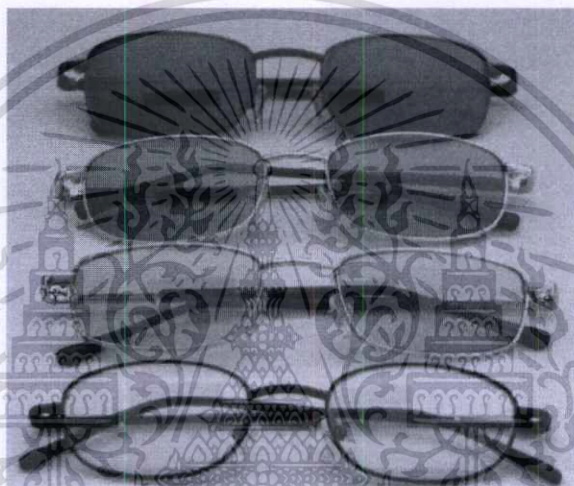
ฟิล์มบางผลึกนาโนอินเดียมออกไซด์ในไตรด์มีสมบัติทางแสงที่น่าสนใจหลายประการ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงย่านการตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านยูวีจนถึงย่านใกล้แดง ในเบื้องต้นได้นำสมบัติดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแสงยูวีและแสงในย่านต่างๆ เช่น แสงเลเซอร์สีน้ำเงินจากฮีเลียมแคดเมียมเลเซอร์ แสงสีเขียวจากอาร์กอนเลเซอร์ เป็นต้น สำหรับฐานรองรับที่ใช้ในการปลูกฟิล์มขึ้นอยู่การนำไปใช้งาน เช่น กระดาษ พลาสติก หรือบนเลนส์ ในรูปที่ 4.39 แสดงลักษณะการเตรียมฟิล์มบนฐานชนิดต่างๆ



ก)



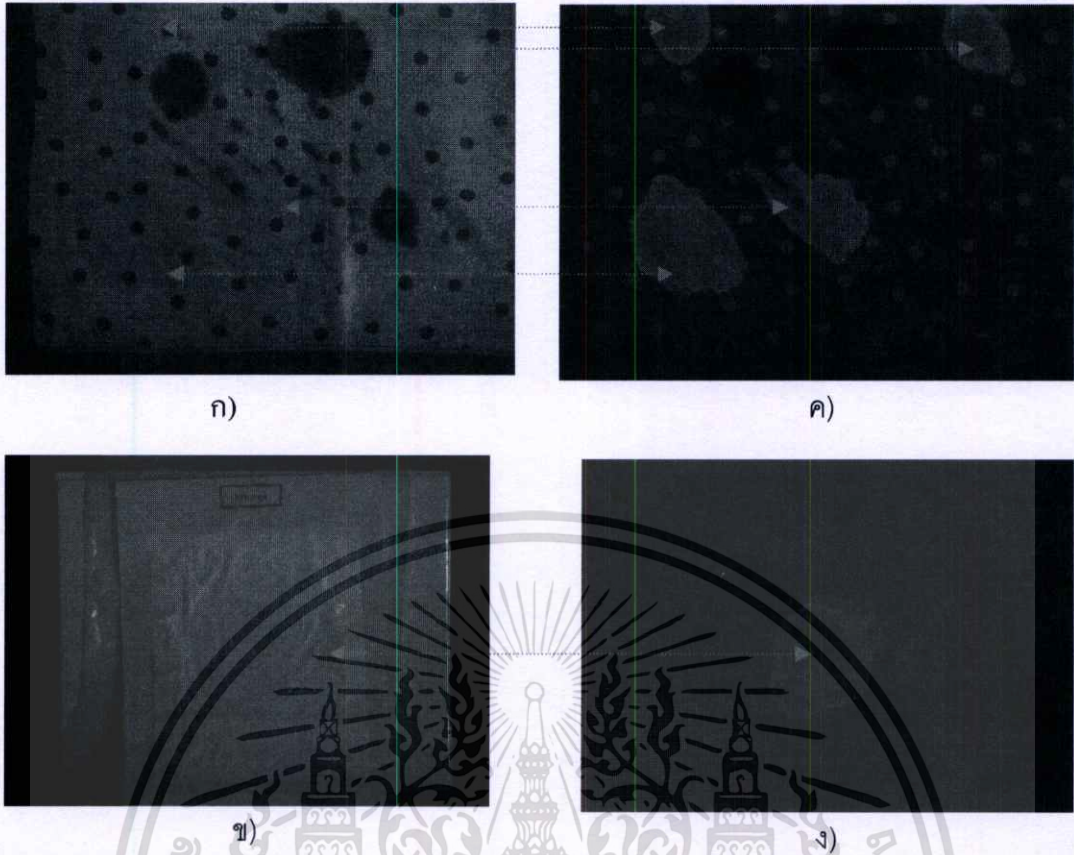
ข)



ค)

