

การศึกษาการสั่นพ้องของพลาสมอนในฟิล์มบางโลหะ  
เพื่อการประยุกต์ใช้ในการดักจับเชิงแสง  
THE STUDY OF PLASMONIC RESONANCE IN METAL THIN FILMS FOR  
OPTICAL TRAPPING APPLICATION



โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาการสั่นพ้องของพลาสมอนในฟิล์มบางโลหะ

เพื่อการประยุกต์ใช้ในการดักจับเชิงแสง

THE STUDY OF PLASMONIC RESONANCE IN METAL THIN FILMS FOR  
OPTICAL TRAPPING APPLICATION



โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF PLASMONIC RESONANCE IN METAL THIN FILMS FOR  
OPTICAL TRAPPING APPLICATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาการสั่นพ้องของพลาสมอนในฟิล์มบางโลหะเพื่อการประยุกต์ใช้ในการดักจับเชิงแสง

The Study of Plasmonic Resonance in Metal Thin Films for Optical Trapping Application

ชื่อนักศึกษา

นาย อธิสรณ์ บุญศิริจิรพงษ์ รหัสนักศึกษา 57051055

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์


ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วรการ นียากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการ	
ผศ.ธนภรณ์ สีสาว์ฒานนท์ กรรมการ	
ดร.วรการ นียากร อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการสั่นพ้องของพลาสมอนในฟิล์มบางโลหะเพื่อการประยุกต์ใช้ในการดักจับเชิงแสง The Study of Plasmonic Resonance in Metal Thin Films for Optical Trapping Application
ชื่อนักศึกษา	นาย อธิสรณ์ บัญศิริจิรพงษ์ รหัสนักศึกษา 57051055
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วรการ นียากร

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์ Surface Plasmon เพื่อการประยุกต์ใช้ในการดักจับ (Trapping) อนุภาคขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรในของไหล (Fluid) ด้วยการใช้ฟิล์มบางโลหะทอง (Pure gold : Au 99.9999%) และ ฟิล์มบางโลหะเงิน (Pure silver : Ag 99.9999%) ที่เคลือบลงบนแผ่น Borosilicate glass (BSG) ด้วยวิธี ดีซีสปัตเตอร์ (DC-Sputtering) โดยมีรูปแบบการเคลือบของแผ่นฟิล์มให้สม่ำเสมอทั่วแผ่นกระจก พร้อมทั้งกำหนดความหนาของฟิล์มบางแต่ละตัวอย่างให้ต่างกันในระดับ 25 , 50 , 75 นาโนเมตร เพื่อหามุมของแสงตกกระทบที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Surface Plasmon ตามหลักการของ Kretchmann-Raether configuration เพื่อการประยุกต์ใช้ในการศึกษาอนุภาคที่มีขนาดเล็กและการประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers) ต่อไป

**คำสำคัญ :** คลื่นผิวพลาสมอน ดีซีสปัตเตอร์ พื้นผิวพลาสมอน ฟิล์มบางโลหะเงิน ฟิล์มบางโลหะทอง

Title	The Study of Plasmonic Resonance in Metal Thin Films for Optical Trapping Application
Student	Mr. Atisan Boonsirijirapong Student ID 57051055
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Academic Year	2017
Advisor	Dr. Worakarn Neeyakorn

### Abstract

This special project is to study the effects of the Surface Plasmon for optical trapping the micro-particle in fluid using pure gold (Au 99.9999%) and pure silver (Ag 99.999%), grown on Borosilicate glass (BSG) by DC-Sputtering system. Determine a film is ordinary coating metallic plate-film all over glass and the thickness of each sample film was determined at 25, 50, 75 nm. Kretschmann-Raether configuration is used to find the appropriate angle of incident light to produce the Surface Plasmon of each film. For applications in small particle studies applied with other devices, such as Optical tweezers.

**Keyword:** DC-Sputtering, Gold film, Plasmon wave, Silver film, Surface Plasmon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สมบูรณ์ด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับความสนับสนุน และ ความช่วยเหลืออย่างสูงจาก ดร.วรการ นียากร อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาทางด้านวิชาการ อธิบายและแนะนำวิธีแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินการดำเนินงาน อบรมและปลูกฝังวิธีการทำงานวิจัยเป็นขั้นเป็นตอน การฝึกฝนทักษะการคิดแก้ไขปัญหา จนถึงแนะนำการใช้ชีวิตในอนาคต ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตการเรียนหรือการทำงานในระดับสูงต่อไป ผู้วิจัยขอให้อาจารย์มีสุขภาพแข็งแรง และมีผละกำลังที่จะทำงานและสั่งสอนลูกศิษย์รุ่นต่อไปตราบนานเท่านาน

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ ผศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ผศ.ธนภรณ์ สีสาวพัฒนานนท์ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆเรื่องที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบคุณ ดร.นงลักษณ์ หวงกำแหง ผู้ควบคุมดูแลห้องปฏิบัติการไบโอเซ็นเซอร์ (Bio-sensors laboratory) วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยี ผู้อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และให้การปรึกษาในส่วนของการทดลอง ตลอดจนจนถึงการวิเคราะห์ผล และคำแนะนำในการปรับปรุงคุณภาพการใช้งานฟิล์มเพื่อการประยุกต์ใช้ในอนาคต

