



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์
ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟอาร์เอฟแมกเนตรอนสปัตเตอร์ริง
บนฐานรองรับพลาสติก PET

Growth and Characterization of Piezoelectric Aluminum Nitride
Thin Films by Reactive RF Magnetron Sputtering
on PET-Plastic Substrate

นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญญ์

นาย วราวุฒิ เถาถัดดา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ 2558

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ	การปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอททีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงบนฐานรองรับพลาสติก PET		
แหล่งเงิน	เงินรายได้		
ประจำปีงบประมาณ	2558	จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน	50,000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย	1 ปี	ตั้งแต่	ต.ค. 2557 ถึง ก.ย. 2558
หัวหน้าโครงการ	นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.		
ผู้ร่วมโครงการวิจัย	นาย วรารุณี เกลาัดตา สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการดำเนินงานวิจัยเพื่อทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ลงบนฐานรองรับ PET ที่เตรียมด้วยวิธีแอททีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งระบบการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีดังกล่าวติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. โดยได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ คือ 20% 40% 60% 80% และ 100% ฟิล์มบางที่ได้จะถูกวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติเชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด และ ศึกษาสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคการวัดการส่องผ่านของแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ตถึงย่านตามองเห็นย่าน โดยพบว่า ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ทไซด์ซึ่งจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ (103) มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในย่านตามองเห็นประมาณ 70% ยกเว้นฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราส่วนของไนโตรเจน 100% มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเพียง 50% เท่านั้น และ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนมากกว่า 40% จะทำให้อัตราการปลูกฟิล์มมีค่าลดลง และ ฟิล์มบางที่ปลูกด้วยอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจน 40 % มีความสมบูรณ์ของผลึกสูงสุด เม็ดผลึกมีขนาด 26.67 nm แต่หลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงแหล่งกำเนิดคลื่นอาร์เอฟพบว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ทำการเคลือบด้วยอัตราส่วนของไนโตรเจน 40% มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงถึง 80% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของฐานรองรับ PET

คำสำคัญ: ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ รีแอททีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง สมบัติเชิงแสงและเชิงโครงสร้าง
ผลของแก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title Growth and Characterization of Piezoelectric Aluminum Nitride Thin Films by Reactive RF Magnetron Sputtering on PET-Plastic Substrate

Researcher Miss S.Tipawan Khlayboonme
Department of Physics, Faculty of Science, KMITL

Co- Researcher Mr. Warawoot Thowladda
Department of Physics, Faculty of Science, KMITL

ABSTRACT

In this research title, aluminum nitride thin films coated on PET-plastic substrates were deposited and characterized. These films were prepared by the laboratory-made reactive radio frequency (RF) magnetron sputtering system. The sputtering system is housed at Surface Physics and Research Laboratory, department of Physics, faculty of Science KMITL. The effects of nitrogen concentration on properties of the deposited thin films were investigated. The percentage of N₂ concentrations of 20%, 40%, 60%, 80% and 100% were used for deposition and balanced with Ar to a total flow rate of 25 sccm. The crystal structures of the films were characterized by X-ray diffraction (XRD). The surface morphology was investigated using scanning electron microscope (SEM). The optical properties and thickness of the films were evaluated from UV-VIS transmission spectra data. The XRD pattern showed (002) and (103) planes of refraction, which indexed on the basis of the hexagonal wurtzite-type structure. All films obtained were around 70% of transmission in visible region except that one deposited with 100% N₂ concentration was less than 50%. The increasing nitrogen concentration caused the growth rate to decrease. The film deposited with a nitrogen concentration of 40% revealed an optimum choice for the highest crystallinity in formation of the films and the crystallite size was 26.67 nm. However, after the RF generator was repaired and improved its efficiency for generating RF power, the AlN thin films deposited at 40% N₂ concentration was obtained with highly transmission in visible region greater than 80%. This transmission percentage of the films was nearly as high as that of the PET substrate.

Keywords: Aluminum nitride thin films, Reactive RF-magnetron sputtering, Optical and structural properties, effect of nitrogen gas.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
ราราวุฒิ เถาลัดดา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ III อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญรูป (ต่อ)	VII
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
16.1 เชิงพาณิชย์.....	4
16.2 อื่น ๆ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อลูมิเนียมไนไตรด์.....	5
2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยการสปัตเตอร์	7
2.2.1 DC Sputtering.....	8
2.2.2 RF Sputtering.....	9
2.2.3 Magnetron Sputtering.....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	12
3.1 การปรับปรุงและพัฒนา RF magnetron sputtering system	12
3.2 การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้แก้ไขหรือดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2	การสังเคราะห์ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์.....	13
3.3	การวัดสมบัติของฟิล์มบาง (Thin Film Characterization).....	14
3.2.1	Scanning Electron Microscopy (FE-SEM).....	14
3.2.2	X-ray Diffraction (XRD).....	14
3.2.3	UV-Vis Transmission Spectroscopy.....	15
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานวิจัย.....	16
4.1	ระบบการสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วย RF Magnetron Sputtering.....	16
4.2	การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่างๆ.....	21
4.2.1	ลักษณะทางกายภาพและ Surface morphology ของฟิล์มบาง.....	21
4.2.2	ความเป็นโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์.....	22
4.2.3	สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์.....	24
4.3	ผลทดสอบระบบควบคุมการทำงานของ RF magnetron sputtering ผ่านทางจอสัมผัส.....	27
บทที่ 5	สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	29
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	29
5.2	-ข้อเสนอแนะ.....	29
บทที่ 6	สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	30
6.1	รายละเอียดผลผลิตงานวิจัย - ชิ้นงาน.....	30
	เอกสารอ้างอิง.....	31
	ภาคผนวก ก.....	34
	ภาคผนวก ข.....	36
	ภาคผนวก ค.....	38
	ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย.....	40
	หัวหน้าโครงการวิจัย.....	41
	ผู้ร่วมวิจัย.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

ภาพที่ 2.1	โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ธไซด์ของอลูมิเนียมไนไตรด์ space group P6 ₃ mc [40].....	6
ภาพที่ 2.2	DC Sputtering	8
ภาพที่ 2.3	RF Sputtering.....	9
ภาพที่ 2.4	Impedance matching network.....	9
ภาพที่ 2.5	Magnetron Sputtering.....	10
ภาพที่ 2.6	ระบบการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีอีพอกทีฟอาร์เอฟ แมกนีตรอนสเป็คเตอริง.....	11
ภาพที่ 3.1	RF magnetron sputtering ที่ภาควิชาฟิสิกส์ สจล.....	12
ภาพที่ 3.2	เอกสารเคลือบอลูมิเนียม Kurt J. Lesker ความบริสุทธิ์ 99.99% และ แผ่นฐานรองรับพลาสติก PET.....	14
ภาพที่ 3.3	PHILIPS X'Pert-MPD XRD Diffractometer.....	15
ภาพที่ 3.4	UV-Vis Transmission Spectroscopy Setup.....	15
ภาพที่ 4.1	Magnetron Sputtering System ก่อนที่มีการปรับปรุง.....	17
ภาพที่ 4.2	Magnetron Sputtering System หลังที่มีการปรับปรุง.....	17
ภาพที่ 4.3	User Interface Window For บน Visual C++.....	18
ภาพที่ 4.4	(a) เลือก COMPOT (b) BuadRate และ (c) หน้าต่างแสดงเมื่อเชื่อมต่อกับ Microcontroller.....	18
ภาพที่ 4.5	Gas Flow Panel.....	19
ภาพที่ 4.6	Pump and Cooler Panel.....	19
ภาพที่ 4.7	(a) ถ้าสถานะเมื่อ RF พร้อมใช้งาน เพื่อการตั้งค่า Setpoint (b) ตั้งค่า RF power ไปที่ 175 W.....	20
ภาพที่ 4.8	สถานะเมื่อ Overheat.....	20
ภาพที่ 4.9	ฐานรองรับ PET plastic และ ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ถูกเคลือบลงบน PET ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% 100%	21
ภาพที่ 4.10	Surface morphology ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนของแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับไนโตรเจนค่าต่าง ๆ	22
ภาพที่ 4.11	XRD Pattern ของ AlN thin films ที่อัตราส่วนของ N ₂ ต่าง ๆ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VI อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง Crystallite size กับ อัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน C_N	24
ภาพที่ 4.13	Transmission spectra ของ AlN thin films coated on PET substrate.....	25
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของฟิล์มกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บน PET substrate ที่เปอร์เซ็นต์ของแก๊สไนโตรเจนค่าต่าง ๆ	26
ภาพที่ 4.15	ความแตกต่างของเจดสีของพลาสติกที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอนกับแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับไนโตรเจนโดยสังเกตผ่านทางช่องมองของ Vacuum chamber (a) Ar plasma (b) Ar+N ₂ plasma	27
ภาพที่ 4.16	ลักษณะของฟิล์มบาง AlN เทียบกับ PET substrate.....	28
ภาพที่ 4.17	UV-Vis Transmission spectrum ของ AlN thin film ที่เคลือบด้วยระบบที่มีการปรับปรุงและซ่อมบำรุง RF generator.....	28

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขการเคลือบ AlN thin films เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่าง N_2 กับ Ar gas ที่ค่าต่าง ๆ	21
ตารางที่ 4.2	ขนาดเม็ดผลึก ระยะห่างของโครงผลึก (d-spacing) และ FWHM ของระนาบ (002) ที่ได้จาก XRD pattern ที่อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ	24
ตารางที่ 4.3	ค่า T_M T_m s n_1 d_1 m_0 d_2 และ n_2 ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ซึ่งปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 60%	25
ตารางที่ 4.4	ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการประเมินค่าจาก UV-Vis transmission spectra ที่ค่า C_N ต่าง ๆ	26



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองรับพลาสติกหรือฐานรองโพลิเมอร์ที่สามารถโค้งงอได้กำลังได้รับความนิยมจากกลุ่มนักวิจัย [1, 2] เช่น จอภาพที่สามารถโค้งงอได้ [3, 4] โซลาร์เซลล์ที่สร้างจากฟิล์มบาง [5, 6] ทรานซิสเตอร์ฟิล์มบาง [7] นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสำหรับเทคโนโลยีที่เป็นการรวมกันเข้าของ sensor, electrical components, actuator เป็นต้น เข้ากันไว้บน chips ขนาดเล็ก หรือที่เรียกว่า Micro-electromechanical systems (MEMS) ซึ่งชิ้นส่วนดังกล่าวจะถูกจัดวางลงบนฐานรองรับที่เป็นซิลิกอนหรือแก้ว แต่ถ้า MEMS ถูกจัดวางหรือสร้างขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นพลาสติกและสามารถโค้งงอได้จะพบว่ามีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง น้ำหนักของระบบน้อยลง รวมทั้งสามารถทนต่อแรงกดได้มากขึ้น เนื่องจากมีความยืดหยุ่นที่มากกว่า [8] ซึ่ง MEMS devices ได้มีการสร้างลงบนฐานรองพลาสติก ได้แก่ micromachined infrared bolometers [9] Piezoelectric actuators [10] และ microfluidics [11] เป็นต้น

ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN thin films) ถือได้ว่าเป็นฟิล์มบางชนิดหนึ่งที่มีความสนใจและ ทำการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลายในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน อาทิเช่น มีสมบัติด้านอะคูสติก (Acoustics properties) ดีเยี่ยม จึงทำให้มีแนวโน้มสูงมากในการนำอลูมิเนียมไนไตรด์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electroacoustics devices) [12, 13] เช่น ตัวกรองสัญญาณแบบเซอร์เฟซอะคูสติกเวฟ (Surface Acoustic Wave, SAW) [14, 15] และ แบบบัลค์อะคูสติกเวฟ (Bulk Acoustics Wave, BAW) [16, 17] และดีเลย์ไลน์ (Delay line) ถึงแม้จะพบว่า การปลูกหรือสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วย Epitaxy process ฟิล์มอพิทาซีของอลูมิเนียมไนไตรด์จะมีความเร็วเสียงบนพื้นผิว (SAW velocities) สูง (ประมาณ 2 เท่าเมื่อเทียบกับควอตซ์หรือ LiNbO_3) มีสัมประสิทธิ์การหน่วงเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature delay coefficient) เข้าใกล้ศูนย์และมีสัมประสิทธิ์คัปเปิลไฟฟ้า-กล (Electromechanical coupling coefficients) มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.8 % [18] แต่เนื่องจากตามกรรมวิธีในการเตรียมฟิล์มอพิทาซีของอลูมิเนียมไนไตรด์ อาทิเช่น เมทัลออร์แกนิกเวฟเฟสอพิทาซี (Metalorganic Vapor Phase Epitaxy, MVPE) [19] และ โมเลกุลาร์บีมอพิทาซี (Molecular Beam Epitaxy, MBE) [20] ล้วนจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิในการเตรียมที่สูงและแผ่นฐานรองที่เป็นผลึกเดี่ยวซึ่งมีราคาแพง จึงไม่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน

เทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ ซึ่งทำให้สามารถเตรียมได้บนแผ่นฐานรองหลากหลายชนิดมีอยู่ด้วยกันหลากหลายเทคนิค หนึ่งในเทคนิคเหล่านั้นคือ RF Reactive Magnetron Sputtering โดยฟิล์มที่ได้จะเป็นฟิล์มแบบผลึกโพลีที่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีคุณภาพ และยังมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกเหมือนกันกับในกรณีของฟิล์มอพิทาซีที่ได้กล่าวถึงในข้างต้น ซึ่งพบว่าฟิล์มบางที่ได้เป็นฟิล์มแบบผลึกโพลีที่มีเปอร์เซ็นต์การจัดเรียงในระนาบใดระนาบหนึ่งสูง และระนาบการจัดเรียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้มีหลายแบบได้แก่ ระนาบ (002) ซึ่งมีแกนซี (c-axis) ของผลึกวางตัวตั้งฉากกับพื้นผิวของแผ่นฐานรอง ระนาบ (100) หรือ (110) ซึ่งมีแกนซีของผลึกวางตัวขนานกับพื้นผิวของแผ่นฐานรอง โดยระนาบของฟิล์มบางที่ได้มีขึ้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในขณะทำการเตรียมฟิล์ม สำหรับการควบคุมการจัดเรียงตัวและสมบัติทางสัญญาณ (ความเค้นหรือความเรียบของพื้นผิว) ของฟิล์มบางแบบผลึกโพลีนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเชื่อว่าเป็นปัจจัยที่กำหนดธรรมชาติและพฤติกรรมของคลื่นยืดหยุ่น (Elastic waves) เมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการควบคุมสมบัติของฟิล์มบางให้เป็นไปได้ตามความต้องการสามารถทำได้โดยการควบคุมเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางให้เหมาะสมนั่นเอง

สำหรับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ใช้สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นฟิล์มบางที่ได้จากการปลูกด้วยระบบอาร์เอพรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (RF Reactive Magnetron Sputtering) ซึ่งได้ทำการออกแบบ และ สร้างขึ้นสำเร็จแล้ว โดยห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. โดยรับทุนสนับสนุนจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2553 ของคณะวิทยาศาสตร์ สจล. ซึ่งมี รศ.ดร. วรารุณี เถาถัดดา เป็นผู้ทำวิจัย สำหรับระบบอาร์เอพรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่ได้สร้างขึ้นสำเร็จแล้วนั้น ประกอบด้วยระบบสุญญากาศที่สามารถทำความดันได้ต่ำถึง 10^{-7} mbar ด้วย Edward Diffstak 160/700 diffusion pump ระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ 2 ชนิด คือ สำหรับแก๊สอาร์กอน และ ไนโตรเจน หัวแมกนีตรอน 2 หัว แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 13.56 MHz พร้อมด้วยระบบน้ำหล่อเย็น

การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้น จำเป็นต้องทำการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บนแผ่นฐานที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งพบว่า Polyethylene terephthalate หรือ ตัวย่อ คือ PET ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมมาใช้ทำขวดน้ำพลาสติกที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไปเหมาะสมที่จะมาเคลือบฟิล์มบางชนิดนี้ อีกทั้งการปลูกฟิล์มด้วย RF magnetron sputtering technique ยังสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ

โครงการวิจัยนี้จึงเป็นการนำเสนอการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ด้วยระบบอาร์เอพรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่ได้ทำการสร้างสำเร็จแล้ว โดยห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ (Surface Physics and Laser Research Laboratory) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. โดยเน้นการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อโครงสร้างในระนาบ (002) ซึ่งเป็นระนาบที่มีผลต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ได้แก่ กำลังงานของคลื่นความถี่วิทยุ อัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน เวลาในการปลูก และ ความหนาแน่นของ gas phase species แต่ละชนิดที่มีอยู่ภายในพลาสมา เป็นต้น โครงสร้างและลักษณะของฟิล์มบางนั้นจะถูกวัดด้วยเทคนิค UV-Vis Transmission Spectroscopy, FTIR spectroscopy, Raman Spectroscopy, FE-SEM, AFM และ XRD โดยความหนาแน่นของ gas phase species ในพลาสมาจะถูกวัดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy) ซึ่งทางคณะผู้วิจัยคาดว่า ความหนาแน่นของ gas phase species แต่ละชนิดในพลาสมา น่าจะส่งผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างของฟิล์มและกลไกของการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมของอลูมิเนียมกับอะตอมของไนโตรเจน ซึ่งจะทำให้สามารถระบุได้ว่า อะตอมของอลูมิเนียมกับอะตอมของไนโตรเจนเกิดพันธะทางเคมีกัน ก่อน หรือ หลังจาก ที่ตกลงบนฐานรองรับแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อทำการปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีแยกทีฟอาร์ทอพแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ปลูกและเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีแยกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีการจัดเรียงโครงผลึกในระนาบ (002)
- 1.3.2 ประเมินคุณภาพของฟิล์มบางด้วยเทคนิค UV-Vis Transmission Spectroscopy, FTIR spectroscopy, Raman Spectroscopy, FE-SEM, AFM และ XRD
- 1.3.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ gas phase species ที่เกิดขึ้นในพลาสมา กับสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ โดยความหนาแน่นของ gas phase species ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงในการวัด