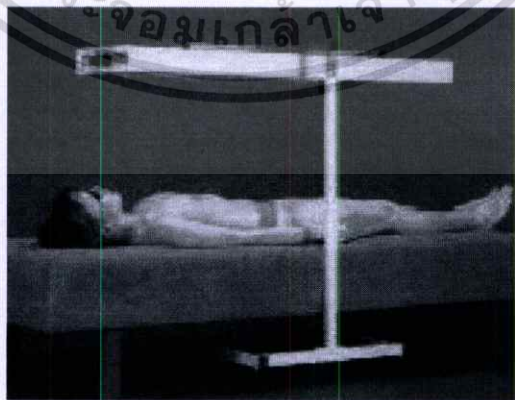
รูปที่ 4.39 फिल्मอินเดียมออกซีไนด์ (ก) บนกระจก ข) บนพลาสติก ค) บนเลนส์

ในทางนิติวิทยาศาสตร์ได้นำแสงยูวีมาหาหลักฐานที่เป็นพยานวัตถุในที่เกิดเหตุได้ ซึ่งได้แก่วัตถุพยานจำพวกสารคัดหลั่งต่างๆ จากคดีฆาตกรรมหรือคดีข่มขืน เช่น เลือด น้ำเหลือง น้ำหนอง น้ำลาย อสุจิ เป็นต้น สารคัดหลั่งเหล่านี้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวี จะเกิดการเรืองแสงขึ้น แต่การเรืองแสงดังกล่าวถูกบดบังโดยแสงยูวีที่ส่องทำให้ไม่สามารถมองเห็นการเรืองแสงได้ อุปกรณ์แว่นตานิโครสทอลอินเดียมออกซีไนด์ในไตรด์ สามารถตัดแสงยูวีดังกล่าวออกไปทำให้สามารถมองเห็นการเรืองแสงของสารคัดหลั่งได้ ในรูปที่ 4.40 แสดงร่องรอยของสารคัดหลั่งที่เป็นคราบอสุจิจากที่เกิดเหตุก่อนและหลังการใช้แว่นตานิโครสทอล



รูปที่ 4.40 ร่องรอยคราบอสุจิ ก) และ ข) ก่อนใช้ ค) และ ง) หลังใช้แว่นตานิโครสตอล

ปัจจุบันมีการใช้แสงเลเซอร์และแสงย่านยูวีมาใช้ในวงการแพทย์อย่างแพร่หลาย ทั้งการรักษาโรค ผ่าตัด ศัลยกรรมตกแต่งเสริมความงาม เช่น ใช้แสงยูวีการรักษาโรคสะเก็ดเงิน เครื่องยูวีสำหรับการอุดฟัน รวมทั้งแสงเลเซอร์สำหรับผ่าตัด อุปกรณ์กรองแสงฟิล์มบางนาโนคริสตอลอินเดียมออกไซด์ในไดรค์ สามารถป้องกันไม่ให้แพทย์และผู้ป่วยโดนแสงยูวีขณะใช้งาน



รูปที่ 4.41 การนำแว่นตานิโครสตอลมาใช้ทางการแพทย์เพื่อรักษาโรคสะเก็ดเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



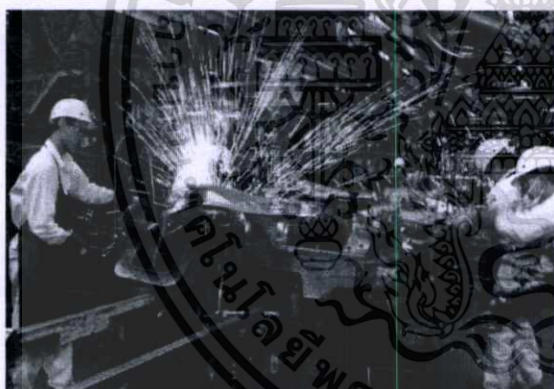
ก)



ข)

รูปที่ 4.42 การนำแว่นตานาโนคริสตอลมาใช้ทางการแพทย์ ก) การอุดฟัน ข) การบำรุงผิวด้วยแสง

ในด้านอุตสาหกรรมสามารถนำไปใช้ในงานด้านการเชื่อมโลหะ จากการทดสอบสามารถตัดแสงย่านยูวีที่เป็นอันตรายออกไป รวมทั้งลดความเข้มแสงในย่านที่มองเห็นบางส่วน สามารถมองเห็นชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม และในขณะที่เชื่อมมองเห็นบ่อหลอมทำให้สามารถกำหนดแนวการเชื่อมได้ดี