ขอขอบคุณนายพิรศิลป์ เจริญยืนยาว นางสาววิวรรณ เฉลียวพงษ์ นักศึกษาปริญญาโท และนายอดิสร นพจุฑกุล นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยดูแล ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการทำฟิล์มและเทคนิคการวิเคราะห์วัสดุตัวอย่าง

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ให้ความรู้ ได้สังคมใหม่ๆ และให้อาณาเขตแก่ผู้วิจัยนี้

และสุดท้าย กราบขอบพระคุณบรรดาครูอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทในทุกแขนงสาขาวิชา กราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน

อสิสรค์ บุญศิริจิรพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 ปรากฏการณ์ Surface Plasmon Resonance (SPR)	4
2.1.1 การเพิ่มประสิทธิภาพ SPR เพื่อการดักจับอนุภาคด้วยโครงสร้างโลหะนาโน	8
2.2 วัสดุนาโนและนาโนเทคโนโลยี (Nanomaterial and Nanotechnology)	10
2.2.1 สมบัติเชิงไฟฟ้า	10
2.2.2 สมบัติเชิงแสง	10
2.2.3 สมบัติเชิงแม่เหล็ก	11
2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering process)	11
2.3.1 ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Magnetron sputtering system)	13
2.4 คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)	15
2.4.1 หลักการทำงานของคีมจับเชิงแสง	16
2.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy: AFM)	18
2.5.1 คุณสมบัติการใช้งานของ AFM	18
2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)	19
2.6.1 คุณสมบัติการใช้งานของ SEM	20
2.7 การเกิดโพลาไรซ์ของแสงโดยการสะท้อน (Brewster's angle)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3</b> ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	22
3.1 การเตรียมตัวอย่างฟิล์มโลหะเงินและโลหะทอง	22
3.1.1 การเตรียมฟิล์มโลหะทอง	25
3.1.2 การเตรียมฟิล์มโลหะเงิน	26
3.1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติด้านความหนาของฟิล์ม	28
3.2 ทดลองหามุมลำแสงตกกระทบที่เหมาะสมในการเกิดปรากฏการณ์ SPR	28
<b>บทที่ 4</b> ผลการทดลอง	36
4.1 ผลการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะ	36
4.1.1 ผลการเตรียมฟิล์มโลหะทอง	37
4.1.2 ผลการเตรียมฟิล์มโลหะเงิน	38
4.2 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR	45
4.2.1 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะทอง	46
4.2.1 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะเงิน	51
4.3 ปัญหาในการประยุกต์ใช้ SPR กับ Optical tweezers	56
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.1.1 สรุปผลการหามุม SPR ของฟิล์มทอง	59
5.1.2 สรุปผลการหามุม SPR ของฟิล์มเงิน	59
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	60
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	67

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
3.1 ค่าพารามิเตอร์สมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆ	35
4.1 เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางโลหะทองภายใต้สภาวะความดันคงที่ $1 \times 10^{-1}$ mbar และกระแส Discharge คงที่ 18 mA.	37
4.2 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag1	38
4.3 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag2	40
4.4 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงินหนา 75 นาโนเมตร	42
4.5 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงินหนา 50 นาโนเมตร	43
4.6 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงินหนา 25 นาโนเมตร	44
4.7 เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางโลหะเงินภายใต้สภาวะความดันคงที่ $1.4 \times 10^{-2}$ mbar และกำลังไฟฟ้าคงที่ 18 Watt	45
4.9 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 25 นาโนเมตร	46
4.10 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 50 นาโนเมตร	47
4.11 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 75 นาโนเมตร	48
4.12 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะทองที่ความหนา 3 ระดับ	49
4.13 สรุปผลมุมที่มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำที่สุดของฟิล์มโลหะทอง 3 ระดับความหนาที่วัดภายใต้ตัวกลางน้ำปอดประจุ (De-ionized water)	50
4.14 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 25 นาโนเมตร	51
4.15 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 50 นาโนเมตร	52
4.16 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 75 นาโนเมตร	53
4.17 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะเงินที่ความหนา 3 ระดับ	54
4.18 สรุปผลมุมที่มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำที่สุดของฟิล์มโลหะเงิน 3 ระดับความหนา ที่วัดภายใต้ตัวกลางน้ำปอดประจุ (De-ionized water)	55
4.19 ค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของฟิล์มตัวอย่างแต่ละชั้น	55