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1.4.1 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางและศึกษาพลาสมาดีสชาร์จ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่จะทำการปลูกฟิล์มบางพร้อมกับการศึกษาพลาสมาดีสชาร์จซึ่งจะทำความคุ้นเคยไปพร้อมกัน รวมทั้งศึกษาและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการเกิดฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีโครงผลึกระนาบ (002) โดยพารามิเตอร์ดังกล่าว ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างแก๊สอาร์กอนกับไนโตรเจน อัตราการไหลรวมของแก๊ส ความดันภายในระดับ และ กำลังงานของแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ
- 1.4.2 ขั้นตอนการวัดและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง ขั้นตอนนี้ฟิล์มบางที่ปลูกได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis Transmission Spectroscopy, FTIR spectroscopy, Raman Spectroscopy, FE-SEM, AFM และ XRD
- 1.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของฟิล์มบางกับความหนาแน่นของ gas phase species ในพลาสมาที่ได้จากการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												หมายเหตุ	
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.		
1. สังเคราะห์ฟิล์มบาง อลูมิเนียมไนไตรด์ และศึกษาพลาสมา ดิสชาร์จ														
2. วัดและวิเคราะห์ สมบัติของฟิล์มบาง														
3. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างสมบัติของ ฟิล์มกับสมบัติของ พลาสมา														
4. สรุปผลและเขียน รายงาน														

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

16.1 เชิงพาณิชย์

การศึกษาวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การพัฒนาและผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยต้นทุนต่ำ รวมทั้งนำไปสู่การวิจัยในลักษณะบูรณาการที่มีความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์เชิงลึกควบคู่ไปกับการประยุกต์ใช้งาน

16.2 อื่น ๆ

งานวิจัยนี้ยังเป็นการส่งเสริมกระบวนการแก้ไขปัญหาและเป็นการพัฒนาศักยภาพของผู้ทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

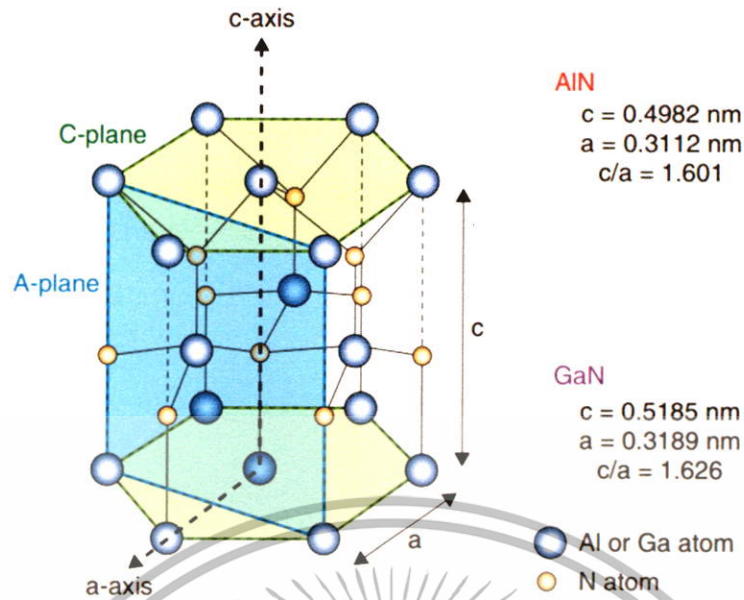
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อลูมิเนียมไนไตรด์

อลูมิเนียมไนไตรด์เป็นสารประกอบเกิดจากธาตุหมู่ที่ III และ V มีช่องว่างแถบพลังงาน 6.2 eV [21-23] มีค่าสภาพนำความร้อนสูงถึง $180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [24,25] มีค่าคงที่เชิงเพียโซอิเล็กทริกสูง (high piezoelectric constants) [26] มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปพลังงานระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานทางกลหรือกลับกันค่อนข้างสูง หรือเรียกว่า electromechanical coupling coefficient มีความแข็งแรงสูง โปร่งแสงในย่านตามองเห็นและย่านยูวี สภาพต้านทานทางไฟฟ้าสูงในช่วง $10^9 - 10^{11} \Omega \text{ cm}$ [27] จึงเป็นวัสดุหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจจากกลุ่มนักวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นวัสดุรวมสมบัติที่ดีและน่าสนใจไว้หลายอย่างด้วยกัน อลูมิเนียมไนไตรด์ที่อยู่ในรูปแบบของฟิล์มบางนั้นจะมีโครงสร้างทางผลึกเป็นแบบ hexagonal wurtzite และถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านต่าง ๆ หลายด้านด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การเคลือบลงบนชิ้นงานของอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ การเคลือบเพื่อป้องกันการสึกกร่อน หรือแม้กระทั่งงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน ปฏิบัติทางเคมี และอุณหภูมิที่สูง [28-31] การนำไปใช้เป็นวัสดุระบายความร้อน (heat sinks) และแผ่นฐานรองสำหรับ Semiconductor chip อลูมิเนียมไนไตรด์เป็นวัสดุที่ไม่ตอบสนองต่อการแผ่รังสีของแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetism) อิเล็กตรอน และการระดมยิงด้วยไอออน (ion bombardment) หรือคลื่นช็อค (shock wave) สมบัติเหล่านี้เป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์คลื่นเสียงพื้นผิว (surface acoustic wave device) ที่มีการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง และภายใต้เงื่อนไขที่เกินขีดจำกัด อาทิเช่น ในกรณีเช่นเซอร์ที่ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความดันสูง และกรณีในอุปกรณ์อะคูสโตออปติก (acousto-optic devices) [32-37] แต่อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องใช้อลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีคุณภาพสูง ซึ่งมีการสังเคราะห์ค่อนข้างยาก จึงมีการศึกษาและพัฒนากรรมวิธีในการสังเคราะห์เพื่อให้ได้อลูมิเนียมไนไตรด์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

อลูมิเนียมไนไตรด์เป็นวัสดุใน group III-nitride มีโครงสร้างทางผลึก 3 โครงสร้างด้วยกัน คือ wurtzite, zinc blend และ rock salt โดยทั่วไปจะพบว่า อลูมิเนียมไนไตรด์มีโครงสร้างแบบ wurtzite แต่เมื่อความดันสูงขึ้น อลูมิเนียมไนไตรด์จะมีโครงสร้างแบบ rock salt ในขณะที่มีรายงานอยู่เพียง 2-3 ฉบับ รายงานว่าสามารถสังเคราะห์อลูมิเนียมไนไตรด์ให้มีโครงสร้างแบบ zinc blend [38, 39] เมื่ออลูมิเนียมไนไตรด์มีโครงสร้างผลึกเป็น wurtzite และมีการจัดเรียงโครงผลึกแบบ hexagonal closed-packed (hcp) อะตอมแต่ละตัวจะมีพันธะทางเคมีแบบ tetragonal symmetry ดังภาพที่ 2.1 โดยมีค่าคงที่ผลึก c และ a (c and a lattice parameter) มีนิยามว่า c คือ ระยะห่างระหว่างโครงผลึกที่อยู่บนระนาบที่อยู่ติดกัน และ a เป็นระยะระหว่างอะตอมที่อยู่บนระนาบเดียวกัน สำหรับสมบัติต่างๆ ที่สำคัญของอลูมิเนียมไนไตรด์ แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแบบเอกซะโกนอลเวอริไซด์ของอลูมิเนียมไนไตรด์ space group $P6_3mc$ [40]

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอลูมิเนียมไนไตรด์ [41]

Property	Value
แถบพลังงานต้องห้าม (band gap)	6.2 eV
ความหนาแน่น (density)	3.3 g/cm^3
สภาพนำความร้อนทางทฤษฎี (theoretical thermal conductivity)	320 W/m-k
สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน (thermal expansion coefficient)	$4.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
สนามไฟฟ้าวิกฤต (critical field strength, E_c)	6-15 MeV/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant ϵ_r)	8.5
ดัชนีหักเห (refractive index, n)	2.15
การนำไฟฟ้า (thermal conductivity)	2.0 W/cm K
จุดหลอมเหลว (melting point)	>2000 $^\circ\text{C}$
ค่าคงที่แลตทิซ a (lattice constant, a)	3.112 Å
ค่าคงที่แลตทิซ c (lattice constant, c)	4.982 Å

ในปี 1880 Curie brothers Pierre และ Jacques [42-44] ได้ค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกซึ่งพบได้ในผลึกบางจำพวก เช่น โทมาลีน (Tourmaline) ควอตซ์ (Quartz) ผลึกน้ำตาลทราย (Cane sugar) และ เกลือโรชเชลล์ (Rochelle salts) โดยเมื่อมีแรงกดกระทำต่อผลึกดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดประจุขึ้น ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะแปรผันตรงกับแรงกดที่กระทำ แต่เมื่อไม่มีแรงกระทำประจุดังกล่าวก็จะหายไป เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect)

เอ็กสารนี้เป็นเอ็กสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectricity effect) ในฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ พบได้ในฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal wurtzite [43, 44] ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่มีสมมาตรรอบจุดศูนย์กลาง ส่งผลให้ เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงประจุบวกและประจุลบที่อยู่ในโครงสร้างจะทำให้ประจุสุทธิมีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ในเบื้องต้น จึงต้องทำการเตรียมให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็น Hexagonal wurtzite การตรวจสอบในเบื้องต้นทำได้ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ในกรณีของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ระบุว่าที่แสดงถึงโครงสร้างดังกล่าวคือระนาบ (002) ซึ่งมีการวางตัวแนว c-axis ของผลึกที่วางตัวตั้งฉากกับพื้นผิวของแผ่นฐานรองรับ คุณภาพของผลึกสามารถพิจารณาได้จากความสมบูรณ์ของระนาบที่ปรากฏซึ่งในกรณีผลึกที่มีความสมบูรณ์จะปรากฏเพียงระนาบใดระนาบหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ความสูงของพีคจากการวัดด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ยังเป็นดัชนีชี้วัดความเป็นผลึกของฟิล์มได้อีกด้วย สำหรับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีระนาบ (002) สมบูรณ์จะแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้อย่างเด่นชัด [45] เนื่องจากโครงสร้างของผลึกดังกล่าวไม่มีความสมมาตรรอบจุดศูนย์กลางนั่นเอง ส่วนฟิล์มบางที่มีระนาบอื่นปรากฏอยู่ด้วยก็จะมีสมบัติเพียโซอิเล็กทริกลดต่ำลงซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกและข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์ม

2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยการสปัตเตอร์

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหรือวัสดุรองรับให้มีสมบัติตามต้องการ เช่น ให้ความทนทานถาวรหรือสวยงามขึ้น ตลอดจนถึงการใช้ประโยชน์ด้านอื่น วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งคือการเคลือบภายใต้ความเป็นสุญญากาศ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งจากกระบวนการทางเคมี (chemical vapor deposition, CVD) หรือกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical vapor deposition, PVD) การเคลือบฟิล์มภายใต้ความเป็นสุญญากาศด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการระเหยสาร (evaporation) ทำได้โดยการให้ความร้อนกับสารที่ต้องการเคลือบจนกลายเป็นไอพุ่งเข้าจับชิ้นงานในลักษณะของฟิล์มบาง และ วิธีการสปัตเตอร์ (sputtering) ทำได้โดยการใช้อิออนบวกพลังงานสูงวิ่งเข้าชนสารที่ต้องการเคลือบให้หลุดออกจากพื้นผิวของเป้า (target) เข้าจับชิ้นงานจนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง จากการศึกษาพบว่าการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการสปัตเตอร์ให้ผลการเคลือบที่ดีกว่าการระเหยสาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบด้วยแมกเนตรอนสปัตเตอร์ ซึ่งมีการติดตั้งแม่เหล็กไว้ที่ด้านหลังของคาโทด ซึ่งนอกจากเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลือบแล้วฟิล์มบางที่ได้ยังมีคุณภาพสูงกว่าอีกด้วย [42] แต่อย่างไรก็ตามการเคลือบฟิล์มบางภายใต้ระบบสุญญากาศถือได้ว่าเป็นวิธีการที่มีต้นทุนค่อนข้างสูง เนื่องจากมีต้นทุนจากระบบสุญญากาศ

การสปัตเตอร์ (Sputtering) คือ การที่อะตอมของวัสดุถูกทำให้หลุดออกจากพื้นผิวเมื่อถูกชนด้วยไอออนหรืออนุภาคที่มีพลังงานสูง กระบวนการสปัตเตอร์จึงเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความเป็นสุญญากาศ โดยการป้อนแก๊สเฉื่อยซึ่งโดยทั่วไป คือ แก๊สอาร์กอน ด้วยอัตราที่พอเหมาะ เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบแก่วัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเป้า (target) เมื่อเทียบกับวัสดุฐานรองรับ (substrate) แก๊สอาร์กอนจะแตกตัวเป็นพลาสมา ไอออนบวกในพลาสมาจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าเข้าชนเป้า อะตอมที่พื้นผิวของเป้ารวมทั้งอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะหลุดออก อะตอมของเป้าจะตกลงบนพื้นผิวของฐานรองรับเกิดเป็นฟิล์มบาง ในขณะที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะมีส่วนช่วยให้สภาวะพลาสมาสามารถดำรงอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยถ้ามีการป้อน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สออกเหนือจากแก๊สเฉื่อยแล้ว โดยทั่วไปเป็น แก๊สออกซิเจน หรือ ไนโตรเจน เมื่อป้อนแก๊สดังกล่าวเข้าไป อะตอมของแก๊สนี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอะตอมของสารเป้าที่หลุดออกมา เกิดเป็นฟิล์มของสารประกอบ บนฐานรองรับ ซึ่งวิธีสร้างหรือเตรียมฟิล์มบางในลักษณะนี้เรียกว่า Reactive sputtering ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีอีแอกทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปตเตอริง จึงจำเป็นต้องใช้อลูมิเนียมเป็นเป้า (Aluminum target) และ ป้อนแก๊สอาร์กอนร่วมกับแก๊สไนโตรเจน สำหรับระบบสเปตเตอริงมีอยู่ด้วยหลายแบบ มีโครงสร้างที่ดัดแปลงให้แตกต่างกันในหลายลักษณะขึ้นอยู่กับการใช้งาน ระบบสเปตเตอริงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แบ่งตามโครงสร้างหลัก ๆ ได้ 3 ชนิด คือ

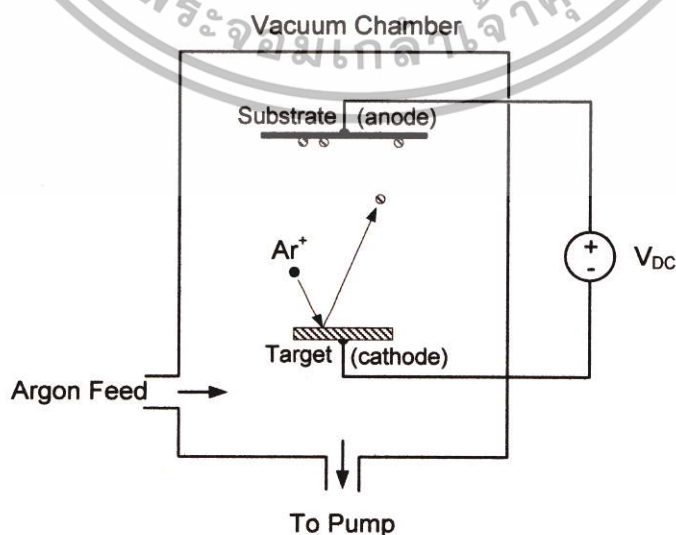
- DC sputtering
- RF sputtering
- Magnetron sputtering

ซึ่งแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 DC Sputtering

ระบบปลูกฟิล์มบางแบบ DC sputtering ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ววางขนานกัน ได้แก่ target (cathode) และ substrate (anode) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงมากกว่า 1 kV จะถูกป้อนระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งวางอยู่ห่างกันประมาณ 2-3 cm ในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) โดยทั่วไปก๊าซอาร์กอนที่ความดัน 0.1 - 1 mbar จะถูกใช้เป็น sputtering gas

พลาสมาจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกจากผิวของ cathode ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงเข้าชนกับอะตอมของก๊าซอาร์กอน ทำให้ก๊าซอาร์กอนแตกตัวเป็นพลาสมาด้วยกระบวนการ impact ionization ความหนาแน่นของกระแสไอออนที่ขั้ว cathode จะมีค่าประมาณ 1 mA/cm^2 ระบบนี้ไม่สามารถใช้กับ target ที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถเดินทางผ่านฉนวนไฟฟ้าได้