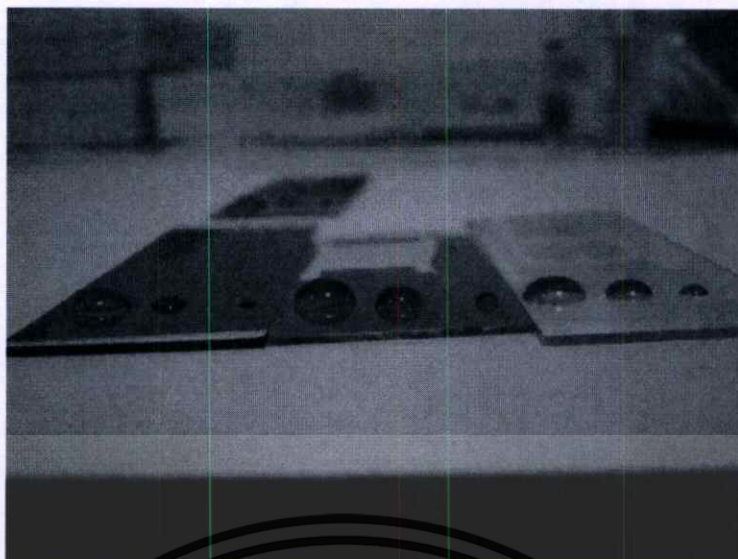


รูปที่ 4.43 การนำแว่นตานาโนคริสตอลใช้ในทางอุตสาหกรรม

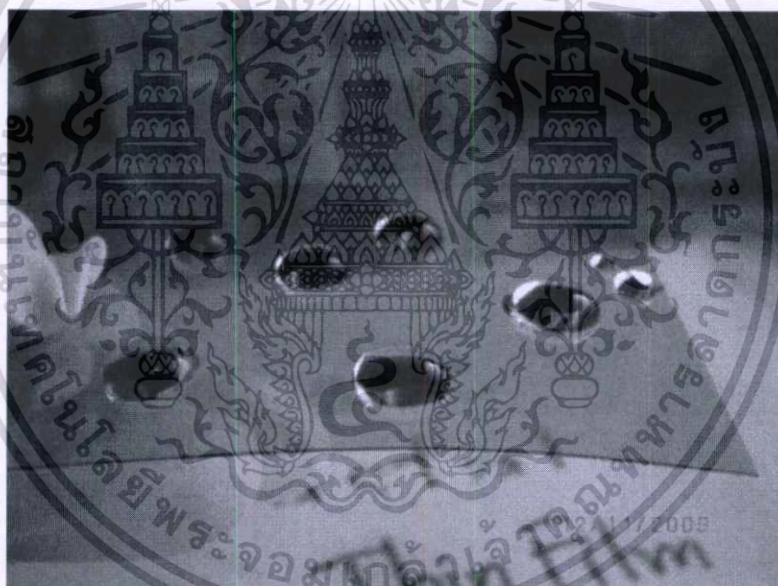
#### 4.7.2 การประยุกต์ใช้งานด้านการปรับปรุงพื้นผิว

ฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดน ไตรด์ที่เตรียมโดยเงื่อนไขต่างๆ จะมีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน จึงสามารถนำไปใช้ปรับปรุงพื้นผิวให้มีลักษณะต่างๆ เช่น พื้นผิวแบบชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ และเนื่องจากสมบัติของฟิล์มที่สามารถเป็นได้ทั้งตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน สามารถนำสมบัติที่เป็นตัวนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระจกไล่ฝ้า (antifog) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

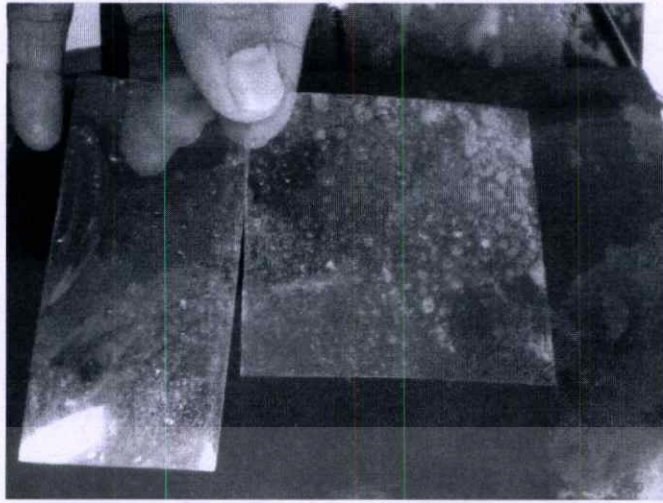


รูปที่ 4.44 การเกิดไฮโดรโฟบิกบนกระจกที่เคลือบอินเดียมออกไซด์ในไตรด์



รูปที่ 4.45 การเกิดไฮโดรโฟบิกบนพลาสติกที่เคลือบอินเดียมออกไซด์ในไตรด์

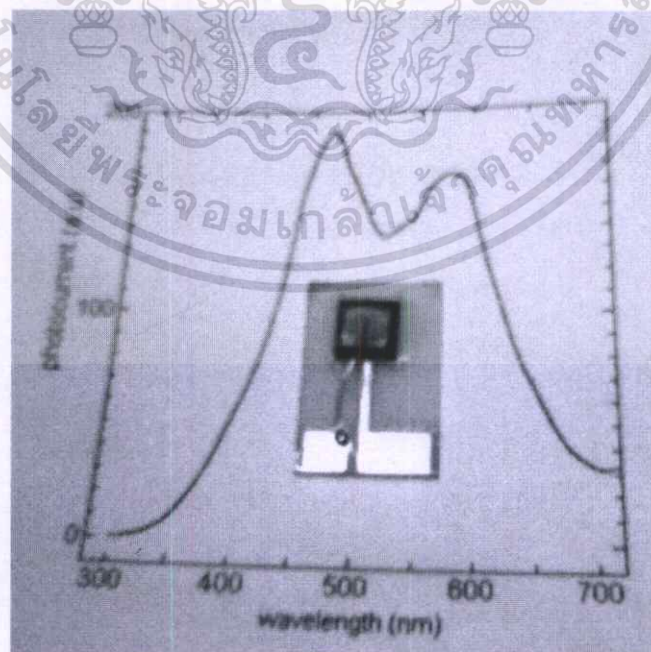
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 การทดสอบวิธีการ self cleaning ด้วยฟิล์มอินเดียมออกไซด์ใน ไตรด์