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ประจุที่กระจายอยู่บนพื้นผิวและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Surface Plasmon Polariton	4
2.2 การจัดอุปกรณ์กระตุ้น Plasmon wave โดยปริซึม	5
2.3 ระบบชุดกระตุ้น Plasmon wave แบบ Krestchmann ที่กระตุ้นด้วยแสงตกกระทบ P-polarized	5
2.4 Phase matching ของแสงตกกระทบและ Plasmon wave	6
2.5 ค่าการสะท้อนออกมาของแสงที่มุมต่างๆ โดย คือตำแหน่งที่เกิด Plasmon wave	7
2.6 Self-organized ของอนุภาคโพลีสไตรีนขนาด 5 ไมโครเมตร บนแผ่นฟิล์มทอง วงรีแสดง บริเวณเลเซอร์ตกกระทบความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร ชนิด p - polarization ด้วยมุมตกกระทบ 62°	8
2.7 ส่วนประกอบของแนวแรงที่กระทำต่ออนุภาคในบริเวณใกล้เคียงกับโครงสร้างโลหะแบบแผ่นงาน	9
2.8 รูปแบบต่างๆของวัสดุโลหะนาโนที่นำมาใช้สร้างระบบ Surface Plasmon Resonance	9
2.9 กระบวนการสเปตเตอริงเชิงฟิสิกส์	11
2.10 ระบบการเคลือบแบบสเปตเตอริง	12
2.11 ระบบ Magnetron sputtering	14
2.12 จากการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆ เพื่อดักจับวัตถุขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในระบบ Optical – Tweezers	15
2.13 Gradient force ที่กระทำกับอนุภาค Mie ซึ่งจะมีแรงกระทำเข้าสู่จุดโฟกัสของเลเซอร์	16
2.14 การจัดอุปกรณ์ Optical tweezers อย่างง่าย	17
2.15 แสง 2 ชนิด (Scattering , Gradient) ที่เกิดขึ้นเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านอนุภาค	17
2.16 การทำงานของระบบ AFM	19
2.17 ส่วนประกอบของระบบ SEM	20
2.18 ระนาบแสงตกกระทบระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่ทำให้เกิดการโพลาไรซ์ด้วยมุม Brewster	21
3.1 แผ่นกระจก BSG ขนาด 75x25 มิลลิเมตรหนา 1 มิลลิเมตร	22
3.2 แท่นวางแผ่นกระจกสไลด์ (Microscope stage)	23
3.3 แผ่น BSG ที่ตัดแล้วขนาด 25x25 mm. เทียบกับขนาดก่อนตัด	23
3.4 สารที่ใช้ในการล้างกระจกด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค	24
3.5 (ซ้าย) แผ่นกระจกที่ใส่ร่วมกับสารทำความสะอาดในบีกเกอร์ ,(ขวา) เครื่องล้างอัลตราโซนิค	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ลักษณะของเครื่อง DC-Sputtering JEOL JFC-1200 Fine Coater	25
3.7 DC Sputtering system	26
3.8 คุณสมบัติของเป้าโลหะเงิน (Silver Target) สำหรับ Sputter ที่ต้องการใช้เคลือบฟิล์มบาง	26
3.9 ลักษณะของแผ่นเป้าโลหะเงิน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว	27
3.10 กราฟอัตราการก่อตัวของฟิล์มเงินต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้รักษากระแส Discharge ภายใต้สภาวะความดัน $2 \times 10^{-2}$ mbar โดยวงกลมเป็น DC-Sputtering mode และ สี่เหลี่ยมเป็น RF-Sputtering Mode	27
3.11 ระบบทดสอบเพื่อวัดมุม ด้วย Spectrometer	29
3.12 ภาพเลเซอร์ไดโอดด้านหน้า ที่ใส่อยู่กับแท่นวาง	29
3.13 (ซ้าย) ภาพเลเซอร์ไดโอดด้านข้าง, (ขวา) คุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด	30
3.14 ภาพการเกิดแสงโพลาไรซ์จากผลึก Polarizing Beam splitter	30
3.15 (ซ้าย) ภาพขณะจัดแสงเลเซอร์เป็นแสง S-polarized เข้ม, (ขวา) ภาพขณะจัดแสงเลเซอร์เป็นแสง P-polarized เข้ม	31
3.16 ลักษณะการวางแผ่นสไลด์ฟิล์มบนปริซึม	31
3.17 ลักษณะของ Rotatable Prism holder และ BK7 Prism	32
3.18 ลักษณะการติดแผ่นพลาสติกด้วยเทปโฟมกาวสองหน้าอเนกประสงค์เพื่อทำช่องใส่สารละลาย	32
3.19 ลักษณะภายนอกของ Spectrometer sensor	33
3.20 ลักษณะของกราฟที่บันทึกค่าได้เมื่อใช้วัดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร	33
3.21 ไฟล์ข้อมูล Excel ที่บันทึกค่าได้จากซอฟต์แวร์ของ Spectrometer	34
3.22 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์การทดลอง	35
3.23 ลักษณะและการจัดวาง เลเซอร์, เลนส์นูนและปริซึม	35
3.24 ลักษณะการจัดวาง ปริซึม, ฟิลเตอร์, Objective lens และ Spectrometer	35
4.1 (ซ้าย) ลักษณะของฟิล์ม โลหะเงินบน BSG ขนาด 25x25 มิลลิเมตร (ขวา) และฟิล์มโลหะทอง	36
4.2 ฟิล์มโลหะทองบน Borosilicate ขนาด 25x25 มิลลิเมตร ที่มีความหนา 25 (แถวซ้าย) , 50 (แถวกลาง), 75 (แถวขวา) นาโนเมตร	37
4.3 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag1 ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	39
4.4 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag1 ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า บันทึกด้วย	39