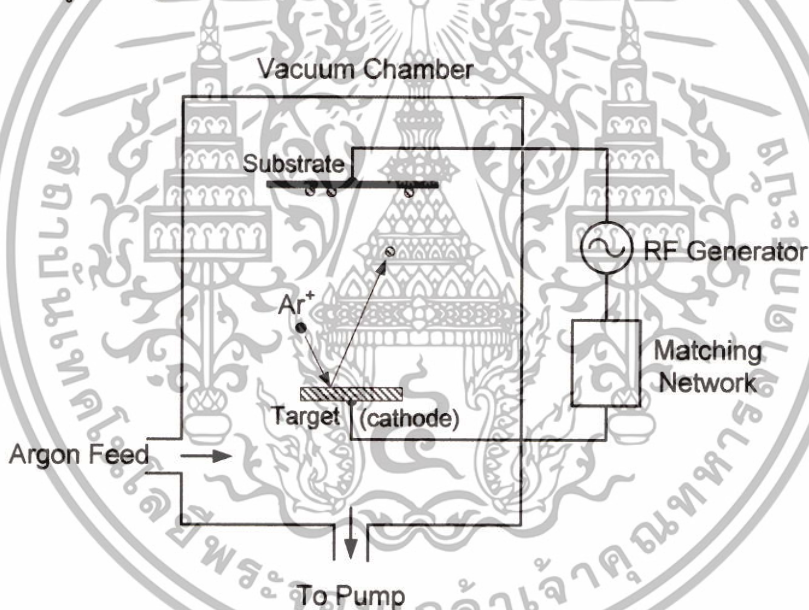
ภาพที่ 2.2 DC Sputtering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

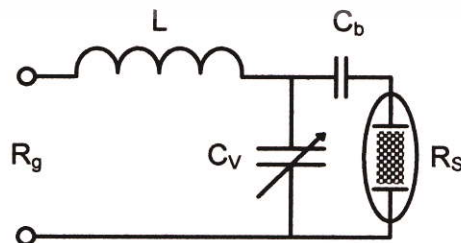
2.2.2 RF Sputtering

ระบบปลูกฟิล์มบางแบบ RF sputtering มีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.3 ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ววางขนานกัน ได้แก่ target (cathode) และ substrate เช่นเดียวกับแบบ DC sputtering แต่ใช้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นความถี่คลื่นวิทยุกำลังสูง (แอมพลิฟายเออร์ในช่วงระหว่าง 0.5 – 1 kV, ความถี่มากกว่า 0.1 MHz) ปกตินิยมใช้ความถี่ 13.56 MHz การใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงทำให้เพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของก๊าซเพื่อแตกตัวเป็นพลาสมาให้สูงขึ้น ดังนั้นระบบปลูกฟิล์มบางแบบ RF sputtering จึงสามารถทำงานได้ที่ความดันต่ำกว่ากรณีของ DC sputtering มาก กล่าวคือสามารถทำงานได้ที่ความดันระดับ 10^{-3} mbar

การส่งคลื่นวิทยุความถี่สูงเข้าสู่ระบบ RF sputtering จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ปรับอิมพีแดนซ์ (impedance-matching network) เนื่องจากโดยทั่วไป rf power supply จะมีค่าอิมพีแดนซ์ 50 Ω ในขณะที่พลาสมาจะมีอิมพีแดนซ์ระหว่าง 1 – 10 k Ω ระบบปรับอิมพีแดนซ์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยวงจร LC ที่มีตัวเหนี่ยวนำค่าคงที่ 1 ตัว ตัวเก็บประจุปรับค่าได้ 1 ตัว และตัวเก็บประจุค่าคงที่ที่เรียกว่า blocking capacitor 1 ตัว ต่ออยู่กับ target ดังแสดงในวงจรดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 RF Sputtering



R_g : impedance of rf-generator, C_v : variable capacitor
 R_s : impedance of rf-discharge, C_b : blocking capacitor

ภาพที่ 2.4 Impedance matching network

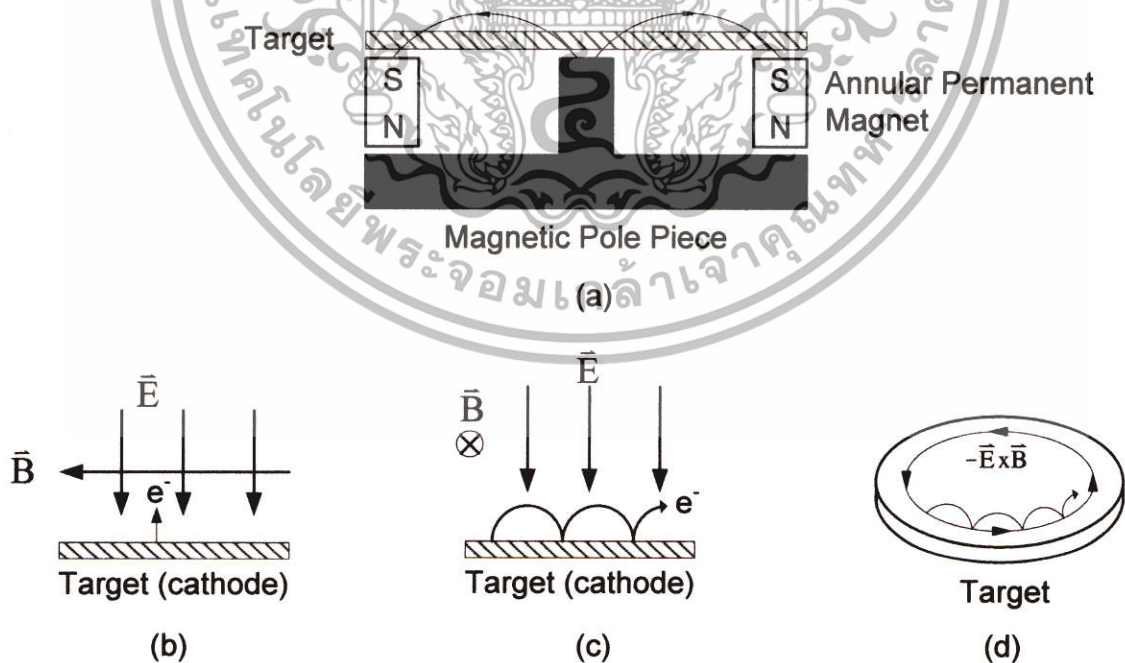
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณความถี่คลื่นวิทยุจะต่อผ่านระบบปรับอิมพีแดนซ์เข้าสู่ target ซึ่งโดยทั่วไปจะมีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ substrate และผนังห้องสุญญากาศที่ต่อเป็นกราวด์ ความไม่เท่ากันของพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเหนี่ยวนำให้เกิดศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นลบ (negative dc bias) ขึ้นที่ target ด้วยขนาดเท่ากับแอมพลิจูดของโวลเตจของ rf power supply ศักย์ไฟฟ้านี้เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงขึ้นที่ target ถึงแม้ target จะเป็นฉนวนไฟฟ้าก็ตาม

2.2.3 Magnetron Sputtering

ระบบปลูกฟิล์มบางแบบ Magnetron sputtering ได้รับการพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี 1970 เป็นระบบที่มีอัตราการปลูกฟิล์มสูง ในสภาวะสุญญากาศความดันต่ำ จึงทำให้สามารถลดปัญหาการปนเปื้อนลงไปได้มาก ระบบ Magnetron sputtering จะมีการใช้สนามแม่เหล็กร่วมกับสนามไฟฟ้าทั้งแบบกระแสตรง (dc) หรือสนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุ (rf) ทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาได้ง่ายขึ้น โครงสร้างของระบบปลูกฟิล์มบางแบบ Magnetron sputtering มีหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้และผลิตในเชิงการค้ามีโครงสร้างดังภาพที่ 2.5

โครงสร้างดังรูปประกอบด้วยสนามไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับ target ร่วมกับสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าและขนานกับพื้นผิวของ target อิเล็กตรอนพหุติยภูมิจะถูกกักกัน (trapping) โดยสนามแม่เหล็กทำให้เคลื่อนที่อยู่เหนือพื้นผิวของ target ขึ้นไปเล็กน้อย ผลของการกักกันอิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำให้เกิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงบริเวณพื้นผิวของ target ดังนั้น การใช้สนามแม่เหล็กร่วมกับระบบปลูกฟิล์มบางแบบ DC sputtering และ RF sputtering จะช่วยให้ระบบทั้งสองมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



ภาพที่ 2.5 Magnetron Sputtering

(a) โครงสร้างของ Magnetron Sputtering แบบ DC หรือ RF

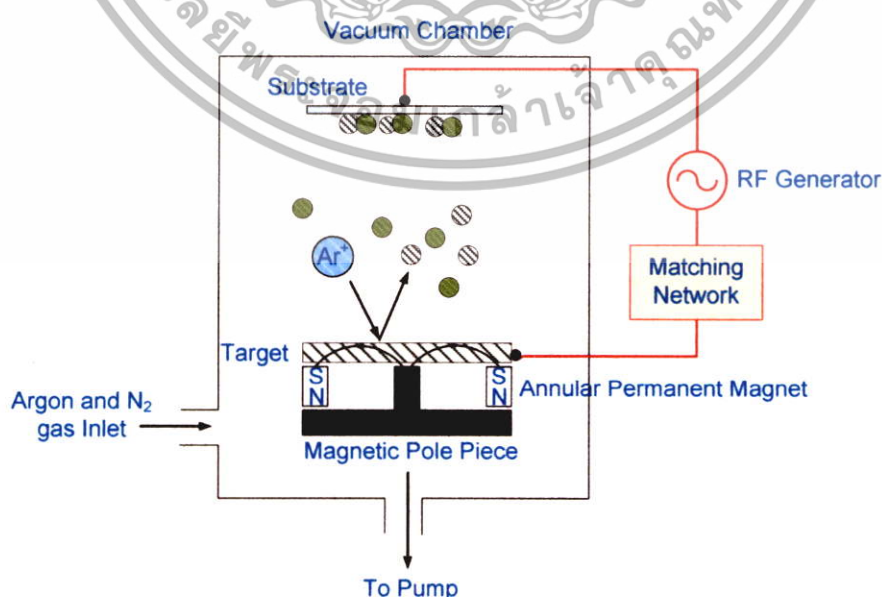
(b)-(d) ทิศของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันจะทำให้ไอเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางร่วมกับการเคลื่อนที่แบบ cycloid (cyclodial motion) ดังแสดงในภาพที่ 2.5(c) และ 2.5(d) ขนาดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีส่วนสำคัญต่อการกักกันไอเล็กตรอนไว้เหนือ target เช่น ในระบบ DC magnetron sputtering ป้อนศักย์ไฟฟ้า 600 V แก่ target ร่วมกับสนามแม่เหล็กขนาด 165 G จะทำให้ไอเล็กตรอนถูกกักกันอยู่เหนือพื้นผิว target ภายในระยะ 0.5 cm เป็นต้น ในทางปฏิบัติจะใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มอยู่ระหว่าง 200 – 500 G ร่วมกับศักย์ไฟฟ้า 300 – 700 V (ต่ำกว่าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กประมาณ 10 เท่า [9] ที่ความดันระหว่าง $5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$ mtorr ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไอออนที่ target ระหว่าง 4 – 60 mA/cm² โดยทั่วไป RF magnetron sputtering จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า DC magnetron sputtering ประมาณครึ่งหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม RF magnetron sputtering มีความจำเป็นในการสเปคโตรวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า โดย ระบบ RF Magnetron sputtering ที่พัฒนาขึ้นที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำหรับระบบ RF magnetron sputtering มีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.6 ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ววางขนานกัน ได้แก่ target (cathode) และ substrate โดย substrate ถูกวางอยู่สนามแม่เหล็กที่ลักษณะดังรูป แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ 13.56 MHz กำลังสูง (แอมป์ลิจูดในช่วงระหว่าง 0.5 – 1 kV) การใช้สนามไฟฟ้าความถี่สูงเสริมด้วยสนามแม่เหล็กทำให้เพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างไอเล็กตรอนทุติยภูมิกับอะตอมของก๊าซเพื่อแตกตัวเป็นพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงขึ้น

การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีแอคติฟอว์เอพแมกนีตรอนสเปคโตรริง ทำได้โดยใช้แก๊ส 2 ชนิดด้วยกัน คือ แก๊สอาร์กอน และ แก๊สไนโตรเจน แก๊สอาร์กอน จะทำหน้าที่ในการสเปคโตรเออะตอมของเป้า ซึ่งในที่นี้เป้าที่ใช้ คือ แผ่นอลูมิเนียม หลุดออก และ เกิดการรวมตัวกับอะตอมของไนโตรเจนที่มีอยู่ในพลาสมา แล้วตกลงสู่ฐานรองรับฟอรม์ตัวกลายเป็นฟิล์มบาง ในสภาวะพลาสมาจะส่งเสริมทำให้อนุภาค หรือ gas phase species ที่อยู่ในพลาสมามีความไวต่อการเกิดพันธะทางเคมีต่อกัน ดังนั้นสมบัติของพลาสมาจึงมีผลโดยตรงต่อสมบัติของฟิล์มบาง



ภาพที่ 2.6 ระบบการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีแอคติฟอว์เอพแมกนีตรอนสเปคโตรริง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในโครงการ “Growth and Characterization of Piezoelectric Aluminum Nitride Thin Films by Reactive RF Magnetron Sputtering on PET-Plastic Substrate” มีจุดประสงค์เพียงเพื่อทำการปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีแอกริฟอราเอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET แต่อย่างไรก็ตาม ในระหว่างการดำเนินงานทางผู้วิจัยได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับ RF generator เกิดความเสียหาย จึงทำให้ไม่สามารถดำเนินการต่อได้ จึงต้องทำการซ่อม เนื่องจาก RF generator ที่ใช้อยู่เป็นนั่นเป็นเครื่องที่มีอายุการใช้งานค่อนข้างนาน นานมากกว่า 10 ปี จึงต้องการซ่อมกันเอง ซึ่งใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน และ หลังจากที่ได้ทำการซ่อม RF generator เป็นที่เรียบร้อย ทางผู้วิจัยเห็นสมควรว่า ควรพัฒนาระบบ RF magnetron sputtering ที่มีอยู่นั้น ให้มีระบบการควบคุมการทำงานผ่านทางจอสัมผัส จึงได้จัดให้เป็นโครงการพิเศษสำหรับ นศ. ฟิสิกส์ประยุกต์ ชั้นปีที่ 4 ประจำปีการศึกษา 2557 ซึ่งผลการพัฒนาระบบเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง ซึ่งในบทนี้จึงเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางและการปรับปรุง RF magnetron sputtering

3.1 การปรับปรุงและพัฒนา RF magnetron sputtering system

การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN thin films) ซึ่งทำการเคลือบด้วย RF magnetron sputtering system ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการสร้าง ออกแบบ และ พัฒนาขึ้นโดย รศ. ดร. วราวุฒิ เถาสัตตา นั้น มีลักษณะดังภาพที่ 3.1 ติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.