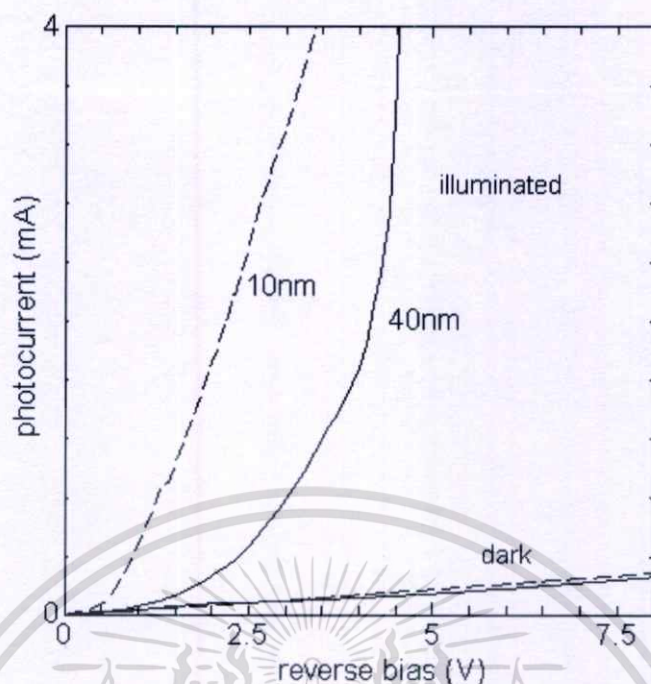
#### 4.7.3 การประยุกต์ใช้งานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

จากผลการวัดสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ใน ไตรด์ที่ปลูกโดยเงื่อนไขต่าง สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ได้แก่ ดีเทคเตอร์ในย่านต่างๆซึ่งกำหนดโดยเงื่อนไขการปลูกฟิล์มทั้งที่เป็นชั้นเดียวและ โครงสร้างแบบหลายชั้น ในอนาคตมีแนวโน้มที่จะพัฒนา โครงสร้างเป็นอุปกรณ์เปล่งแสงในย่านต่างๆ หรือพัฒนาเป็น โครงสร้างแบบไฮบริดระหว่างสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ได้

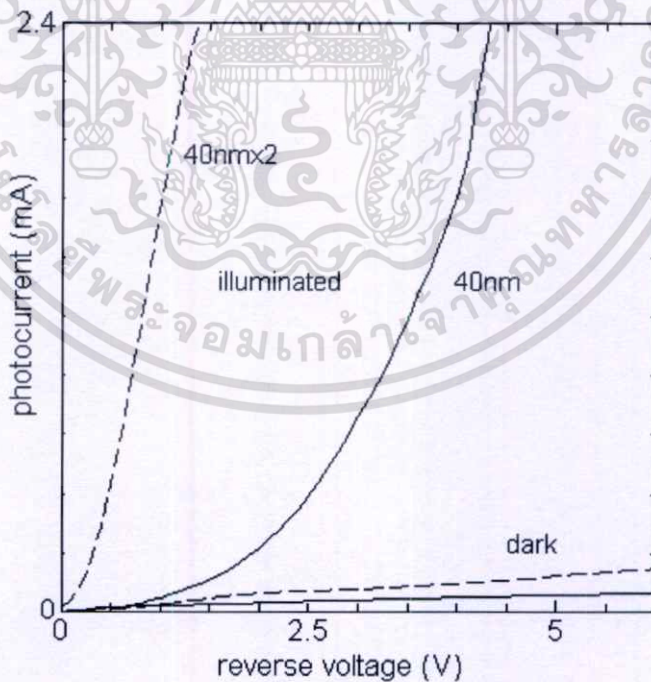


รูปที่ 4.47 การประยุกต์ฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์เป็นอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.48** การนำกระแสเมื่อมีการฉายแสงของโฟโตดีเทคเตอร์อินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบ หนาเท่ากับ ก) 10 nm ข) 40 nm



**รูปที่ 4.49** การนำกระแสเมื่อมีการฉายแสงของโฟโตดีเทคเตอร์อินเดียมออกไซด์ในไตรด์โครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีจำนวนของชั้นแถบพลังงานต้องห้ามแคบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการวิจัย ได้ทำการปลูกฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดรด์ที่เตรียมโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่าเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยา พบว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถเตรียมฟิล์มบางอินเดียม อินเดียมไนไตรด์ อินเดียมออกไซด์และอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ได้ จากการปรับปรุงระบบสปีดเตอริงโดยการเพิ่มระบบควบคุมก๊าซ สามารถควบคุมลำดับและเวลาการปล่อยก๊าซอาร์กอน ไนโตรเจนและออกซิเจนที่ใช้ในระบบได้ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ที่ปลูกโดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเวลาการปล่อยก๊าซ การเปลี่ยนแปลงกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม และการเปลี่ยนแปลงชนิดของฐานรองรับ