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
Scanning Electron Microscope (SEM)	
4.5 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag2 ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	40
4.6 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag2 ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	41
4.7 ภาพ Cross section ความหนาฟิล์มโลหะเงินเฉลี่ย 75 นาโนเมตร ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	42
4.8 ภาพ Cross section ความหนาฟิล์มโลหะเงินเฉลี่ย 50 นาโนเมตร ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	43
4.9 ภาพ Cross section ความหนาฟิล์มโลหะเงินเฉลี่ย 25 นาโนเมตร ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ กำลังขยาย 100,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	44
4.10 การวัดความเข้มแสงโดยตรงเพื่อใช้เทียบกับค่าความเข้มการสะท้อน	45
4.11 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 25 นาโนเมตร	47
4.12 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 50 นาโนเมตร	48
4.13 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 75 นาโนเมตร	49
4.14 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะทองที่ 3 ระดับความหนา	50
4.15 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 25 นาโนเมตร	51
4.16 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 50 นาโนเมตร	52
4.17 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 75 นาโนเมตร	53
4.18 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะเงินที่ 3 ระดับความหนา	54
4.19 เส้นทางเดินแสงของ Optical tweezers	56
4.20 ลักษณะของแท่นวางตัวอย่างสำหรับชุดกระตุ้น SPR	56
4.21 (ซ้าย) แท่นวางตัวอย่างของ Optical tweezers, (ขวา) แท่นวางตัวอย่างชุดกระตุ้น SPR	57
4.22 แผ่นสไลด์ดั้งเดิมของ Optical tweezers เป็นชนิดหลุมใส่สารตัวอย่าง (Cavity Slides)	57
4.23 การหักเหของแสงโดยปริซึมทำให้เกิดการซ้อนกันของภาพวัตถุ Nano-rod	58
4.24 ความคมชัดของภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อทำการเลื่อนตำแหน่งแท่นวางที่ไม่ได้ระนาบฉาก กับกล้อง	58
1A แท่นวางแผ่นสไลด์กล้องจุลทรรศน์และปริซึม	68

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2A	ชิ้นส่วนใต้แท่นวางแผ่นสไลด์สำหรับป้องกันปริซึม	69
3A	ลักษณะของแท่นวางแผ่นสไลด์รูป 1ก ประกอบกับรูป 2ก	70
4A	ลักษณะการใส่ผลึกปริซึมลงในช่อง	70



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรากฏการณ์ Surface plasmons (SP) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากโครงสร้างรอยต่อของพื้นผิววัสดุโลหะบางซึ่งสัมผัสอยู่กับวัสดุไดอิเล็กทริก (Metallic/dielectric interface) หากมีคลื่นแสงมาตกกระทบบริเวณรอยต่อนี้จะเกิด Plasmon wave ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นในโลหะไปในทิศทางเดียวกับลำแสงตกกระทบก่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณดังกล่าว คุณสมบัตินี้ถูกนำมาวิจัยเพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้ดักจับอนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้ ในโครงการนี้จึงได้ศึกษาและทำการทดลอง การสร้างฟิล์มบางโลหะเงินและทองมาเคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์สำหรับกล้องจุลทรรศน์ (Microscope slides) ซึ่งเป็นแก้วชนิด Borosilicate Glass (BSG) เป็นฐานปลูกฟิล์มด้วยกระบวนการ Sputtering ที่มีความหนาของฟิล์มต่างกัน จากนั้นจะใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นบริเวณรอยต่อของฟิล์มบางโลหะ (Metal) กับสารละลาย (Dielectric) เพื่อให้สามารถดักจับอนุภาคขนาดไมโครเมตรในของไหล (Fluid) ด้วยวิธีจัดระบบการทดลองในแบบของ Kretschmann–Raether [3] ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนแสงกลับหมดภายในปริซึมแก้ว (Total Internal Reflection ; TIR) เพื่อเป็นการนำมาประยุกต์ใช้ในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ Optical tweezers แบบดั้งเดิมที่ต้องใช้แสงเลเซอร์ความเข้มสูงในกระบวนการจับอนุภาค วิธีนี้จะช่วยลดการใช้กำลังแสงขั้นต่ำที่ใช้ในกระบวนการได้และเพิ่มความแม่นยำในการดักจับ (Trapping) อนุภาคให้มากขึ้น ในปัจจุบันการใช้แสงดักจับอนุภาคด้วยวิธี SP มีแนวโน้มที่จะเปิดโอกาสใหม่ๆ ในการพัฒนาเทคโนโลยี Optofluidic ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพแรงทางแสงด้วยพื้นผิวโลหะขนาดเล็ก ทำให้เกิดกระบวนการ Self-organized ของอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร และยังสามารถปรับและควบคุมขนาดของอนุภาคที่ต้องการจับได้เพียงการเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบของแสงเลเซอร์เพื่อใช้ในงานคัดแยกอนุภาคต่างขนาดได้ ในอนาคตจะสามารถพัฒนาไปสู่การดักจับอนุภาคที่เล็กลงไปถึงระดับนาโนเมตร เนื่องจากในปัจจุบัน วิธีนี้เป็นยอมรับว่าได้ผลดีในการจับอนุภาคขนาดเล็กด้วยอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับโลหะนาโน [4]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาปรากฏการณ์ Surface Plasmon ที่เกิดจากชั้นฟิล์มบางโลหะกับตัวกลางไดอิเล็กทริกน้ำ ปลอดภัย
2. เพื่อทดสอบสมมุติฐานในการเกิดปรากฏการณ์ Surface Plasmon เนื่องจากผลของความหนาของแผ่นฟิล์มบางโลหะ และมุมแสงตกกระทบ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาปรากฏการณ์ Surface Plasmon Resonance บนฟิล์มบางโลหะทอง และ ฟิล์มบางโลหะเงินที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ชนิด Borosilicate glass โดยผิวหน้าฟิล์มโลหะจะสัมผัสอยู่กับน้ำปลอดภัยโดยตรง และใช้การกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) สีแดงความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ในรูปแบบ Kretschmann–Raether
2. ศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางโลหะซึ่งส่งผลต่อปรากฏการณ์ SPR โดยใช้ฟิล์มบางโลหะทอง และ ฟิล์มบางโลหะเงิน ที่มีความหนา 25 , 50 , 75 นาโนเมตร โดยการปรับมุมแสงตกกระทบช่วง 54 องศาถึง 70 องศา