ภาพที่ 3.1 RF magnetron sputtering ที่ภาควิชาฟิสิกส์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบประกอบด้วยส่วนสำคัญหลัก ๆ คือ ระบบปั๊มสุญญากาศ อุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ แคมเบอร์สุญญากาศ ระบบควบคุมการไหลของก๊าซ หัวแมกนีตรอน และแหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุ ชุดแหล่งจ่ายกำลังคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้กับ RF magnetron sputtering system นี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ BROULEY: รุ่น BE-1113 ซึ่งกำเนิดคลื่นความถี่ 13.56 MHz กำลังสูงสุด 650 W และ Auto impedance matching รุ่น TRAZAR: AMUSC-1

แต่หลังจากที่ได้ทำการวิจัยจากที่ได้ทำการวิจัยในช่วง 6 เดือนแรก ทางผู้วิจัยได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับ RF generator เกิดความเสียหาย จึงทำให้ไม่สามารถดำเนินการต่อได้ จึงต้องทำการซ่อม เนื่องจาก RF generator ที่ใช้อยู่เป็นนั้นเป็นเครื่องที่มีอายุการใช้งานค่อนข้างนาน นานมากกว่า 10 ปี จึงต้องการซ่อมแซมกันเอง นอกจากนี้ทางผู้ดำเนินงานวิจัยได้มีความเห็นว่าควรพัฒนาระบบให้มีการควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ ผ่านทางหน้าจอสัมผัส (touch screen) โดยอุปกรณ์ที่ประกอบการขึ้นเป็น RF magnetron sputtering นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายส่วน ซึ่งทั้งหมดจะถูกควบคุมการทำงานโดยผ่านทางหน้าจอสัมผัส ได้แก่ RF Generator, Mass flow controllers, Rotary pump, Diffusion-pump heater และ Water cooling system ซึ่งระบบหล่อเย็นนี้จะทั้งระบบหล่อเย็นของ Diffusion pump, RF Generator และ Magnetron Head ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะถูกสั่งให้ทำงานและแสดงผลของการทำงานผ่านทางหน้าจอสัมผัสทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวมีอยู่เอกสารอ้างอิงหมายเลข []

3.2 การเตรียมฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

3.2.1 การเตรียมฐานรองรับฟิล์ม

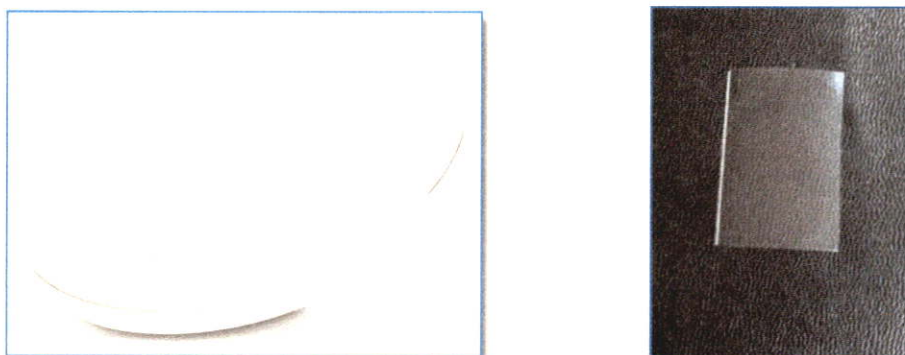
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบ AlN thin films ลงบนฐานรองรับพลาสติก ซึ่งมีลักษณะเป็นดังภาพที่ 3.2 กระบวนการทำความสะอาด PET-plastic substrate เป็นดังนี้

- 1) ทำการล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดคราบไขมัน
- 2) ล้างด้วยน้ำกลั่นในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
- 3) ล้างด้วยเมทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
- 4) ล้างด้วยไอโซโพรพานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
- 5) เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง
- 6) อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ประมาณ 30 นาที

3.2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

ในการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางนั้น ทำการปลูกฟิล์มบนแผ่นฐานรองแก้วสไลด์ แก้วควอตซ์ ซิลิคอน และแผ่นพลาสติกพีอีที ด้วยวิธีแฟกทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ด้วยการใส่เป้าสารเคลือบอลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.9% (เกรดอุตสาหกรรม) และ 99.99% (Kurt J. Lesker) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หนา ¼ นิ้ว แสดงได้ดังภาพที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 เป้าสารเคลือบอลูมิเนียม Kurt J. Lesker ความบริสุทธิ์ 99.99% และ แผ่นฐานรองรับพลาสติก PET

กระบวนการปลูกฟิล์มบางเริ่มจากการติดตั้งแผ่นฐานรองบนแผ่นยึดจับแผ่นฐานรอง ซึ่งอยู่ในห้องสุญญากาศของระบบปลูกฟิล์มบางที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น จากนั้นทำการลดความดันภายในระบบให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 2×10^{-6} มิลลิบาร์ เพื่อที่จะให้พร้อมสำหรับการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ก่อนการปลูกฟิล์มบางทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นเป้าสารเคลือบด้วยพลาสมาของอาร์กอนที่กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นถี่วิทยุ 200 วัตต์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะช่วยกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นเป้าสารเคลือบให้หลุดออกไปเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของออกไซด์ขณะปลูกฟิล์ม โดยกระบวนการทำความสะอาดนี้ จะใช้ระยะเวลาประมาณ 20 นาทีและจะต้องทำการปิดชัตเตอร์เพื่อป้องกันแผ่นฐานรอง จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยการเปิดชัตเตอร์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนกับไนโตรเจนซึ่งมีความบริสุทธิ์ 99.999% กระบวนการเคลือบที่มีแก๊ส 2 ชนิดอยู่ร่วมกันในระบบการสปัตเตอร์ในลักษณะนี้ เรียกกันว่า รีแอกทีฟสปัตเตอร์

3.3 การวัดสมบัติของฟิล์มบาง (Thin Film Characterization)

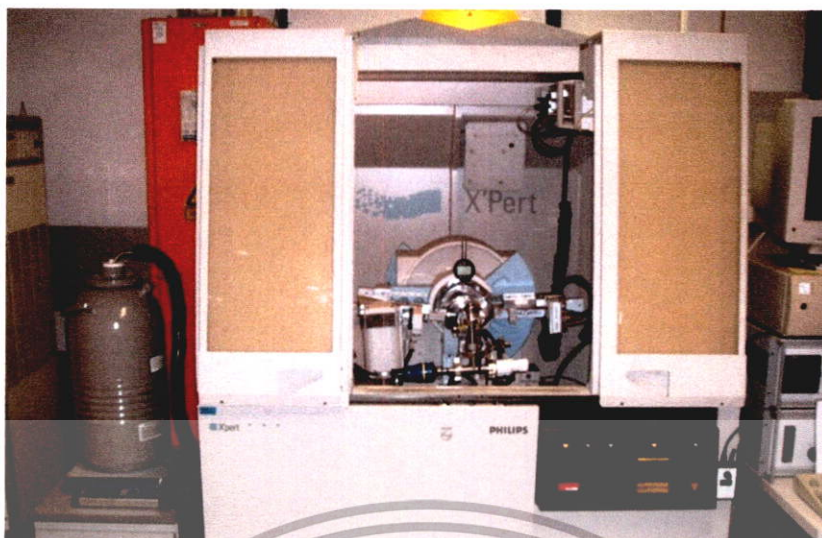
สำหรับในงานวิจัยนี้สมบัติของฟิล์มบางจะถูกตรวจวัดสภาพพื้นผิวด้วย scanning electron microscopy (SEM) ตรวจวิเคราะห์ความเป็นโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) และวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงด้วย UV-Vis Spectroscopy

3.2.1 Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)

สภาพพื้นผิว (Surface morphology) ของฟิล์มบางจะถูกวัดและถ่ายภาพด้วย SEM ติดตั้งอยู่ที่ วิทยาลัยการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.2 X-ray Diffraction (XRD)

การตรวจสอบความเป็นโครงสร้างผลึก และ Phase identify ของฟิล์มทำโดยการวิเคราะห์จาก XRD Pattern ที่ได้จาก X-ray diffractometer ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์ดังกล่าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท PHILIPS Model X'Pert-MPD มีลักษณะเป็นดังภาพที่ 3.3 ผลผลิตที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ แหล่งกำเนิด X-ray ที่ใช้คือ $\text{Cu K}\alpha_1$ มีค่าความยาวคลื่น 1.54056 Å ติดตั้งอยู่ที่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยอุบลราชธานี โดยเปรียบเทียบ XRD patterns ที่วัดได้กับ JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) Card file No. 21-1250 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 PHILIPS X'Pert-MPD XRD Diffractometer

3.2.3 UV-Vis Transmission Spectroscopy

การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วย UV-Vis Transmission Spectroscopy เป็นเทคนิคที่สามารถทำได้ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยได้ทันที ซึ่งเทคนิคนี้สามารถระบุความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มบางได้อย่างคร่าว ๆ ในเบื้องต้น ซึ่งทั้งความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มบางซึ่งมีสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหเชิงแสงนั้นสามารถคำนวณได้จากข้อมูลของเบอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางนั้น ๆ

ระบบที่ใช้สำหรับ UV-Vis Transmission Spectroscopy เป็นระบบที่ได้ทำการ setup ขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ เป็นดังภาพที่ 3.4 จึงทำให้สามารถทำการวัดได้ทันที ระบบดังกล่าวประกอบด้วย OcenOptics DH2000-BAL deuterium tungsten halogen light source และ an OcenOptic USB2000 spectrometer พร้อมด้วย Optical Fiber ข้อมูลที่ได้การวัดจะถูกนำไปประเมินและคำนวณเพื่อทำการหา Optical constant (Complex index) รวมทั้ง Optical energy bandgap และ ความหนาของฟิล์มบาง



ภาพที่ 3.4 UV-Vis Transmission Spectroscopy Setup

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานการวิจัย

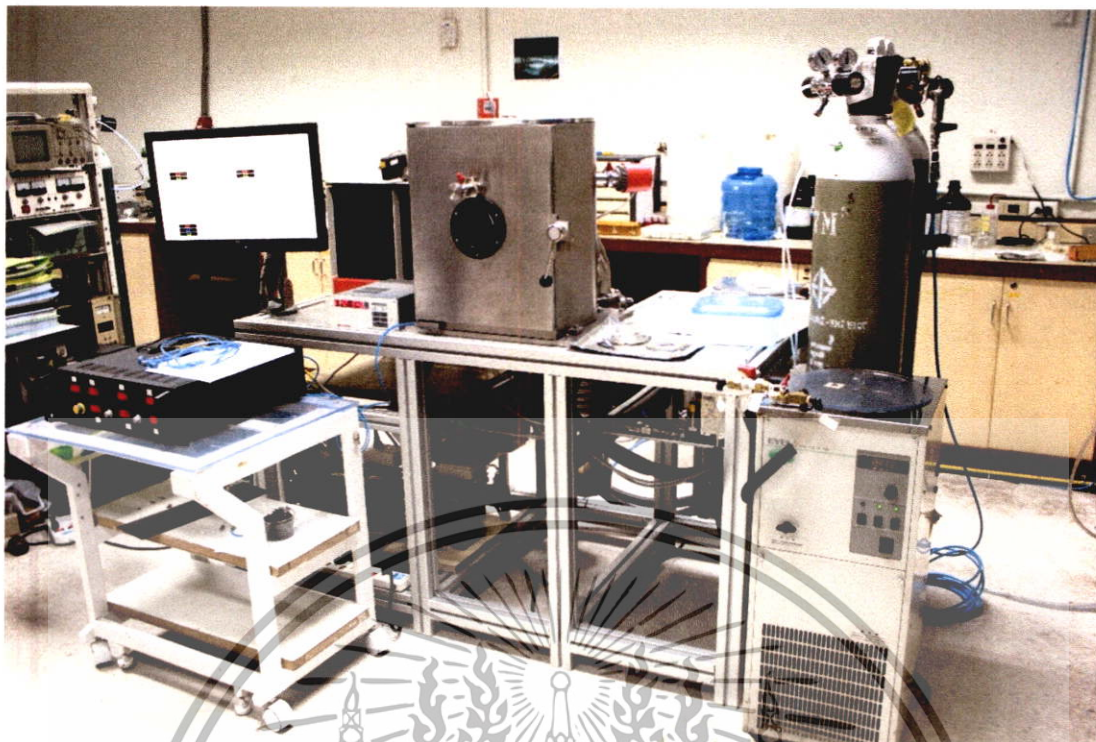
การดำเนินงานวิจัยภายใต้โครงการนี้ พิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ถูกปลูกด้วย RF Magnetron sputtering system ซึ่งได้ออกแบบและสร้างขึ้นโดย รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา ติดตั้งไว้ที่ ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์พื้นผิวและเลเซอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยผู้วิจัยได้มีความสนใจที่จะศึกษาผลของอัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางที่ถูกเคลือบบน PET plastic substrate รวมทั้งการใช้เป่าสารเคลือบเกรดอุตสาหกรรม

4.1 ระบบการสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วย RF Magnetron Sputtering

จากที่ได้ทำการวิจัยในช่วง 6 เดือนแรก ทางผู้วิจัยได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับ RF generator เกิดความเสียหาย จึงทำให้ไม่สามารถดำเนินการต่อได้ จึงต้องทำการซ่อม เนื่องจาก RF generator ที่ใช้อยู่เป็นนั้นเป็นเครื่องที่มีอายุการใช้งานค่อนข้างนาน นานมากกว่า 10 ปี จึงต้องการซ่อมกันเอง ซึ่งใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน และ หลังจากที่ได้ทำการซ่อม RF generator เป็นที่เรียบร้อย ทางผู้วิจัยเห็นสมควรว่า ควรพัฒนาระบบ RF magnetron sputtering ที่มีอยู่นั้น ให้มีระบบการควบคุมการทำงานผ่านทางจอสัมผัส จึงได้จัดให้เป็นโครงการพิเศษสำหรับ นศ. ฟิสิกส์ประยุกต์ ชั้นปีที่ 4 ประจำปีการศึกษา 2557 ซึ่งผลการพัฒนาระบบเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง

ระบบควบคุมการทำงานของ RF magnetron system ผ่านทางหน้าจอสัมผัสนั้น สามารถ ควบคุม RF Power , Gas Flow Rate อีกทั้งยังได้ติดตั้งระบบตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของผู้ใช้งานอีกด้วย เช่น ระบบตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นที่ป้อนให้ Magnetron sputtering และ RF generator โดยถ้าผู้ใช้งานยังไม่ทำการเปิดระบบหล่อเย็นดังกล่าว RF Source จะไม่สามารถทำงานได้ภาพที่ 4.1ระบบเดิมก่อนที่จะมีพัฒนาระบบควบคุมการทำงานผ่านทางจอ กับ ระบบที่ได้ทำการปรับปรุงดังภาพที่ 4.2 ระบบควบคุมการทำงานของ RF magnetron system ผ่านทางหน้าจอสัมผัสนั้น สามารถ ควบคุม RF Power , Gas Flow Rate อีกทั้งยังได้ติดตั้งระบบตรวจสอบความถูกต้องในการทำงานของผู้ใช้งานอีกด้วย เช่น ระบบตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นที่ป้อนให้ Magnetron sputtering และ RF generator โดยถ้าผู้ใช้งานยังไม่ทำการเปิดระบบหล่อเย็นดังกล่าว RF Source จะไม่สามารถทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 Magnetron Sputtering System ก่อนที่มีการปรับปรุง



ภาพที่ 4.2 Magnetron Sputtering System หลังที่มีการปรับปรุง

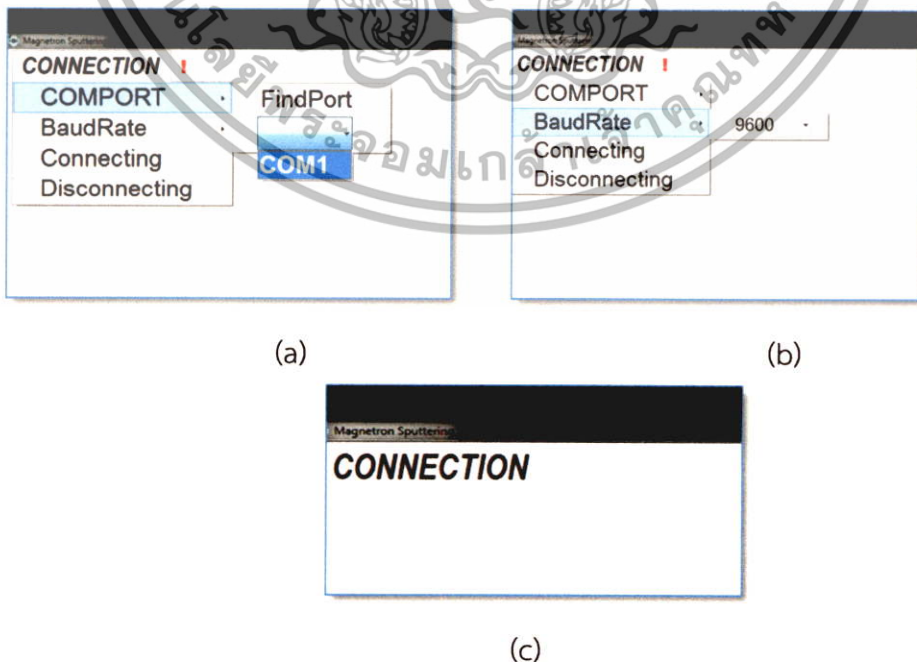
ในส่วนของโปรแกรม Computer ควบคุมการทำงานของระบบ RF Magnetron sputtering นั้น เป็นการสร้างหน้าต่าง Interface กับผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถคลิก เลือกกดปุ่มบนหน้าจอแล้วสั่งการไปยัง Microcontroller และส่วนที่รับข้อมูล มาแสดงผล สถานะต่างๆ ดังแสดงดังภาพที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 User Interface Window For บน Visual C++