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สามารถสรุปได้ว่า

-ฟิล์มบางอินเดียมมีผลึกขนาด 20-25 nm มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) ซึ่งมีมุม XRD อยู่ที่  $32.9^\circ$ ,  $36.3^\circ$  และ  $39.1^\circ$  สอดคล้องกับระนาบ (101), (002) และ (110) ตามลำดับ

-ฟิล์มบาง InN มีผลึกขนาด 10-20 nm โครงสร้างเฮกซะโกนอล (hexagonal) ซึ่งมีมุม XRD อยู่ที่  $31.1^\circ$  และ  $65.32^\circ$  สอดคล้องกับระนาบ (002) และ (004) ตามลำดับ

-ฟิล์มบาง InON มีผลึกประมาณ 30 nm มีพีค XRD ผสมอยู่ระหว่างพีคของ InN และ  $In_2O_3$  โดยที่จะเข้าใกล้เฟสของ InN มากขึ้นเมื่อป้อน  $O_2$  เข้าสู่ระบบปลูกน้อยลง และเข้าใกล้เฟส  $In_2O_3$  มากขึ้นเมื่อป้อน  $O_2$  เข้าสู่ระบบปลูกมากขึ้น

-สามารถปลูกฟิล์มบาง In, InON, InO บนฐานรองรับได้ทุกชนิด (ซิลิกอน แก้ว พลาสติก)

จากการศึกษาสมบัติทางแสง สามารถสรุปได้ว่า

-ได้ฟิล์มบาง (InN-InON-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่มีย่านการส่องผ่านของแสงครอบคลุมตั้งแต่ ย่านใกล้แดง (near-IR) จนถึงย่านยูวี (UV) โดยขึ้นอยู่กับเวลาในการป้อนก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนเข้าสู่ระบบปลูก

-เมื่อเวลาของการปล่อย  $O_2$  เพิ่มขึ้น สเปกตรัมของการส่องผ่านจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ต่ำกว่าจนเข้า

สู่อ่านยูวี

-ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน พบว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้มีค่าแถบพลังงานต้องห้าม (optical bandgap) เปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 1.5 eV ถึง 3.4 eV

จากการศึกษาสมบัติทางเคมี สามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-จากการวิเคราะห์ด้วย AES พบว่า ฟิล์มบางที่ปลูกได้ด้วยด้วยเทคนิคควมเวลาก๊าซ มีองค์ประกอบของ In, N และ O เป็นฟิล์มบาง  $\text{InO}_x\text{N}_y$

-มีปริมาณ O เพิ่มขึ้น ในฟิล์มที่ปลูกเมื่อเวลาในการปล่อย  $\text{O}_2$  เข้าสู่ระบบมากขึ้น และมีปริมาณ N มากกว่า O ในฟิล์มที่ปลูกเมื่อเวลาในการปล่อย  $\text{O}_2$  เข้าสู่ระบบลดลง ในขณะที่ปริมาณของ In ค่อนข้างคงที่

-จากการวิเคราะห์ด้วยรามาน พบว่า ฟิล์มที่ปลูกด้วยเวลาของ  $\text{N}_2$  อย่างเดียว (InN) มีพีกที่ตำแหน่ง  $480 \text{ cm}^{-1}$  และ  $560 \text{ cm}^{-1}$

-ฟิล์มที่ปลูกด้วยเวลาของ  $\text{O}_2$  อย่างเดียว ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง  $496 \text{ cm}^{-1}$ ,  $540 \text{ cm}^{-1}$

- ฟิล์มที่ปลูกด้วยเวลาของ  $\text{O}_2:\text{N}_2$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีก ซึ่งมีลักษณะผสมอยู่ระหว่างพีกของ InN และ  $\text{In}_2\text{O}_3$

-เป็นการยืนยันได้ว่าด้วยเทคนิคการควบคุมเวลาก๊าซไวปฏิกิริยาสามารถปลูกฟิล์มบางที่มีเฟสผสมระหว่าง InN และ  $\text{In}_2\text{O}_3$  ได้

-จากการวิเคราะห์ด้วย XANES พบว่าฟิล์มบาง InN มีโครงสร้างแบบ fourfold และฟิล์มบาง  $\text{In}_2\text{O}_3$  มีโครงสร้างแบบ sixfold

-การเปลี่ยนแปลงเวลาของการปล่อย  $\text{O}_2:\text{N}_2$  ในระบบ ทำให้โครงสร้างผลึกนาโนอยู่ในรูปของ  $(\text{InN}_{0.6}\text{O}_{0.4})_F(\text{InO}_{1.5})_{1-F}$

-ที่เวลาของการปล่อย  $\text{O}_2:\text{N}_2 = 10:30 \text{ sec}$  มีค่า  $F = 0.49$  และ  $\text{O}_2:\text{N}_2 = 20:30 \text{ sec}$  มีค่า  $F = 0.38$  และมีความสัมพันธ์  $\text{O}:\text{In} = 0.4F + 1.5(1-F)$

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่า

-ค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม InON เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการปล่อย  $\text{O}_2$  เข้าสู่ระบบมากขึ้น