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

โครงการมีระยะเวลาการดำเนินงานรวมทั้งสิ้น 10 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือน กันยายน พ.ศ.2560 ถึงเดือน มิถุนายน พ.ศ.2561 ซึ่งมีแผนดำเนินงานแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	ก.ย. 2560 – เม.ย. 2561									
	ก.ย. 2560	ต.ค. 2560	พ.ย. 2560	ธ.ค. 2560	ม.ค. 2561	ก.พ. 2561	มี.ค. 2561	เม.ย. 2561	พ.ค. 2561	มิ.ย. 2561
1.ศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะเงิน และฟิล์มบางโลหะทอง	←—————→									
2.เตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะเงินและฟิล์มบางโลหะทอง			←—————→							
3.ทดลองเพื่อหามุมของลำแสงตกกระทบที่เหมาะสมในการกระตุ้น SPR						←—————→				
4.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง								←—————→		

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจกระบวนการเกิด Surface Plasmon
2. สามารถเสนอแนะแนวทางประยุกต์ใช้ระบบกระตุ้น Surface Plasmon ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆต่อไปได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปรากฏการณ์ Surface Plasmon Resonance (SPR)

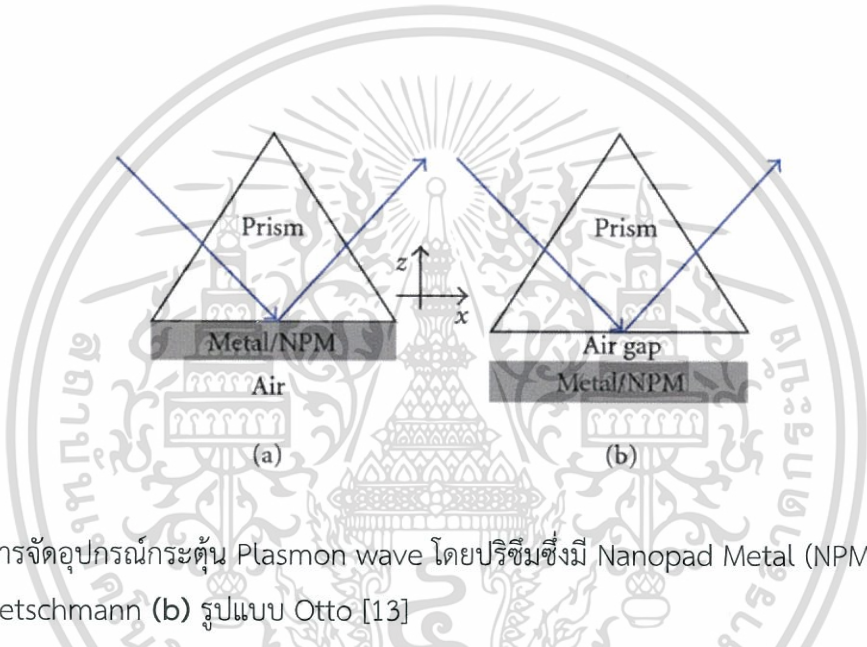
พื้นผิวพลาสมอน (Surface Plasmon) [1-12] คือ บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง โลหะกับวัสดุไดอิเล็กทริก (Metal-dielectric interface) เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความถี่เหมาะสมจะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสนี้ การกระตุ้นนี้ทำให้อิเล็กตรอนในผิวโลหะเกิดการสั่น



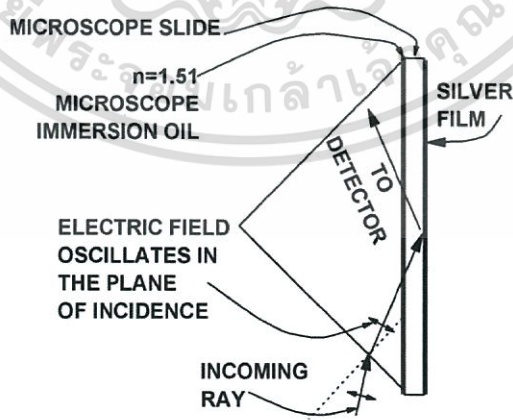
รูปที่ 2.1 ประจุที่กระจายอยู่บนพื้นผิวและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Surface Plasmon Polariton [13]

การกระตุ้นให้เกิด Surface Plasmon ทำได้โดยการใช้แสงขาเข้าให้ตกกระทบปริซึมเพื่อให้เฟสของแสงตกกระทบผิวสัมผัสตรงกับเฟสของคลื่นพลาสมอน (Plasmon wave) [13] ด้วยการจัดอุปกรณ์รูปแบบเฉพาะของ Otto หรือ Kretschmann ซึ่งเป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่สามารถวิจัยและออกแบบการทดลอง Surface Plasmon ได้เป็นผลสำเร็จ ด้วยการสร้างชุดกระตุ้น Plasmon wave และทำการตรวจจับแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับหมด (Attenuated total reflection ; ATR) ที่สะท้อนออกมาจากปริซึมนั้นซึ่งแสงจะอ่อนกำลังลง นอกจากนี้ยังมีวิธีการออกแบบระบบกระตุ้น Plasmon wave แบบอื่น ๆ จากการใช้ เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction grating)