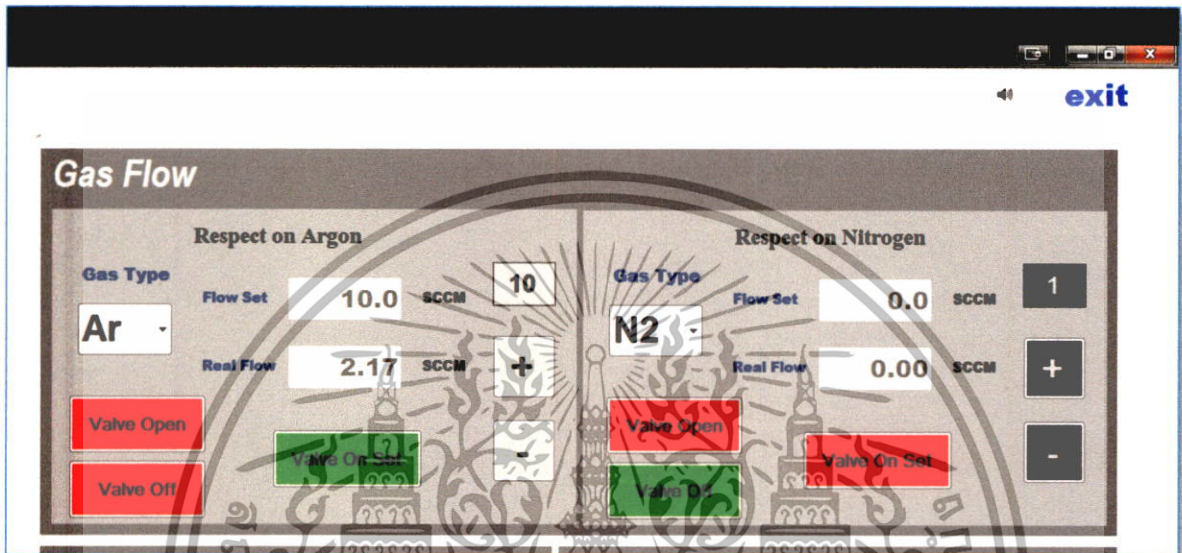
เมื่อเปิดโปรแกรม หน้าต่างเริ่มต้นปรากฏขึ้นมา เครื่องหมายตกใจสีแดงที่ปรากฏ ดังภาพที่ 4.4 (a) บ่งบอกถึง Computer ยังไม่ได้เชื่อมต่อกับ Microcontroller เริ่มต้นการใช้งาน คือการกดที่ปุ่ม connection เลือก COM PORT และ Baud Rate จะถูกตั้งไว้โดยอัตโนมัติ ดังภาพที่ 4.4(b) เมื่อกด Connecting ถ้าการเชื่อมต่อเริ่มขึ้น เครื่องหมายตกใจจะหายไป และจะปรากฏหน้าต่างเป็นดังภาพที่ 4.4 (c) โดยบน User Interface Window นั้นจะมี Panel หลักๆอยู่ทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกัน ซึ่งทั้ง 3 หน้าต่างนี้ จะเกี่ยวข้องกับ Gas flow rate , Vacuum Pump and Cooling และ RF Generator



ภาพที่ 4.4 (a) เลือก COMPORT (b) BaudRate และ (c) หน้าต่างแสดงเมื่อเชื่อมต่อกับ Microcontroller

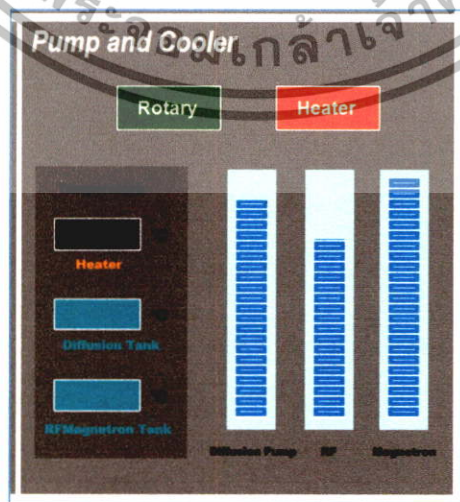
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของ Panel ที่เป็น Gas Flow มีลักษณะเป็นดังภาพที่ 4.5 โดย panel ย่อยทางซ้ายจะใช้สำหรับ Argon ทางขวาจะเป็น Nitrogen ลักษณะการสั่งคือจะให้ผู้ใช้งานเริ่มเลือกสถานะว่าจะให้ Gas off คือปิด open คือไหลเต็มที่ หรือ On Set คือให้ไหลตามค่าในช่อง Flow set ส่วนค่าในช่อง Real Flow คือค่าที่ Gas ไหลจริง ระหว่างที่เลือก Valve On set ถ้ากดปุ่ม + หรือ - ด้านข้าง ค่า Flow set จะเพิ่มขึ้นตาม ปุ่มด้านบนสามารถเลือกได้ว่าจะให้การเพิ่มลดที่ละเท่าไร มี 3 ค่า คือ 0.1, 1 และ 10 เลือกได้โดยการคลิก



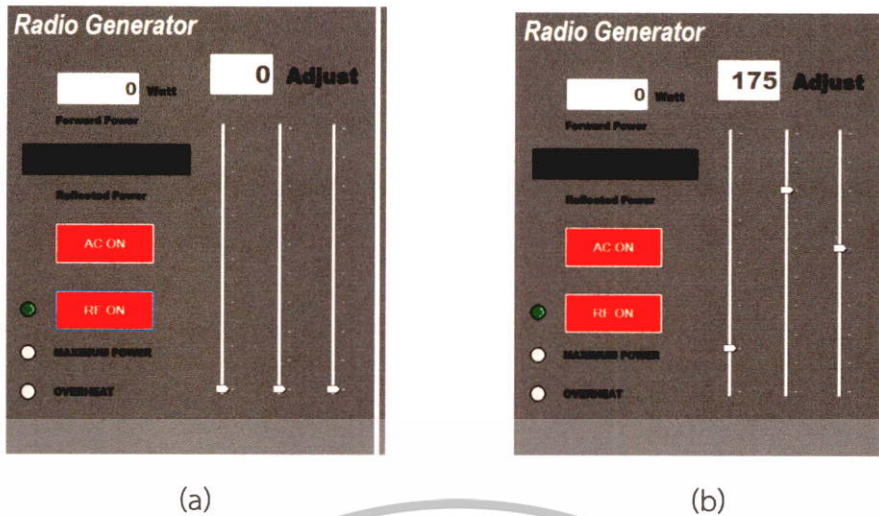
ภาพที่ 4.5 Gas Flow Panel

Panel ในส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนแสดงการทำงานของ Vacuum system และ ระบบหล่อเย็น แสดงดัง ภาพที่ 4.6 มีปุ่มใหญ่ๆอยู่ 2 ปุ่ม คือ ทางซ้ายใช้สำหรับเปิด-ปิด Rotary Pump ถ้าขึ้นสีเขียวแสดงว่าให้เปิด สีดำแสดงว่าปิด ปุ่ม Heater ก็เช่นกัน เมื่อกดแล้วปุ่มกลายเป็นสีส้ม แสดงว่า Heater On ถ้าเป็นสีดำแสดงว่า Heater off แท่งสีฟ้าทั้ง 3 บอกถึงอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 สาย ไปหล่อเย็น Diffusion Pump เครื่อง RF Generator และ หัว Magnetron



ภาพที่ 4.6 Pump and Cooler Panel

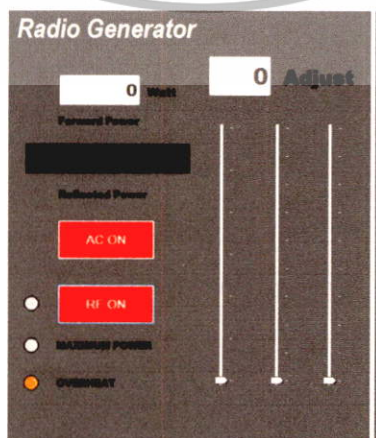
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 (a) ถ้าสถานะเมื่อ RF พร้อมใช้งาน เพื่อการตั้งค่า Setpoint (b) ตั้งค่า RF power ไปที่ 175 W

ส่วน Panel ในส่วนที่ 3 ได้ตั้งชื่อไว้ว่า Radio Generator ดังภาพที่ 4.7 ในส่วนนี้การเปิดเครื่อง RF จะเริ่มจากการกดปุ่ม AC ON ให้ปุ่มเป็นสีแดงเพื่อที่ไฟจ่ายเข้าไปที่เครื่อง หลังจากนั้นกดปุ่ม RF ON ไฟสถานะสีเขียวจะแสดงขึ้น แสดงว่า RF พร้อมที่จะใช้งานแล้ว แทนเลื่อนทั้ง 3 ที่อยู่ด้านขวาเป็นตัวกำหนด Power ที่ผู้ใช้งานต้องการสามารถทำการเลื่อนเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ ค่า Set point จะถูกแสดงอยู่บนช่องด้านบน แต่ Power จะยังไม่ถูกส่งให้ดำเนินการปรับจริงจนกว่าผู้ใช้งานจะกดที่ตำแหน่ง Adjust เมื่อกดปุ่ม Adjust แล้วปุ่มกลายเป็นสีส้ม Power RF จะค่อยถูกปรับเข้าหาจุด Set point อย่างช้าๆ ถ้าระหว่างที่ Power กำลังถูกปรับหรือปรับเสร็จแล้วก็ตาม ถ้าผู้ใช้งานกด Adjust อีกครั้งหนึ่ง (กลายเป็นสีดำ) power จะคงสถานะล่าสุดไว้จนกว่าจะมีการ Adjust อีกครั้งหนึ่ง ในขณะที่มี Output ในข้อ Forward Power จะแสดงค่า Power จริงที่ถูกส่งออกไปขณะนั้น Reflected Power Bar จะแสดงขีดสัญญาณที่ถูกสะท้อนกลับ

ในกรณีที่มีการผิดพลาด เกิด OVERHEAT ขึ้นไฟสีส้มจะแสดงขึ้นมาดังแสดงในภาพที่ 4.8 ไฟสีเขียวที่ RF ON จะหายไป ค่า Setpoint ที่ผู้ใช้งานตั้งไว้ และค่า Power ที่กำลังจ่ายอยู่ล่าสุด จะถูกรีเซ็ตให้กลายเป็น 0 ในขณะที่ OVERHEAT ผู้ใช้งานจะไม่สามารถกดปุ่ม Adjust หรือเลื่อนปรับ แทน Setpoint ได้ จนกว่าไฟ Overheat จะหายไป และ RF ON ขึ้นไฟสีเขียวใหม่อีกครั้งหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาพที่ 4.8 สถานะเมื่อ Overheat อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนต่าง ๆ

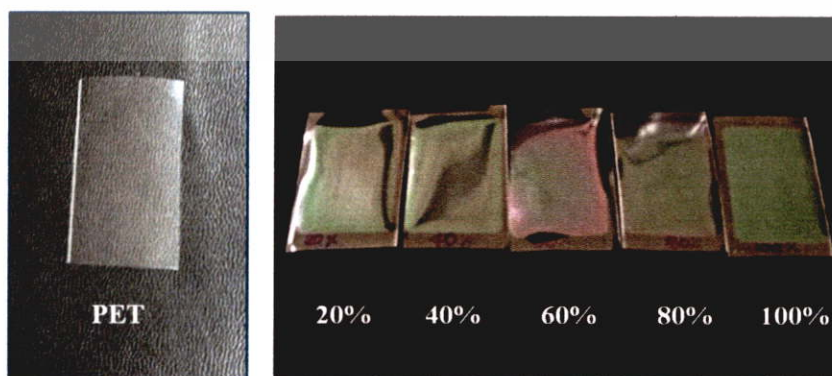
สำหรับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ได้ทำการปลูกในโครงการพิเศษนี้ เป็นฟิล์มบางที่ปลูกด้วยวิธีแอคทีฟอาร์เอพแอมกนิตรอนสปัตเตอริงบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน ที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง ด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 20% 40% 60% 80% และ 100% และทำการศึกษาค่าการใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นอลูมิเนียมเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99.99% โดยมีเงื่อนไขแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการเคลือบ ALN thin films เมื่อค่าอัตราส่วนระหว่าง N_2 กับ Ar gas ที่ค่าต่าง ๆ

เป่าสารเคลือบ	อลูมิเนียมความบริสุทธิ์ 99.99% ขนาด 3 นิ้ว
แผ่นฐานรองรับ	พลาสติก PET
ระยะห่างระหว่างเป่าสารเคลือบกับแผ่นฐานรอง	80 mm
ความดันก่อนทำการปลูกฟิล์ม	5×10^{-6} mbar
ความดันก่อนเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	2.7×10^{-2} mbar
กำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ	250 W
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	2.2×10^{-3} mbar
อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอน	20, 40, 60 80 และ 100%
$C_N = (N_2/N_2+Ar) \times 100\%$	
ระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม	45 นาที

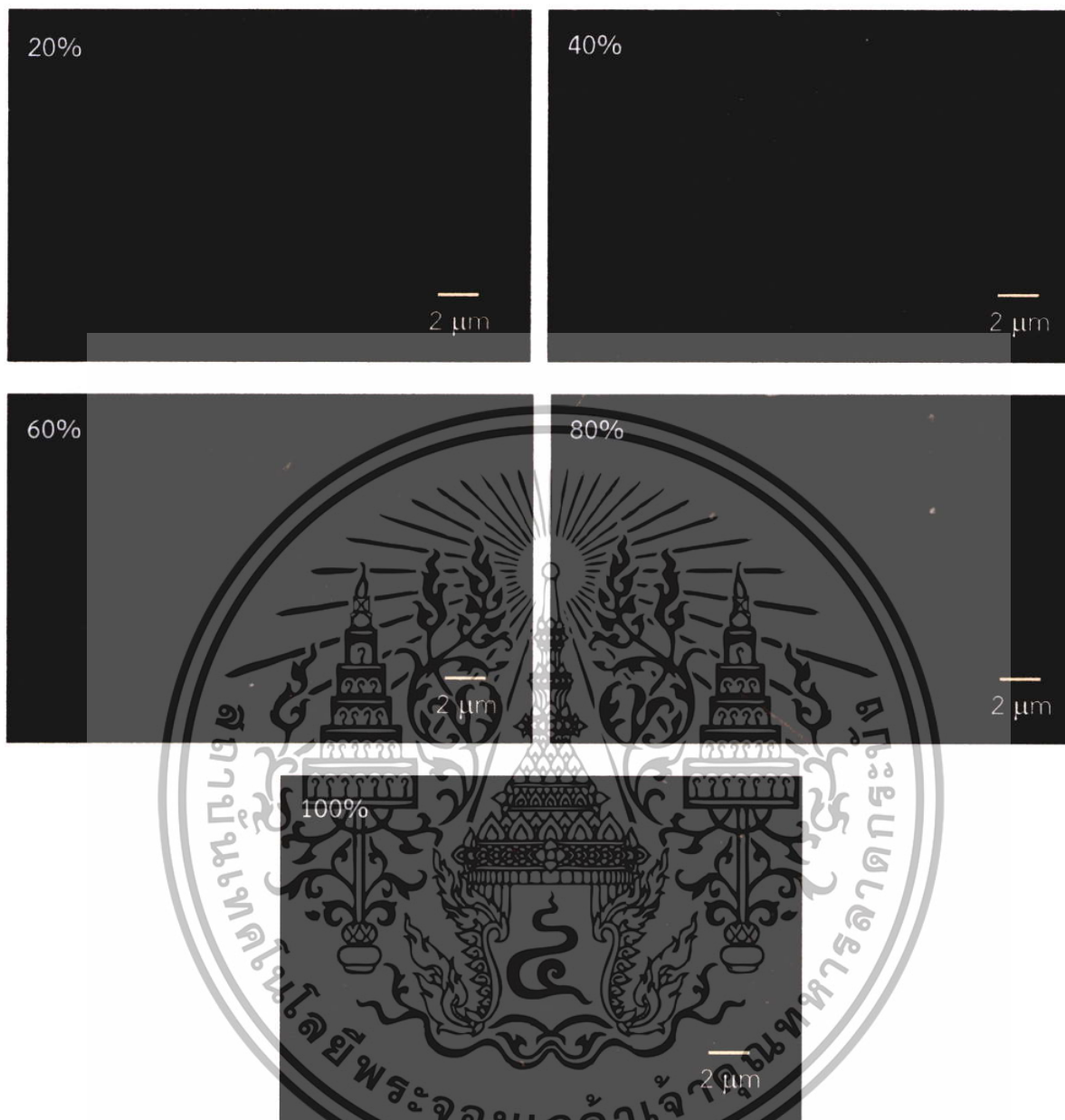
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและ Surface morphology ของฟิล์มบาง

ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ถูกเคลือบลงบนฐานรองรับ PET plastic ด้วยแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับไนโตรเจนที่อัตราส่วนของไนโตรเจนค่าต่าง ๆ ที่มีลักษณะดังภาพที่ 4.9 โดยมีลักษณะพื้นผิวดังภาพถ่าย SEM ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.9 ฐานรองรับ PET plastic และ ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ถูกเคลือบลงบน PET ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100% การคำนวณค่าการใช้เป่าสารเคลือบที่ใช้เป่าสารเคลือบที่เป็นอลูมิเนียมเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99.99% โดยมีเงื่อนไขแสดงในตารางที่ 4.1

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

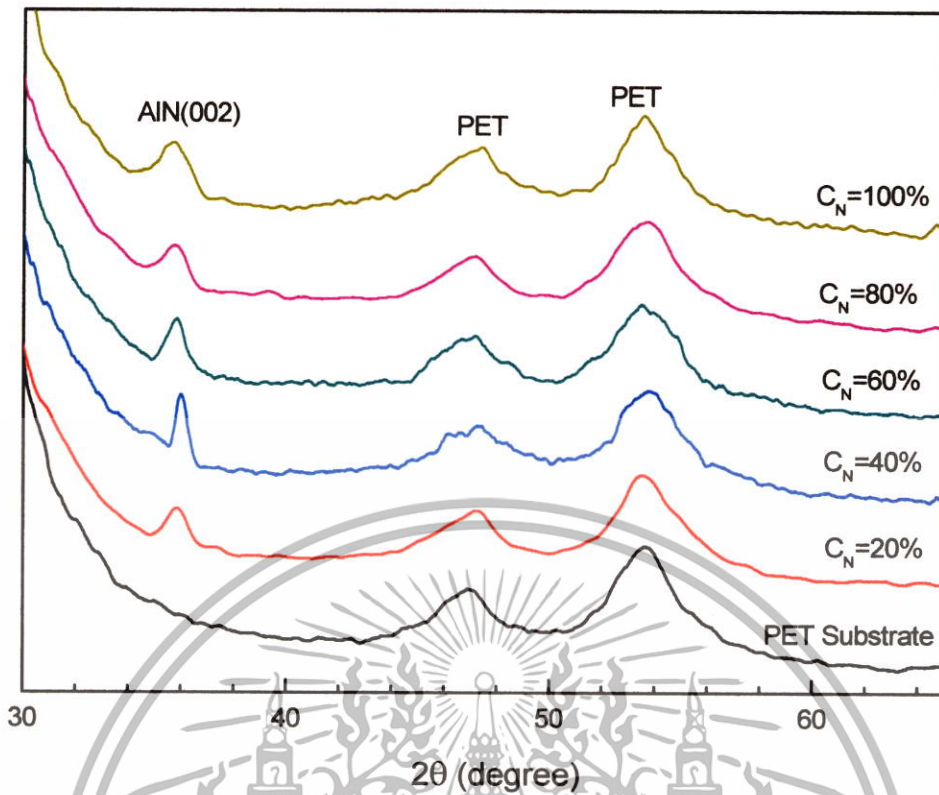


ภาพที่ 4.10 Surface morphology ของฟิล์มบางอูมิเนียมไนไตรด์ที่อัตราส่วนของแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