-ค่าความเข้มข้นพาหะลดลง เมื่อเวลาในการปล่อย  $\text{O}_2$  เข้าสู่ระบบมากขึ้น

-ค่าความคล่องตัวของพาหะลดลง เมื่อเวลาในการปล่อย  $\text{O}_2$  เข้าสู่ระบบมากขึ้น

จากการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแบบหลายชั้น สามารถสรุปได้ว่า

-แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) ลดลง เมื่อชั้น  $E_g$  แคบ มีความหนาแน่นลดลง

-แรงดันขีดเริ่ม ( $V_{th}$ ) ลดลง เมื่อมีจำนวนชั้นของ  $E_g$  แคบ น้อยลง

-ค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน ( $V_{bi}$ ) ลดลง เมื่อชั้น  $E_g$  แคบ มีความหนาแน่นลดลง

-ค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน ( $V_{bi}$ ) ลดลง เมื่อมีจำนวนชั้นของ  $E_g$  แคบ เพิ่มขึ้น

จากสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมออกซิไดร์ที่ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้แก่ การนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแสงที่สามารถเปลี่ยนแปลงย่านการตัดแสงได้ตั้งแต่ย่านยูวีไปถึงย่านใกล้สีแดง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ การแพทย์ และทางอุตสาหกรรม การนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุ เช่นทำให้พื้นผิวชอบน้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือไม่ชอบน้ำ การป้องกันการเกิดฝ้าบนกระจก เป็นต้น การนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ในย่านต่างๆซึ่งกำหนดโดยเงื่อนไขการปลูกฟิล์มทั้งที่เป็นชั้นเดียวและโครงสร้างแบบหลายชั้น ในอนาคตมีแนวโน้มที่จะพัฒนาโครงสร้างเป็นอุปกรณ์เปล่งแสงในย่านต่างๆ หรือพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบไฮบริดระหว่างสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] J.C Angus, [www.cwru.edu/cse/eche/people/faculty/angus/plate.html](http://www.cwru.edu/cse/eche/people/faculty/angus/plate.html), (2005)
- [2] A.G. Bhuiyan, A. Hashimoto & A. Yamamoto, *J. Appl. Phys.* 94(5), 2779, 2808 (2003)
- [3] S.N. Mohammad & H. Morkoc, *Quantum Electron.* 20(5-6), 361-525 (1996)
- [4] T.L. Tansley & C.P. Foley, *Electron. Lett.* 20(25-26), 1066-1068 (1984)
- [5] S.C. Binari & H.C. Dietrich, New York, pp. 509-534 (1997)
- [6] T.L. Tansley & C.P. Foley, *J. Appl. Phys.* 60(6), 2092-2095 (1986a)
- [7] A. Yamamoto, M. Tsujino, M. Ohkubo & A. Hashimoto, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 35(1-4), 53-60 (1994a)
- [8] K.S.A. Butcher, Q. Guo (Ed.), *Advanced Material in Electronics*, Research Signpost, 2004, p. 1.
- [9] T. Matsuoka, H. Okamoto, M. Nakao, H. Harima & E. Kurimoto, *Appl. Phys. Lett.* 81(7), 1246-1248 (2002)
- [10] V.Yu. Davydov, A.A. Klochikhin, R.P. Seisyan, V.V. Emtsev, S.V. Ivanov, F. Bechstedt, J. Furthmuller, H. Harima, A.V. Mudryi, J. Aderhold, O. Semchinova & J. Graul, *phys. stat. sol. (b)* 229(3), R1-R3 (2002b)
- [11] T.L. Tansley & C.P. Folley, *J. Appl. Phys.* 59, pp. 3241 (1986)
- [12] K. Osamura, K. Nakajima, Y. Murakami, P.H. Shingu, and A. Ohtsuki, *Solid State Commun.* 11, pp. 617-621 (1972)
- [13] H.J. Hovel, J.J. Cuomo, *Appl. Phys. Lett.* 20, 71 (1972)
- [14] V. Yu Davydov, A.A. Klochikhin, V.V. Emtsev, S.V. Ivanov, V.V. Vekshin, F. Bechstedt, J. Furthmuller, H. Harima, A.V. Mudryi, A. Hashimoto, A. Yamamoto, A.J. Aderhold, J. Graul, E.E. Haller, *Phys. Status Solidi b* 230, R4 (2002)
- [15] J.Wu, W. Walukiewicz, K.M. Yu, J.W. Ager III, E.E. Haller, H. Lu, W. Schaff, Y. Saito, Y. Nanishi, *Appl. Phys. Lett.* 80, 3967 (2002)
- [16] T. Inushima, V.V. Mamutin, V.A. Vekshin, S.V. Ivanov, T. Sakon, M. Motokawa, S. Ohoya, *J. Cryst. Growth* 227-228, 481 (2001)
- [17] V.Yu. Davydov, A.A. Klochikhin, V.V. Emtsev, D.A. Kurdyukov, S.V. Ivanov, V.A. Vekshin, F. Bechstedt, J. Furthmuller, J. Aderhold, Graul, A.V. Mudryi, Harima H., Hashimoto A., Yamamoto A. & E.E. Haller, *phys. stat. sol. (b)* 234(3), 787-795 (2002a)
- [18] F. Chen, A.N. Cartwright, H. Lu & W.J. Scha, *J. Cryst. Growth* 269, 10-14 (2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] A. Sungthong, S. Porntheeraphat, A. Poyai, and J. Nukeaw, *Applied Surface Science*, Vol. 254, pp. 7950–7954 (2008)
- [20] K.L. Westra, R.P.W. Lawson & M.J. Brett, *J. Vac. Sci. Technol. A* 6(3), 1730-1732 (1988)
- [21] C.P. Foley and J. Lyngdal, *J. Vac. Sci. Technol. A* 5, p. 1708 (1987)
- [22] S. Kumar, Li Mo, Motlan, T.L. Tansley, *Japan J. Appl. Phys.* 35, 2261 (1996)