การตรวจจับ ATR ของ Kretschmann [14] จะใช้การตรวจจับด้วยกล้องจุลทรรศน์เลื่อนตำแหน่งเป็นมุมต่างๆ โดยใช้หลักการที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่า และแสงนั้นตกกระทบผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ด้วยมุมมากกว่ามุมวิกฤต แสงจะเกิดการสะท้อนกลับหมด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Total Internal Reflection (TIR) ซึ่งทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด เรียกว่า Evanescent electromagnetic field ขนาดแอมพลิจูดของคลื่น (Amplitude) จะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) ตามระยะที่ออกห่างจากผิวสัมผัส โดยระยะทางที่ Evanescent wave เคลื่อนที่ไปได้จะเรียกว่า Penetration depth

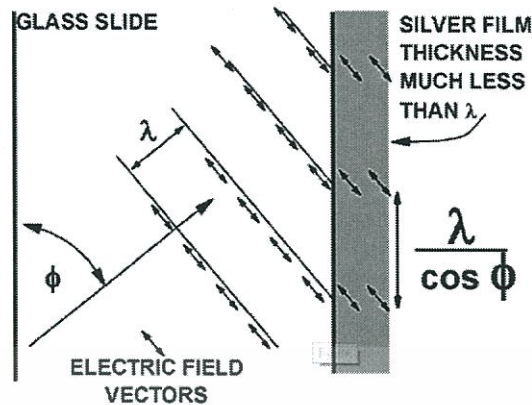


รูปที่ 2.2 การจัดอุปกรณ์กระตุ้น Plasmon wave โดยปริซึมซึ่งมี Nanopad Metal (NPM) (a) รูปแบบ Kretschmann (b) รูปแบบ Otto [13]



รูปที่ 2.3 ระบบชุดกระตุ้น Plasmon wave แบบ Kretschmann ที่กระตุ้นด้วยแสงตกกระทบ p-Polarized [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 Phase matching ของแสงตกกระทบและ Plasmon wave [3]

แสงประเภท Transverse Magnetic field (TM) ที่เป็นแสงโพลาไรซ์ (Polarized) ซึ่งตกกระทบบริเวณผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางชั้นไดอิเล็กทริกกับชั้นโลหะ จะกระตุ้นให้เกิด Plasmon wave ขึ้นตามแนวพื้นผิวและจะเคลื่อนที่ไปตามแนวของชั้นโลหะ บริเวณที่ Plasmon wave เคลื่อนที่จะอยู่ระหว่างชั้นโลหะกับไดอิเล็กทริก โดย Plasmon wave จะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของมุมตกกระทบและความยาวคลื่นตกกระทบเป็นไปตามสมการ

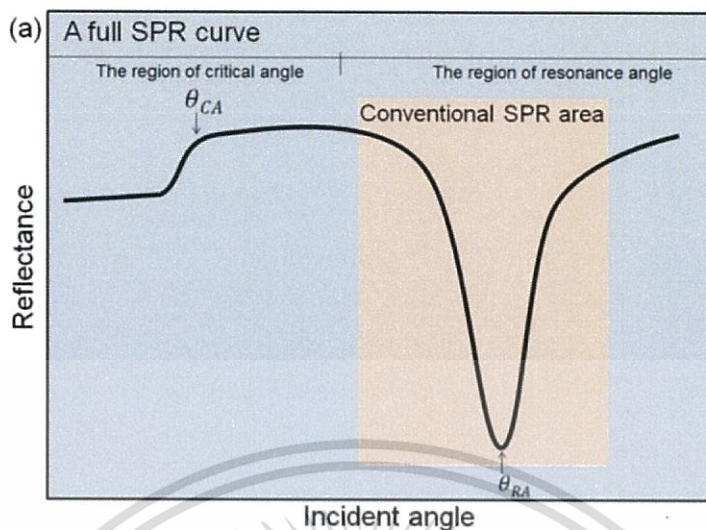
$$k_{sp} = k_x = k_0 n_p \sin \theta$$

โดย  $k_{sp}$  คือ เลขคลื่นของ Surface Plasmon wave

$k_0$  คือ เลขคลื่นของแสงตกกระทบ

$n_p$  คือ ดัชนีหักเหของปริซึม [15,16]

ภายใต้เงื่อนไขของสมการนี้ พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนที่ตกกระทบจะถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนในโลหะ ส่งผลให้เกิด Surface Plasmon wave โดยคลื่นนี้จะเป็น Transverse Magnetic mode (TM) และส่วนที่เป็น Transverse Electric mode (TE) จะถูกสะท้อนกลับออกมา ซึ่งคลื่นที่สะท้อนออกมาจะให้สเปกตรัมของแสงที่สามารถตรวจจับได้ด้วยเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสงที่มุมหนึ่ง โดยจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเฟสของโฟตอนตกกระทบตรงกับเฟส Plasmon wave



รูปที่ 2.5 ค่าการสะท้อนออกมาของแสงที่มุมต่างๆ โดย  $\theta_{RA}$  คือตำแหน่งที่เกิด Plasmon wave [4]

Dispersion relation ของ Plasmon wave สามารถเขียนได้ว่า

$$k_{sp} = k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} = k_0 n_{eff}$$

เมื่อนำ Dispersion relation นี้ร่วมกับเงื่อนไขที่สภาวะ Excited condition พบว่ามุมตกกระทบมากที่สุดของโฟตอนควรจะเป็นดังสมการ

$$\theta = \text{asin} \left( \frac{n_{eff}}{n_p} \right)$$

โดยที่

$$n_{eff} \approx \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}$$

เมื่อ  $\epsilon_m$  คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของโลหะ [17]