4.2.2 ความเป็นโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางอูมิเนียมไนไตรด์

ผลของอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อความเป็นผลึกของฟิล์มบางอูมิเนียมไนไตรด์ที่ถูกเคลือบบนแผ่นฐานรองพอลิเมอร์ (Polyethylene Terephthalate, PET) ถูกตรวจสอบด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Spectrometer, XRD) ผลการวัดแสดงดังภาพที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 XRD Pattern ของ AlN thin films ที่อัตราส่วนของ N₂ (C_N) ที่ต่าง ๆ

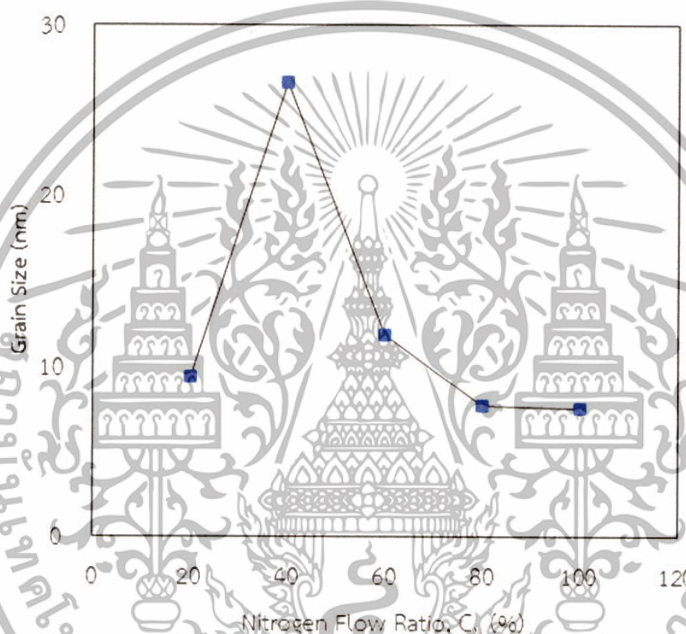
สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 20% มีพิกของชั้นฟิล์มอยู่ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ พิกแรกอยู่ที่ตำแหน่ง 35.77° มีขนาด FWHM เท่ากับ 0.929° มีความสอดคล้องกับตำแหน่งของอลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบ (002) พิกที่สองและสามเป็นพิกของ PET ในขณะที่ระนาบ (002) จะมีความเข้มของพิกสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนจาก 20% เป็น 40% ซึ่งพิกอยู่ที่ตำแหน่ง 35.99° มีขนาด FWHM เท่ากับ 0.327° และที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเป็น 60% 80% และ 100% ค่าความเข้มของพิกจะมีค่าลดลง และมีขนาด FWHM เท่ากับ 0.73 1.13 และ 1.16° ตามลำดับ

จาก XRD pattern ทำให้สามารถคำนวณหาค่าระหว่างระนาบระนาบ หรือ d-spacing และ crystallite size ได้ โดยจากการคำนวณพบว่า อัตราส่วนของไนโตรเจนแทบจะไม่ส่งผลต่อ d-spacing แต่กลับพบว่า อัตราส่วนของไนโตรเจนส่งผลต่อ crystallite size โดยที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 40% crystallite size จะมีขนาดใหญ่ที่สุด หลังจากนั้น crystallite size จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้น ผลของอัตราส่วนไนโตรเจนที่มีต่อ 2θ, FWHM, d-spacing และ crystallite size ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ XRD pattern แสดงดังตารางที่ 4.2 และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของไนโตรเจนกับขนาดของเม็ดผลึกเป็นดังกราฟภาพที่ 4.12 ซึ่งขนาดของ crystallite size ที่มีขนาดลดลงเกิดเนื่องจากอัตราการหลุดออกจากเป้าของ Al-atom ที่น้อยลงเนื่องจากการลดลงของ Ar-gas ซึ่งทำหน้าที่เป็น Sputtering gas

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ขนาดเม็ดผลึก ระยะห่างของโครงผลึก (d-spacing) และ FWHM ของระนาบ (002) ที่ได้ จาก XRD pattern ที่อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

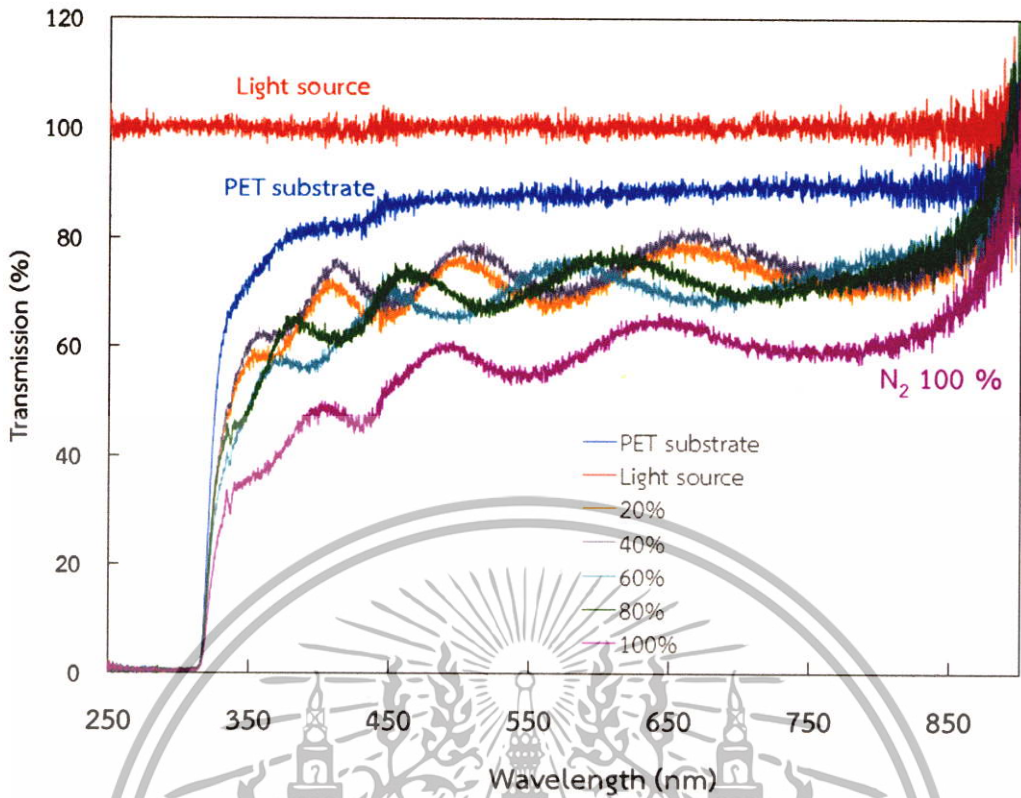
$(N_2/N_2+Ar) \times 100\%$		20%	40%	60%	80%	100%
2 θ	($^{\circ}$)	35.77	35.99	35.65	35.65	35.65
FWHM	($^{\circ}$)	0.92	0.32	0.73	1.12	1.15
d-spacing	(\AA)	2.508	2.493	2.516	2.516	2.516
FWHM	($^{\circ}$)	0.92	0.32	0.73	1.12	1.15
Crystallite Size (nm)		9.39	26.67	11.88	7.72	7.53



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Crystallite size กับ อัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน C_N

4.2.3 สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์

อัตราการส่องผ่านของแสง ช่องว่างแถบพลังงาน และ ค่าดัชนีหักเหเชิงแสง รวมทั้งค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง นั้นสามารถวิเคราะห์และคำนวณได้จาก Transmission spectra data ของฟิล์มบาง ซึ่งจากผลการวัดด้วย UV-Vis transmission spectroscopy แสดงดังภาพที่ 4.13 ซึ่งพบว่า ในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-800 nm ฟิล์มบางที่ได้ทำการเคลือบลงบน PET substrate มีอัตราการส่องผ่านแสงประมาณ 80% ยกเว้นฟิล์มบางที่ทำการเคลือบด้วยอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน 100% พบว่ามีอัตราการส่องผ่านแสงเพียง 55% เท่านั้น



ภาพที่ 4.13 Transmission spectra ของ AlN thin films coated on PET substrate

สเปกตรัมการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่แสดงในภาพที่ 4.13 สามารถนำไปใช้คำนวณหาค่าความหนา และค่าดัชนีหักเหของแสงด้วย Sweneole method ซึ่งในการทดลองคำนวณหาค่าความหนา และค่าดัชนีหักเหของแสงของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 60% ได้ดังตารางที่ 4.3 ความหนาของฟิล์มบางแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่า T_M T_m s n_1 d_1 m_o m d_2 และ n_2 ของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ซึ่งปลูกด้วยอัตราส่วนระหว่างก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 60%

λ (nm)	T_M	T_m	s	n_1	d_1 (nm)	m_o	m	d_2 (nm)	n_2
678	69.09	68.51	1.66	1.66		2.19	2	408	1.59
577	74.96	67.05	1.71	1.71		2.66	2.5	421	1.69
494	71.36	65.47	1.70	1.71	497	3.09	3	434	1.74
451	69.90	61.29	1.72	1.72	586	3.42	3.5	458	1.85
390	60.91	55.95	1.86	1.86	376	4.28	4	418	1.83
373	57.11	55.77	1.99	1.99	330	4.70	4.5	421	1.97

$d_1 = 447 \text{ nm}$

$d_2 = 427 \text{ nm}$

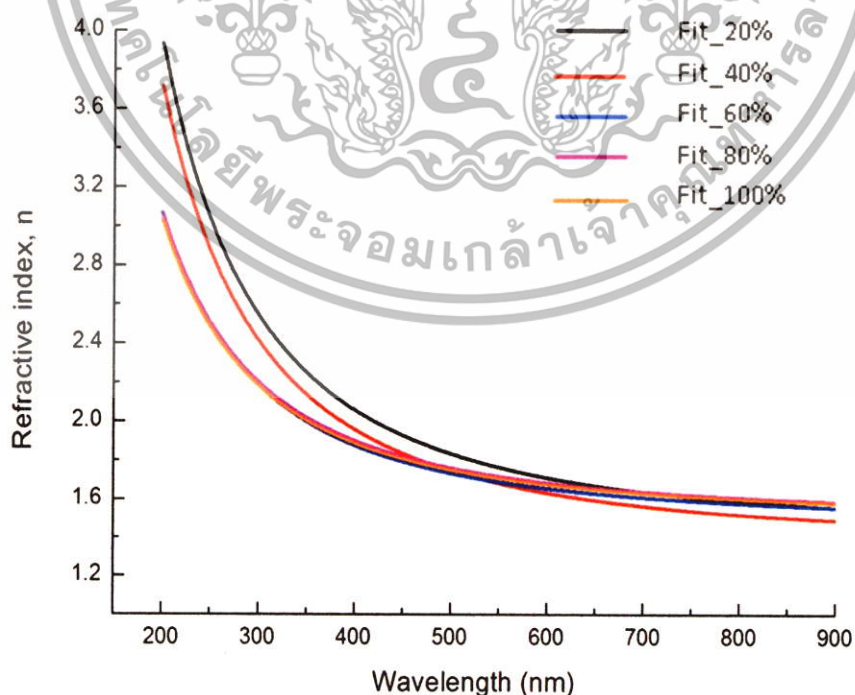
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการประเมินค่าจาก UV-Vis transmission spectra ที่ค่า C_N ต่าง ๆ

C_N (%)	ความหนาของฟิล์มบาง (nm)
20	413
40	514
60	427
80	444

จากตารางที่ 4.3 จากผลดังกล่าวจะได้ดัชนีหักเหของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เท่ากับ 1.77 1.68 1.69 1.72 และ 1.71 เมื่ออัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 20% 40% 60% 80% และ 100% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนขณะทำการปลูกฟิล์มมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ได้น้อยมาก สำหรับค่าดัชนีหักเหที่ได้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมได้จากวิธีแอททีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหที่ค่าความยาวคลื่นต่างแสดงดังภาพที่ 4.14

จากการวิเคราะห์ UV-Vis transmission spectra ในเบื้องต้นพบว่า เมื่อทำการเคลือบ AlN thin films ลงบน PET plastic ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 nm มีค่าลดลงจาก 80% เป็น 70% โดยอัตราส่วนของ N_2 gas ไม่มีผลต่อการส่องผ่านแสงของฟิล์มบาง แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนของ N_2 gas 40% จะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีความหนาสูงสุด 514 nm

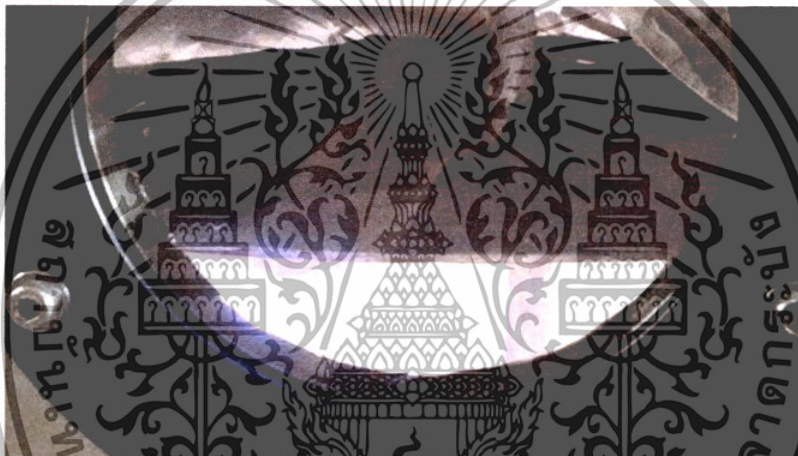


ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหของฟิล์มกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์บน PET substrate ที่เปอร์เซ็นต์ของแก๊สไนโตรเจนค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลทดสอบระบบควบคุมการทำงานของ RF magnetron sputtering ผ่านทางจอสัมผัส

หลังจากที่ได้ทำการซ่อมแซมจึงได้ทำการทดสอบระบบ RF magnetron sputtering โดยควบคุมการทำงานผ่านทางหน้าจอสัมผัส พร้อมทั้งทดสอบระบบป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดเนื่องจากผู้ใช้งาน จากการทดสอบพบว่า ระบบป้องกันการดำเนินงานผิดพลาดเนื่องจากผู้ใช้งาน เช่น ระบบหล่อเย็นไม่ป้อนน้ำเย็นเข้าสู่ระบบ พบว่าทำงานได้ดี รวมทั้งทำการสร้างพลาสมาด้วย RF generator ที่มีการควบคุมการทำงานผ่านทางหน้าจอสัมผัส สามารถทำงานได้ดี และ RF Generator ตัวใหม่สามารถทำงานร่วมกับ Auto impedance matching ที่มีอยู่เดิมได้ดี โดยการทดสอบทำโดยการสร้างพลาสมาจากแก๊สอาร์กอน ซึ่งลักษณะของพลาสมาที่ได้จากแก๊สอาร์กอนนี้จะมีลักษณะเป็นสีม่วงอ่อนดังภาพที่ 4.15 (a) หลังจากนั้นทำการป้อนแก๊สไนโตรเจนผสมเข้าไป พลาสมาจะมีลักษณะของสีที่เปลี่ยนไปเป็นม่วงแดงดังภาพที่ 4.15(b) ในช่วงนี้หน้าจอก็จะแสดงค่า Reflected Power เพิ่มขึ้น ชุดควบคุม Auto impedance matching จะเริ่มทำงาน ซึ่งเป็นการปรับค่า impedance ของ โหลด ให้มีค่าเหมาะสมกับ impedance ของ RF Generator



(a)