- [23] M. Yoshimoto, H. Yamamoto, W. Huang, H. Harima, J. Saraie, A. Chayahara, Y. Horino, *Appl. Phys. Lett.* 83, 3480 (2003)
- [24] J.E. Lowther, *Phys. Rev. B* 72,172105 (2005)
- [25] Mounqi Bawendi, Klavs Jensen, Ray Ashoori and Paul Laibinis, *NSF Partnership in Nanotechnology Conference*, Jan. 29 & 30 (2001)
- [26] คุณิต เครื่องงาม, โสภิตศตเททฟิสิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, หน้า 296-298 (2535)
- [27] R.V. Stuart, Academic Press, New York (1983)
- [28] Donald L. Smith, McGraw-Hill, New York (1995)
- [29] Musil J, and Vleck, J. *Surface and Coatings Technology*, 112: 162-169 (1999)
- [30] N. Kietpaisalsophon, W. Bunjongpru and J. Nukeaw, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 16, No. 28&29, pp. 4418-4422, Nov. 20 (2002)
- [31] Annop Klamchuen, Nisaporn Pornteeraphat, and Jiti Nukeaw, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, Vol. 3, pp. 272-275 (2005)
- [32] R.Groth,E.Kauer, *Philips Tech.Rev.*26, 105 (1965 )
- [33] Qixin Guo\*, Nobuhiro Shingai, Yoshiaki Mitsuishi, Mitsuhiro Nishio, Hiroshi Ogawa, *Thin Solid Films* 343-34 (1999) 53-1-527
- [34] Hiroyuki Shinoda, Nobuki Mutsukura, *Thin Solid Films* 503 (2006) 8 – 12
- [35] Motlan1, E.M. Goldys, T.L. Tansley, *Thin Solid Films* 422 (2002) 28–32
- [36] Xing-Min Cai, Fan Yeb, Yan-Qing Haoa, Dong-Ping Zhanga, Zhe-Huang Zhanga, Ping Fana, *Journal of Alloys and Compounds*, 484 (2009) 677–681
- [37] J.S. Dyck, K. Kima, S. Limpijumnonga, W.R.L. Lambrecht, K. Kasha, J.C. Angus, *State Communications* 114 (2000) 355–360
- [38] F. Agullo'-Rueda, E.E. Mendez, B. Bojarczuk, S. Guha, *Solid State Communications* 115 (2000) 19–21
- [39] G. Korotcenkov , V. Brinzari, M. Ivanov, A. Cerneavschi, J. Rodriguez, A. Cirera. Cornet, J. Morante, *Thin Solid Films* 479 (2005) 38– 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [40] I. hambouleyron, S. Ventura, E. G. Birgin and J. M. Mart'inez, *J. Appl. Phys.* 92, pp. 3093-3102 (2002)
- [41] Lung-Chien Chen, Wen-How Lan, Ray-Ming Lin , Hue-Tang Shen, Hung-Chang Chen, *Applied Surface Science*, 252 (2006) 8438–8441
- [42] Motlan, E.M. Goldys, T.L. Tansley, *Journal of Crystal Growth*, 241 (2002) 165–170
- [43] J. T-Thienprasert J. Nukeaw, A. Sungthong, S. Porntheeraphat, S. Singkarat, D. Onkaw, S. Rujirawat and S. Limpijumnong
- [44] Alexander V. Soldatov,, Alexander Gudaa, Antonina Kravtsova, M. Petravic, P.N.K. Deenapanray, M.D. Fraser, Y.-W. Yang,P.A. Andersone, S.M. Durbine, *Radiation Physics and Chemistry* 75 (2006) 1635–1637
- [45] Kuyyadi P. Biju, Mahaveer K. Jain, *Applied Surface Science*, 254 (2008) 7259–7265
- [46] K. S. A. Butcher,a A. J. Fernandes, P. P.-T. Chen, and M. Wintrebert-Fouquet, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 101, 123702 (2007)
- [47] M. Niehus, R. Schwarz, S. Koynov, M. Heuken, D. Meister, B.K. Meyer, *Diamond and Related Materials* 10 (2001) 1331-1334
- [48] S.H. Huang, H. Zhou, Z.M. Jiang, F. Lu, *Microelectronic Engineering*, 66 (2003) 136–141
- [49] Bing Hu, Xia Zhou, Yan Tang, Huadong Gan, Hui Zhu, Guirong Li, Houzhi Zheng, *Physica E* 33 (2006) 355–358
- [50] K.S.A. Butcher, T.L. Tansley, *Superlattices and Microstructures* 38 (2005) 1–37
- [51] C.P. Foley and J. Lyngdal, *J. Vac. Sci. Technol. A* 5 (1987), p. 1708
- [52] M. Wintrebert-Fouquet, K.S.A. Butcher, P.P.T. Chen, *J. Cryst. Growth* 269 (2004) 134
- [53] D.B. Haddad, H. Dai, R. Naik, C. Morgan, V.M. Naik, J.S. Thakur, G.W. Auner, L.E. Wenger, H. Lu, W.J. Schaff, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 798 (2004) Y12.7.1
- [54] P. Specht, R. Armitage, J. Ho, E. Gunawan, Q. Yang, X. Xu, C. Kisielowski, E.R.Weber, *J. Cryst. Growth* 269 (2004) 111
- [55] D. M. Ceperley and B. J. Alder, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 566 (1980)
- [56] J. P. Perdew and A. Zunger, *Phys. Rev. B* **23**, 5048 (1981)
- [57] A. Kley, J. Neugebauer, M. Bockstedte, and M. Scheffler, *Comput. Phys. Commun.* **107**, 187 (1997)
- [58] J. K. Dewhurst and J. E. Lowther, *Phys. Rev. B* **64**, 014104 (2001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์