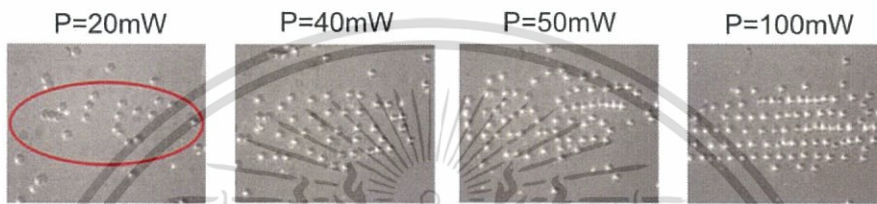
$\epsilon_d$  คือ ไดอิเล็กทริกฟังก์ชันของตัวกลางไดอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.1 การเพิ่มประสิทธิภาพ SPR เพื่อการดักจับอนุภาคไมโครเมตรด้วยโครงสร้างโลหะ

### นาโน (Nanostructure)

ปรากฏการณ์ SP สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการดักจับอนุภาคที่อยู่ในสารละลายได้โดยแผ่นฟิล์มโลหะ หากกำลังของแสงตกกระทบบมีค่าที่สูงพอจะทำให้เกิด Self-organized ของอนุภาคดังกล่าวได้ในบริเวณที่แสงตกกระทบบแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 2.6 Self-organized ของอนุภาคโพลิสไตรีนขนาด 5 ไมโครเมตร บนแผ่นฟิล์มทอง วงรีแสดง

บริเวณเลเซอร์ตกกระทบบความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร ชนิด p - polarization ด้วยมุมตกกระทบบ  $62^\circ$  [18]

การทำพื้นผิวโลหะเป็นแผ่นเล็กๆ [18-20] จะสามารถกำหนดขอบเขตของ SP ให้อยู่ในบริเวณโลหะและลดการขยายพื้นที่ของ SP ที่เพิ่มขึ้น ความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างสนามที่เพิ่มขึ้นที่จากพื้นผิวโลหะ กับพื้นผิวแบบไร้โลหะคือการเพิ่มขึ้นของ Gradient ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบซึ่งพื้นผิวโลหะออกแบบมาเพื่อสร้างศักยภาพที่มั่นคงเพื่อสามารถดักจับอนุภาคที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้

สมการของ Lippmann-Schwinger integral equation

$$E(\mathbf{r}, \omega_0) = E_0(\mathbf{r}, \omega_0) + \frac{\epsilon^2(\omega_0) - n_{\text{sur}}^2}{4\pi} \int_{\tau} \mathbf{S}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega_0) \times E(\mathbf{r}', \omega_0) d\mathbf{r}'$$

เมื่อ  $\epsilon(\omega_0)$  คือสภาพความนำไฟฟ้าของโลหะ

$n_{\text{sur}}$  คือดัชนีหักเหของสภาพแวดล้อม

อินทิกรัล  $\tau$  คือปริมาตรของโครงสร้างโลหะนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนาม Gradient ใกล้แผ่นทองคำ จะสร้าง  $F_{grad}$  ทั้งในแนวระนาบและแนวตั้งฉาก อนุภาคจะถูกดึงเข้าหาศูนย์กลางของแสงเหล่านั้น



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของแนวแรงที่กระทำต่ออนุภาคในบริเวณใกล้เคียงกับโครงสร้างโลหะแบบแผ่นงาน [18]

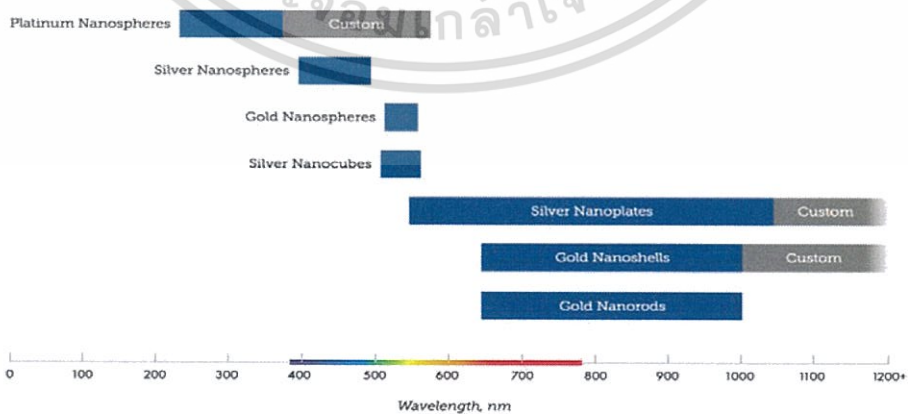
$$F_{grad} = -\nabla_R U_{grad}(R)$$

เมื่อ  $U_{grad}(R)$  เป็นฟังก์ชันของดัชนีทางแสง  $n_{bead}$  และ  $n_{sur}$  เป็นดัชนีหักเหของอนุภาคและสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ และ  $|E(r, \omega_0)|^2$  คือความเข้มสนามไฟฟ้าระยะใกล้ (electric near-field intensity) ซึ่งนิยามโดย

$$U_{grad}(R) = \frac{n_{bead}^2 - n_{sur}^2}{16\pi} \int_V dv |E(r, \omega_0)|^2$$