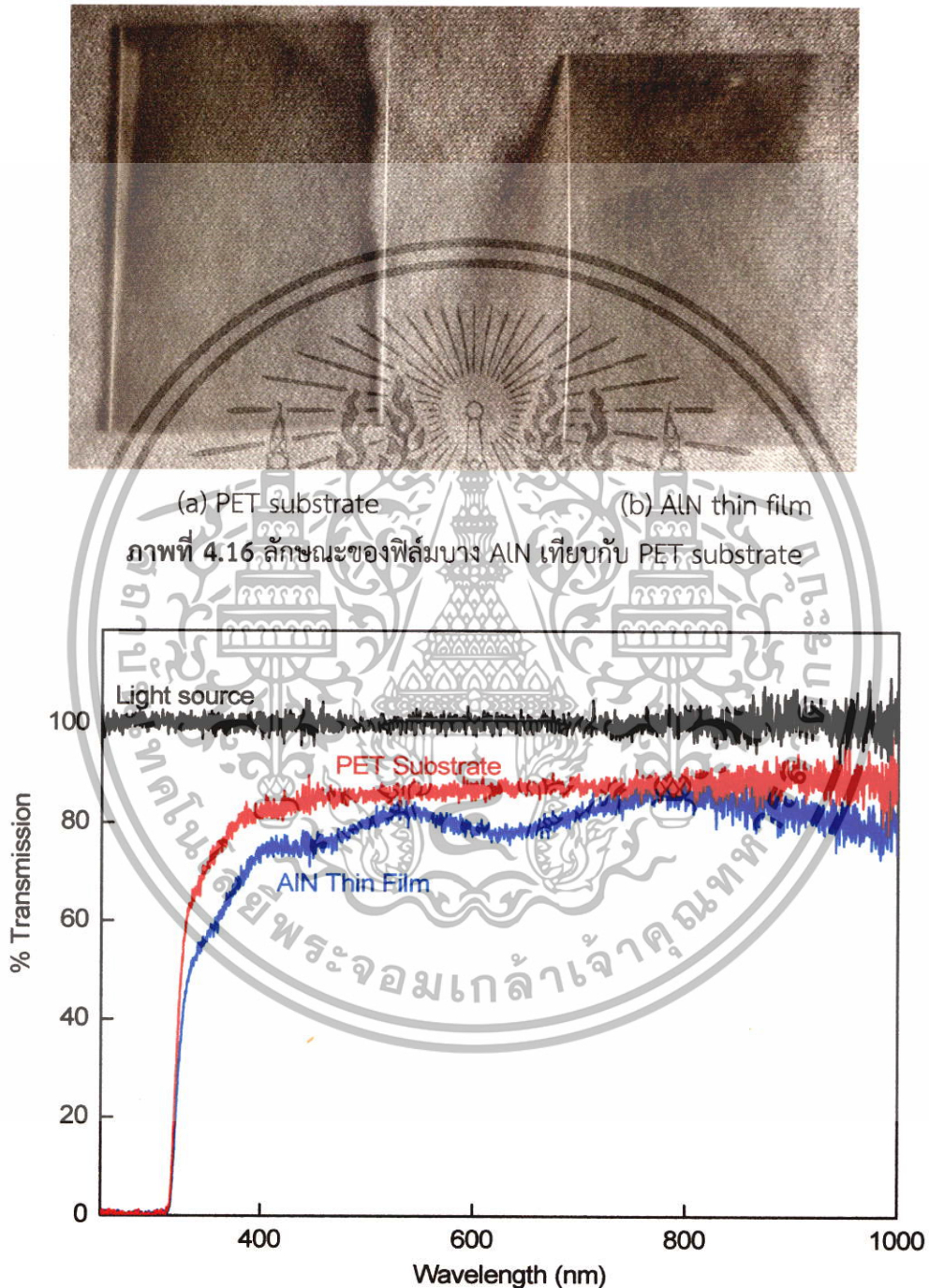


(b)

ภาพที่ 4.15 ความแตกต่างของเฉดสีของพลาสมาที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สอาร์กอนกับแก๊สผสมระหว่างอาร์กอนกับไนโตรเจนโดยสังเกตผ่านทางช่องมองของ Vacuum chamber (a) Ar plasma (b) Ar+N₂ plasma

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบทำการเคลือบฟิล์มบางของ AlN ลงบน PET substrate ด้วยเงื่อนไขเดียวกับตารางที่ 1 ด้วยอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน 40% ลักษณะของฟิล์มบางที่ได้เป็นดังภาพที่ 4.16 จากรูปเห็นได้ว่า ฟิล์มบางมีความใสมาก และ เมื่อทำการการวัด UV-Vis transmission technique พบว่า ฟิล์มบางที่ได้มี %transmission สูงใกล้เคียงกับ PET substrate ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 UV-Vis Transmission spectrum ของ AlN thin film ที่เคลือบด้วยระบบที่มีการปรับปรุงและซ่อมบำรุง RF generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานวิจัยภายใต้โครงการวิจัย “การปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วย วิธีรีดอกซ์ฟอว์เอพแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET” นั้นมีจุดประสงค์ เพื่อทำการปลูกและวัดสมบัติฟิล์มบางเพียโซอิเล็กทริกอลูมิเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีดอกซ์ฟอว์เอพแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET โดยมีขอบเขตดังนี้ คือ ปลูกและเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีรีดอกซ์ฟอว์เอพแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงบนฐานรองรับพลาสติก PET เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีการจัดเรียงโครงสร้างผลึกในระนาบ (002) และ ประเมินคุณภาพของฟิล์มบางด้วยเทคนิค UV-Vis Transmission Spectroscopy, FTIR spectroscopy, Raman Spectroscopy, FE-SEM, AFM และ XRD รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ gas phase species ที่เกิดขึ้นในพลาสมา กับ สมบัติของฟิล์มบางที่ได้ โดยความหนาแน่นของ gas phase species ใช้เทคนิคสเปกโทรสโคปีของการเปล่งแสงในการวัด

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานวิจัยนั้น ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนที่ต่าง ๆ คือ 20% 40% 60% 80% และ 100% โดยฟิล์มบางที่ได้จะถูกวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สมบัติเชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ศึกษาสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคการวัดการส่องผ่านแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ตถึงย่านตามองเห็นย่าน โดยพบว่า ฟิล์มบางที่ได้มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงในย่านตามองเห็นประมาณ 70% ยกเว้นฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราส่วนของไนโตรเจน 100% มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงเพียง 50% เท่านั้น และ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนมากกว่า 40% จะทำให้อัตราการปลูกฟิล์มมีค่าลดลง เมื่อใช้อัตราส่วนของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ ฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวริโซไซด์ซึ่งจัดเรียงตัวในระนาบ (002) และ(103) มีความสมบูรณ์ของผลึกสูงสุด เม็ดผลึกมีขนาด 26.67 nm แต่หลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงแหล่งกำเนิดคลื่นอาร์เอฟพบว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ที่ทำการเคลือบด้วยอัตราส่วนของไนโตรเจน 40% มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงถึง 80% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของฐานรองรับ PET

5.2 -ข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินงานวิจัยเห็นได้ว่าทางผู้วิจัยไม่ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ gas phase species ที่เกิดขึ้นในพลาสมา กับสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ RF generator :ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างมากไปกับการแก้ไขและปรับปรุงแหล่งกำเนิดดังกล่าว จึงทำให้ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะดำเนินงานในส่วนนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

6.1 รายละเอียดผลผลิตงานวิจัย – ชิ้นงาน

จากแหล่งเงินทุนของการดำเนินงานภายใต้โครงการวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงระบบการสังเคราะห์ฟิล์มบางเทคนิค RF magnetron sputtering ให้เป็นระบบที่มีการควบคุมการทำงานผ่านทางหน้าจอสัมผัสซึ่งมีลักษณะตามภาพถ่ายดังภาคผนวก ก นอกจากนี้ระบบที่ได้ทำการซ่อมแซมและปรับปรุงประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีความโปร่งแสงในย่านตามองเห็น โดยมีเปอร์เซ็นต์การส่องแสงในช่วง 400 – 800 nm สูงถึง 80% ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงสูงพอ ๆ กับฐานรองรับ ดังภาพถ่ายในภาคผนวก ข และ สเปกตรัมการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบได้จากระบบก่อนและหลังที่จะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ ดังในภาคผนวก ค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. A. MacDonald, Engineered films for display technologies, *J. Mater. Chem.* 14, 4–10 (2004).
- [2] W. A. MacDonald, M. K. Looney, D. MacKerron, R. Eveson, R. Adam, K. Hashimoto, and K. Rakos, Latest advances in substrates for flexible electronics, *J. SID* 15, 1075–1083 (2007).
- [3] T. Hanada, T. Negishi, I. Shiroishi, T. Shiro, *Thin Solid Films* 518 (2010) 3089.
- [4] K.A. Sierros, D.R. Cairns, J.S. Abell, S.N. Kukureka, *Thin Solid Films* 518 (2010) 2623.
- [5] J.S. Cho, S. Baek, J.C. Lee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 95 (2011) 1852.
- [6] Y.-Y. Yu, W.-C. Chien, C.-Y. Ciou, H.-C. Wu, *Thin Solid Films* 519 (2011) 4721.
- [7] K.-H. Cho, M.-G. Kang, S.-M. Oh, C.-Y. Kang, Y. Lee, S.-J. Yoon, *Thin Solid Films* 518 (2010) 6277.
- [8] D. Zhao, D.A. Mourey, T.N. Jackson, *IEEE Electron Device Lett.* 31 (2010) 323.
- [9] S.Y. Xiao, L.F. Che, X.X. Li, Y.L. Wang, *Microelectron. Eng.* 85 (2008) 452.
- [10] T. Lemke, G. Biancuzzi, H. Feth, J. Huber, F. Goldschmidtboing, P. Woias, *Sens. Actuators A* 168 (2011) 213.
- [11] E.J. Geiger, A.P. Pisano, F. Svec, *J. Microelectromech. Syst.* 19 (2010) 944.
- [12] M. A. Khan, R. A. Skogman, R. G. Schulze, M. Gershenson, *Applied Physics Letters*, vol. 43, no. 5, June 1983, pp. 492-494.
- [13] H.M. Liaw, W. Cronin, F.S. Hickernell, *Proceedings., IEEE* 1993, vol.1, 1993, pp.267-271.
- [14] M.B. Assouar, O. Elmazria, L. Le Brizoual, P. Alnot. *Diamond and Related Materials.*, vol.11, no. 3–6, March–June 2002, pp. 413–417.
- [15] V. Mortet, A. Vasin, P.-Y. Jouan, O. Elmazria, M.-A. Djouadi. *Surface and Coatings Technology.*, vol.176, Nov–Dec. 2003, pp. 88–92.
- [16] Kuan-Hsun Chiu, Jiann-Heng Chen, Hong-Ren Chen, Ruey-Shing Huang. *Thin Solid Films.*, vol. 515, no.11, April 2007, pp.4819–4825.
- [17] Cheng-Liang Huang, Kok-Wan Tay, Long Wu. *Solid-State Electronics.*, vol. 49, no.2, Feb. 2005, pp. 219–225.
- [18] S. Gonzalez-Castilla, J. Olivares, J. Malo, J.I. Izpura, E. Iborra, and J. Sangrador. *Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International.*, May 29 2007-June 1 2007, pp. 374-377.
- [19] J. Olivares, E. Iborra, M. Clement, L. Vergara, J. Sangrador, A. Sanz-Hervás. *Sensors and Actuators A.*, vol.123–124, 2005, pp.590–595.
- [20] Ziping Cao, Jinya Zhang, Hiroki Kuwanob. *Sensors and Actuators A.*, vol. 179, June 2012, pp.178–184.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] M Garcia Mendez, S Morales Rodriguez, R Machorro, W. De La Cruz, *Mexicana De Fisica* 54(4), (2008) 271.
- [22] V.Dumitru, C.Morosanu, V.Sandu, A.Stoica, *Thin Solid Films* 359, (2000)17.
- [23] R.Thapa, B. Saha, K.K.Chattopadhyay, *Applied Surface Science* 255, (2009) 4536.
- [24] L.F.Jiang, W Z Shen, H. Guo Qx, *J. Appl Phys* 94, (2003) 5704.
- [25] Guo Qx, J Diang , T Tanaka, M Nishio, H.Ogawa, *Appl.Phys.Lett.* 86, (2005)111.
- [26] Hsyi-En Cheng, Tien Chai Lin, Wen Chien-Chen, *Thin Solid Films* 425, (2003) 85.
- [27] C. Caliendo, P. Imperaton, E. Cianci, *Thin Solid Films* 441, (2003) 32.
- [28] X.D.Wang, W.Jiang, M.G.Norton, K.W.Hipps, *Thin Solid Films* 251, (1994) 121.
- [29] [5] H.Morkoc, Springer, New York.17, (1999).
- [30] I.Akasaki, H.Amano, Y.Koide, K. Hiramatsu, N.Suwaki, *Journal of crystal growth* 98, (1989) 209.
- [31] K.Hiramatsu, S.Itoh, H.Amano, I.Akasaki, N.Kuwano, T.Shiraishi, K.oki *J.Cryst. Growth* 115, (1991) 628.
- [32] J.P.Kar, G.Bose, S.Tuli *Scripta Materials* 54, (2006) 1755.
- [33] Duy Thach Phan, Gwi Sang Chung, *Applied Surface Science* 257, (2011) 8696.
- [34] C.Mirpuri, S-Xu and J.D.Long, K.Ostrikov , *J.Applied Physics* 101, (2007) 024.
- [35] Z R Song, Yuyh, Shen DS, Zousc, Zheng ZH, E Z Luo et.al *Mater. Lett.*, 57, (2003) 4643.
- [36] R.F. Davis, *Proc of the IEEE*,79, (1991) 702.
- [37] J.E. Sungren, and H. Hentzel, *J.Vac Sci Technol*, A4, (1986) 2259.
- [38] J. W. Judy, "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications," *Smart Materials & Structures*, vol. 10, pp.1115-1134, Dec 2001.
- [39] D. Banks, "Microengineering, MEMS, and Interfacing. A Practical Guide," CRC Press, 2006.
- [40] [<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201008sf2.html>]
- [41] Gonzalo Fuentes Iriarte. "AlN Thin Films Electroacoustics Devices" Ph. D. Thesis of Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala. 2003.
- [42] Nalwa H.S. *Handbook of Thin Films Material. Volume 3: Ferroelectric and Dielectric Thin Films.* Academic Press. 2002.
- [43] Ahmad Safari and E.Koray Akdogan. *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications.* Springer. 2008.
- [44] Supasarote Muensit. "Piezoelectric coefficients of gallium arsenide, gallium nitride and aluminium nitride" Ph. D. Thesis of Macquarie University: Sydney, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

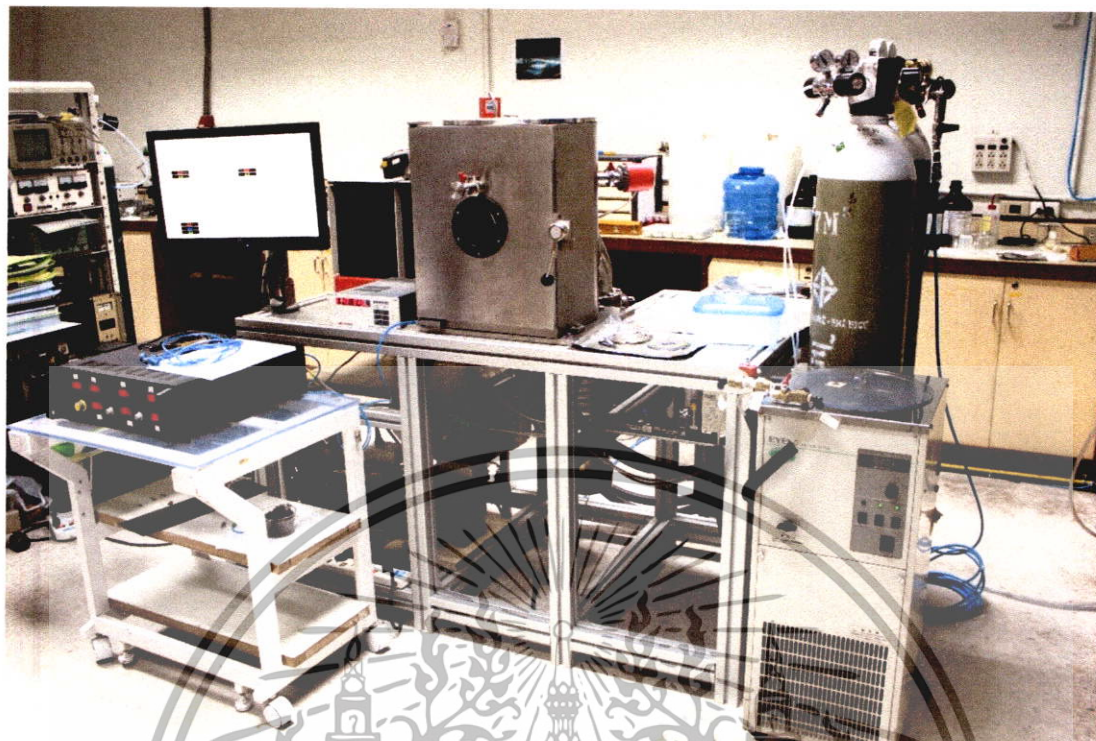
- [45] Rajan S. Naik, Joseph J. Lutsky, Rafael Reif, Charles G. Sodini, A. Becker, L. Fetter, H. Huggins, R. Miller, J. Pastalan, G. Rittenhouse, and Y. H. Wong. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 47 (2000) 292-296.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพถ่ายที่ ก-1 Magnetron Sputtering System ก่อนที่มีการปรับปรุง