### วารสารระดับนานาชาติ:

1. J. T-Thienprasert, J. Nukeaw, A. Sungthong, S. Porntheeraphat, S. Singkarat, D. Onkaw, S. Rujirawat, and S.Limpijumnong, "Local Structure of Indium Oxynitride from X-ray Absorption Spectroscopy", *Apply Physics Letters* 93, 051903 (2008)
2. A. Sungthong, S. Porntheeraphat, A. Poyai, and J. Nukeaw, "An Extreme Change in Structural and Optical Properties of Indium Oxynitride Deposited by Reactive Gas-Timing RF Magnetron Sputtering", *Applied Surface Science* 254 (2008) 7950–7954
3. A.Sungthong, P. Khomdet, S. Porntheeraphat, C. Hruanun, A.Poyai and J. Nukeaw, "Chemical Characterization and Electrical Properties of Indium Oxynitride Grown by Reactive Gas-Timing RF Magnetron Sputtering", *Advanced Materials Research Vols. 93-94* (2010) pp 443-446
4. K.Amnuyswat, P.Thanomngam, S.Sopitpan, A.Sungthong, S.Porntheerapat and J.Nukeaw, "Investigation of Oxygen Contamination in Indium Nitride Thin Film by X-ray Absorption Fine Structure", *Advanced Materials Research Vols. 93-94* (2010) pp 493-496

### งานประชุมวิชาการ:

1. A. Sungthong, S. Porntheeraphat, and J. Nukeaw, "An Extreme Change in Structural and Optical Properties of Indium Oxynitride Deposited by Reactive Gas-Timing RF Magnetron Sputtering", 9th international Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures November 11-15, 2007, Komaba Research Campus of The University of Tokyo, Tokyo, Japan.
2. A. Sungthong, S. Porntheeraphat, A. Poyai, and J. Nukeaw, "EFFECT OF OXYGEN/NITROGEN REACTIVE GAS-TIMING RATIO ON COMPOSITION OF INDIUM OXYNITRIDE (InON) GROWN BY RF MAGNETRON SPUTTERING", 2<sup>nd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUNCTIONAL MATERIALS AND DEVICES, 2008, University Teknologi MARA, Kuala Lumpur, Malaysia.

**สิทธิบัตร****สิทธิบัตรอเมริกา:**

1. Jiti Nukeaw, Supanit Porntheeraphat, Apichart Sungthong, “Gas-timing Method for Depositing Oxynitride Films by Reactive RF Magnetron Sputtering”, Pub. No.:US 2009/0015907 A1
2. Jiti Nukeaw, Supanit Porntheeraphat, Apichart Sungthong, “Nanocrystal Indium Oxynitride Thin Films Optical Filter”, Pub. No.: US 2009/0026065 A1

**สิทธิบัตรไทย:**

1. รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว, น.ส.ศุภนิจ (นิสาพร) พรธีระภัทร, นายอภิชาติ สังข์ทอง, “อุปกรณ์กรองแสงฟิล์มบางนาโนคริสตัลอินเดียมออกไซด์ในไดรด์ (Nanocrystal Indium Oxynitride Thin Film Optical Filter)”, เลขที่ 0701004000
2. รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว, น.ส.ศุภนิจ (นิสาพร) พรธีระภัทร, นายอภิชาติ สังข์ทอง, “วิธีการปลูกฟิล์มออกไซด์ในไดรด์โดยควบคุมเวลาภายในระบบรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Gas-timing Method for Depositing Oxynitride Films by Reactive RF Magnetron Sputtering)”, เลขที่ 0701004105

## ประวัติผู้เขียน

นายอภิชาติ สังข์ทอง เกิดเมื่อวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2516 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2540 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2545 ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งอาจารย์ระดับ 6 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จังหวัดฉะเชิงเทรา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้