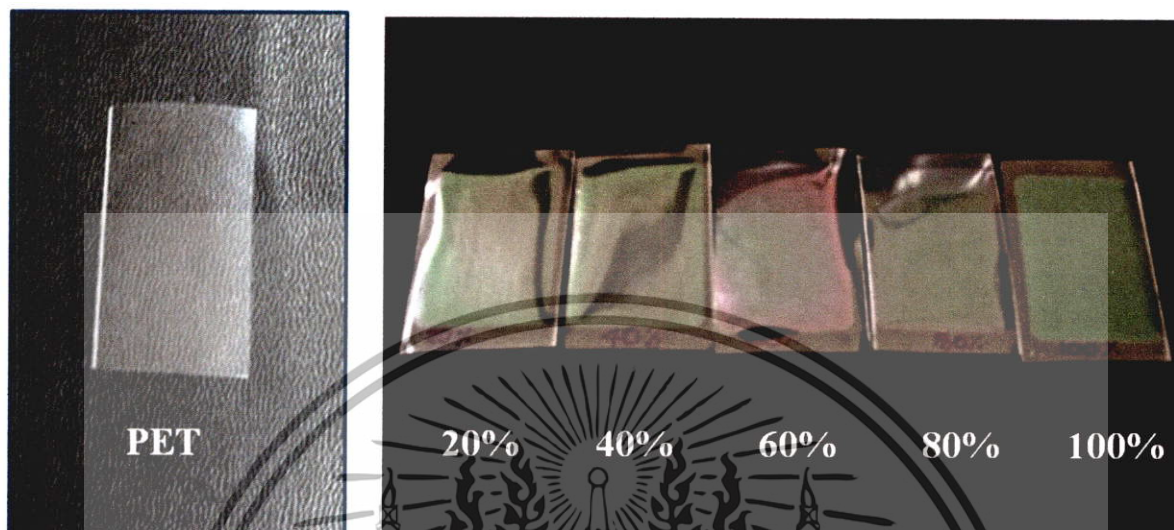


ภาพถ่ายที่ ก-2 Magnetron Sputtering System หลังที่มีการปรับปรุง โดยได้ทำการซ่อมแซมแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ และ ปรับปรุงให้ระบบสามารถควบคุมการทำงานผ่านทางหน้าจอสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข-1 ฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ก่อนที่จะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ



(a) PET substrate

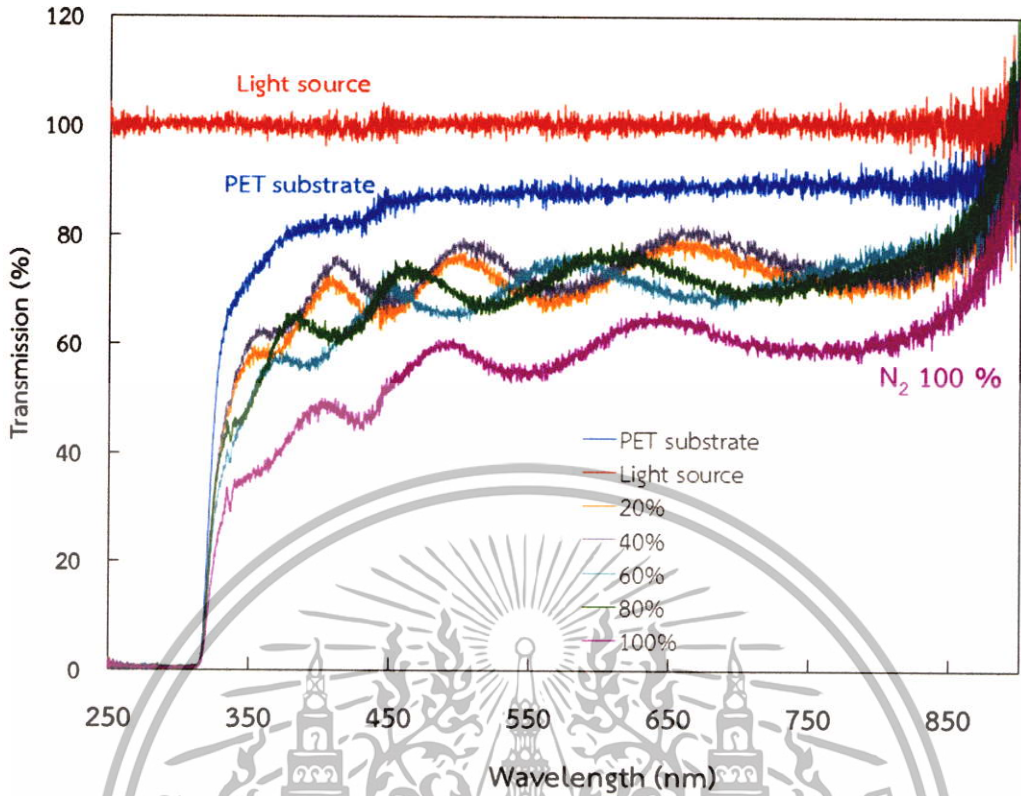
(b) AlN thin film

ภาพที่ ข-2 ลักษณะของฟิล์มบาง AlN เทียบกับ PET substrate หลังจากที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ

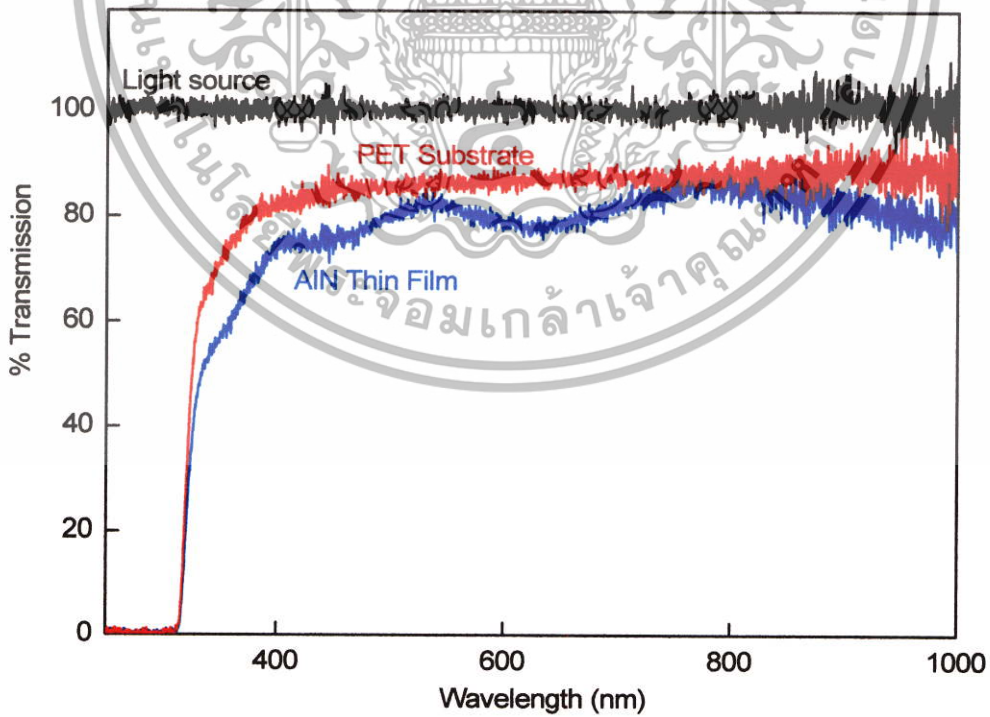
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค-1 Transmission spectra ของ AlN thin films coated on PET substrate



ภาพที่ ค-2 UV-Vis Transmission spectrum ของ AlN thin film ที่เคลือบด้วยระบบที่มีการปรับปรุง และซ่อมบำรุง RF generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาว ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss S.Tipawan Khlayboonme



2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1011-00042-23-1
ที่อยู่ 21/138 ถ.สารีบุตร-ทับยาว แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ ระดับ 6

4. หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่ เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์ 02-326-4111 ต่อ 6197

โทรศัพท์มือถือ 081-269-2134

โทรสาร 02-326-4413

E-mail

s.tipawan.kh@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	วุฒิ	สถาบัน	ประเทศ
2540	ปริญญาตรี	วท.บ (ฟิสิกส์ประยุกต์- โซลิตสเตท อิเล็กทรอนิกส์)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย
2544	ปริญญาโท	วท.ม (ฟิสิกส์ประยุกต์)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย
2556	ปริญญาเอก	ปร.ด (ฟิสิกส์ประยุกต์)	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย

6. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพ
ในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการ
วิจัย

- 6.1 การพัฒนาเทคนิคโพกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช”
Phase 1A

ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย

แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2541-2544

งบประมาณ 5,104,960.00 บาท

- 6.2 การพัฒนาเทคนิคโพกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช”
Phase 1B

ตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิจัย

แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2544-2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้ 2,701,496.00 บาทนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.3 การพัฒนาเทคนิคพลาสมาไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเตอร์นาโน”
Phase 2
ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2546-2548
งบประมาณ 3,815,350.00 บาท
- 6.4 การพัฒนาอุปกรณ์ชุด Secondary Ion Mass Spectroscopy และการใช้งาน
ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ปี พ.ศ. 2546-2548
งบประมาณ 4,069,109.00 บาท
- 6.5 การพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบรวมลำไอออนและระบบพลาสมาเพื่อการประยุกต์ใช้ในการผลิต
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเตอร์นาโน”
ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2548-2550
งบประมาณ 9,986,000.00 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. S.Tipawan Khlayboonme, Pitiporn Thanomngam and Warawoot Thowladda, Effect of SnCl₄ Concentration on Transparent and Conducting Undoped Tin Oxide Thin Films Key Engineering Materials, to be published.
2. S.Tipawan Khlayboonme and Warawoot Thowladda, Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering, Key Engineering Materials Vol. 659, 615-619 (2015).
3. S. Suriyasirikune, S.T. Khlayboonme, W. Thowladda, Phase-Shifting Interferometry for Surface Roughness Measurement on Glass Substrates, to be published in Advanced Materials Research
4. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Plasma Impedance Tuning Effect on Nanostructure of Diamond Films , Applied Mechanics and Materials Vol. 394, 32-37 (2013)
5. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Nanocrystalline Diamond Films Deposited by Two-step Approach from CH₄/H₂ Microwave Plasma: The Influence of Reactor Pressure, Applied Mechanics and Materials Vol. 339, 657-664 (2013)
6. S.Tipawan Khlayboonme, Wichan Wicharn Techitdheera and Warawoot Thowladda, Effect of Two-step Deposition Process on Morphology and Optical Properties of Nanostructured Diamond Films, Advanced Materials Research Vol. 651, 148-153 (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface: contact angle, wire pull and stitch pull strength studies, Proceeding of The 7th Annual Conference of The Thai Physics Society, SIAM PHYSICS CONGRESS 2012.
8. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface, 1st Mae Fah Luang University International Conference 2012.

รางวัลที่เคยได้รับ: Best Poster Award in the 8th International Conference on Materials Science and Technology for the presentation in Surface Engineering and Heat Treatment Session entitled Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on the Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นาย วรวุฒิ เถาลัดดา
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Warawoot Thowladda
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 1022 00181 95 1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9
4. หน่วยงานที่สังกัด สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



- ที่อยู่ เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520
- โทรศัพท์ 02-326-4111 ต่อ 6197
- โทรศัพท์มือถือ 081-927-9570
- โทรสาร 02-326-4413
- E-mail ktwarawo@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	วุฒิ	สถาบัน	ประเทศ
2522	ปริญญาตรี	วท.บ (ฟิสิกส์) เกียรตินิยม	รามคำแหง	ไทย
2525	ปริญญาโท	วท.ม (ฟิสิกส์การแพทย์)	มหิดล	ไทย
2535	ปริญญาเอก	Dr.rer.nat (Surface Analysis)	Free University of Berlin	เยอรมัน

6. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

- 6.1 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช”
Phase 1A
ตำแหน่ง ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2541-2544
งบประมาณ 5,104,960.00 บาท
- 6.2 การพัฒนาเทคนิคโฟกัสลำไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลับแซนวิช”
Phase 1B
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2544-2546
งบประมาณ 2,701,496.00 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6.3 การพัฒนาเทคนิคพลาสมาไอออนเพื่อประยุกต์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเตอร์นาโน”
Phase 2
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2546-2548
งบประมาณ 3,815,350.00 บาท
- 6.4 การพัฒนาอุปกรณ์ชุด Secondary Ion Mass Spectroscopy และการใช้งาน
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ปี พ.ศ. 2546-2548
งบประมาณ 4,069,109.00 บาท
- 6.5 การพัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบรวมลำไอออนและระบบพลาสมาเพื่อการประยุกต์ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด “คลัสเตอร์นาโน”
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการ
แหล่งทุนสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี พ.ศ. 2548-2550
งบประมาณ 9,986,000.00 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. S.Tipawan Khlayboonme, Pitiporn Thanomngam and Warawoot Thowladda, Effect of SnCl_4 Concentration on Transparent and Conducting Undoped Tin Oxide Thin Films Key Engineering Materials, to be published.
2. S.Tipawan Khlayboonme and Warawoot Thowladda, Comparative Study of Non-Annealing and Annealing on Properties of ITO Deposited by RF Magnetron Sputtering, Key Engineering Materials Vol. 659, 615-619 (2015).
3. S. Suriyasirikune, S.T. Khlayboonme, W. Thowladda, Phase-Shifting Interferometry for Surface Roughness Measurement on Glass Substrates, Advanced Materials Research, vol. 979, 463-466 (2014)
4. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Plasma Impedance Tuning Effect on Nanostructure of Diamond Films , Applied Mechanics and Materials Vol. 394, 32-37 (2013)
5. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Nanocrystalline Diamond Films Deposited by Two-step Approach from CH_4/H_2 Microwave Plasma: The Influence of Reactor Pressure, Applied Mechanics and Materials Vol. 339, 657-664 (2013)
6. Amorn Thedsakhulwong, Kitsakorn Locharoenrat and Warawoot Thowladda, Nitrogen Concentrations on Structural and Optical Properties of Aluminum Nitride Films Deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, Advanced Materials Research Vols. 631-632, 186-191 (2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. S.Tipawan Khlayboonme, Wichan Wicharn Techitdheera and Warawoot Thowladda, Effect of Two-step Deposition Process on Morphology and Optical Properties of Nanostructured Diamond Films, *Advanced Materials Research* Vol. 651, 148-153 (2013)
8. Amorn Thedsakhulwong, Kitsakorn Locharoenrat and Warawoot Thowladda, Structure and Piezoelectric Properties of Aluminum Nitride Thin films on Quartz Substrates deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research* Vol. 699, 308-313 (2013)
9. Chesta Ruttanapun, Aree Wichainchai, Yuttana Hongaromkid, Warawoot Thowladda, High temperature thermoelectric and optical properties of mixed half B-trivalent $\text{CuFe}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_2$ delafosite-oxides, *J. Solid State Chem.*, 2012
10. Piti Sinnuntasen, S.Tipawan Khlayboonme, and Warawoot Thowladda, Effect of low-pressure DC plasma cleaning on leadframe surface: contact angle, wire pull and stitch pull strength studies, *Proceeding of The 7th Annual Conference of The Thai Physics Society, SIAM PHYSICS CONGRESS 2012.*
11. A. Thedsakhulwong and W. Thowladda, Structural and Optical Characteristics of Aluminum Nitride Thin Films Deposited by Reactive RF Magnetron Sputtering, *Proceeding of The 6th Annual Conference of The Thai Physics Society, SIAM PHYSICS CONGRESS 2011.*
12. Pattareeya Kittidachachan, Warawoot Thowladda, Use of Organic Dyes to Modify Solar Spectrum, *6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim*, 139-143, 2009
13. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Effect of Abrasion Methods on Nucleation Density for Growing of Diamond Thin Films by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, *SIAM PHYSICS CONGRESS 2009.*
14. S. Saejia, A. Thedsakhulwong and W. Thowladda, Finite Element Modeling of Magnetic Field Profile for Magnetron Sputtering Cathode, *SIAM PHYSICS CONGRESS 2009.*
15. A.Thedsakhulwong and W. Thowladda, Removal of Carbon Contamination on Silicon Wafer Surfaces by Microwave Oxygen Plasma, *J. Met. Mater. Miner.* Vol.18(2) (Special issue MSAT 5) 2008
16. S.T. Khlayboonme and W. Thowladda, Determination of Silicon Isotope Abundance on Boron Dope P-Type Silicon Wafer Surface Using Static SIMS, *THAI JOURNAL OF PHYSICS, SERIES 4*, 134-137 (2009).
17. S. Tochoer and W. Thowladda, Optical Flat Calibration Using Laser Interferometer Method, *30th conference of Electrical Engineering, KMITT*, 1225-1228, 2007.
18. M. Pakkratok and W. Thowladda, Laser Doppler Interferometer for Small Angle Measurement, *26th conference of Electrical Engineering, KMITN*, 859-864, 2003.
19. P. Kuanpraekaw and W. Thowladda, Interferogram Evaluation using Zernike Polynomial, *24th conference of Electrical Engineering, KMITL*, 637-642, 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20. S. Pulthep and W. Thowladda, Light Spectrum Measurement Using Photodiode Array, 24th conference of Electrical Engineering, KMITL, 671-675, 2001.
21. H.B. Nielsen and W. Thowladda, Position and line width of the K-induced 4s resonance on Ag (100) : a two-photon photoemission study, Surf.Sci.Lett.,284, L426-L429, 1993.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้