ค่าพลังงานบ่อศักย์จะขึ้นอยู่กัค่าความยาวคลื่นตกกระทบ  $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$

นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างนาโนซึ่งถูกสร้างด้วยนาโนเทคโนโลยีในรูปแบบต่างๆกันไป ถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานในช่วงความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่างกัน



รูปที่ 2.8 รูปแบบต่างๆของวัสดุโลหะนาโนที่นำมาใช้สร้างระบบ Surface Plasmon Resonance [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วัสดุนาโนและนาโนเทคโนโลยี (Nanomaterial and Nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยี [21-24] (Nano-technology) ถือกำเนิดขึ้นมากจากแนวคิดของ ริชาร์ด ฟายน์แมน (Richard Feynman) ซึ่งเป็นผู้เปิดความคิดเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยี นาโนเทคโนโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคของอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ( $10^9$  m.) เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กในระดับนาโนแล้วจะทำให้สมบัติต่างๆของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป

วัสดุนาโน (1-100 นาโนเมตร) มีสมบัติต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปจากจากวัสดุแบบก้อนใหญ่ (Bulk materials) ทั้งสมบัติเชิงไฟฟ้า เชิงแสง เชิงแม่เหล็ก และเชิงกล วัสดุนาโนทุกประเภทจะมีมิติทางกายภาพอย่างน้อย 1 มิติ ที่ถูกจำกัดขนาดเอาไว้ภายในระดับนาโนเมตร จึงเป็นการบีบบังคับให้อิเล็กตรอนในวัสดุสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริมาณที่จำกัดเท่านั้น จึงทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกกักขังไว้ (Quantum confinement) ปรากฏออกมาได้อย่างชัดเจน โดยที่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นได้น้อยมากในวัสดุนาโนขนาดใหญ่

### 2.2.1 สมบัติเชิงไฟฟ้า

โลหะแบบก้อนใหญ่จะมีแถบการนำ (Conduction band) ที่เกิดจากการจัดเรียงชั้นพลังงานของอะตอมอิสระที่มาประกอบกันต่อเนื่องกันไป แต่เมื่อโลหะมีขนาดอนุภาคเล็กลงไปจะทำให้ฟังก์ชันคลื่นของวาเลนซ์อิเล็กตรอนเริ่มถูกกักขังในบริเวณที่จำกัด ส่งผลให้ระดับชั้นพลังงานต่างๆถูกแยกออกเป็นชั้นเดี่ยวๆอย่างชัดเจนคล้ายระดับพลังงานของอะตอมเดี่ยว

### 2.2.2 สมบัติเชิงแสง

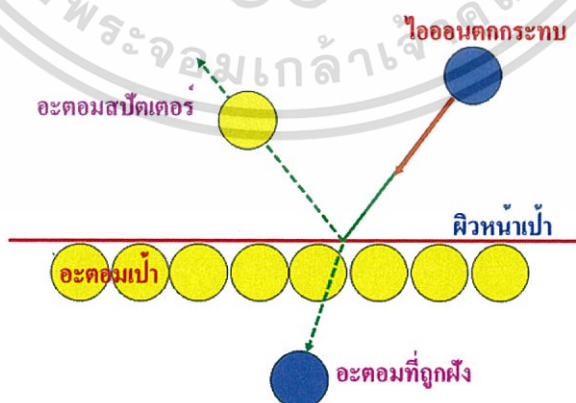
ชั้นโลหะที่มีขนาดเล็กกว่าปกติมากๆ จนมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่มาตกกระทบ ทำให้เกิดปรากฏการณ์เชิงแสง ที่เรียกว่า Surface plasmon resonance (SPR) ซึ่งส่งผลให้อนุภาคนั้นมีการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกันไปตามแต่ขนาดและรูปร่างของอนุภาคโลหะนั้น ทำให้สีที่สะท้อนออกมาเปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งต่างจากโลหะปกติส่วนใหญ่จะมีความถี่สั่นพ้อง (Resonance frequency) อยู่ในช่วงใกล้รังสี UV

### 2.2.3 สมบัติเชิงแม่เหล็ก

สมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนภายในอะตอมและลักษณะการจับตัวของอะตอมของธาตุที่ประกอบกันขึ้นเป็นสารแม่เหล็ก โดยที่บริเวณของกลุ่มอะตอมต่างๆที่มีโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic moment) หันไปในทิศทางเดียวกันเรียกว่าโดเมนแม่เหล็ก (Magnetic domain) สารที่มีสภาพเป็นแม่เหล็กจะประกอบขึ้นจากโดเมนแม่เหล็กหลายๆโดเมน เมื่อพิจารณาจากลักษณะการเรียงตัวของโดเมนแม่เหล็กจะสามารถแบ่งสารแม่เหล็กออกเป็น 3 ประเภทคือแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetic) แม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (Antiferromagnetic) และแม่เหล็กพารา (Paramagnetic) ซึ่งปกติวัสดุโลหะขนาดใหญ่บางชนิดจะไม่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็กเช่น โลหะอะลูมิเนียมแต่เมื่ออยู่ในสภาพกลุ่มก้อนอะตอมอะลูมิเนียมจำนวน 13 อะตอมที่มีขนาด 1 นาโนเมตรกลับมีสภาพเป็นสารแม่เหล็กเนื่องจากโดเมนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในอะตอมจำนวนน้อยสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย

### 2.3 กระบวนการเคลือบฟิล์มแบบสปัตเตอริง (Sputtering process)

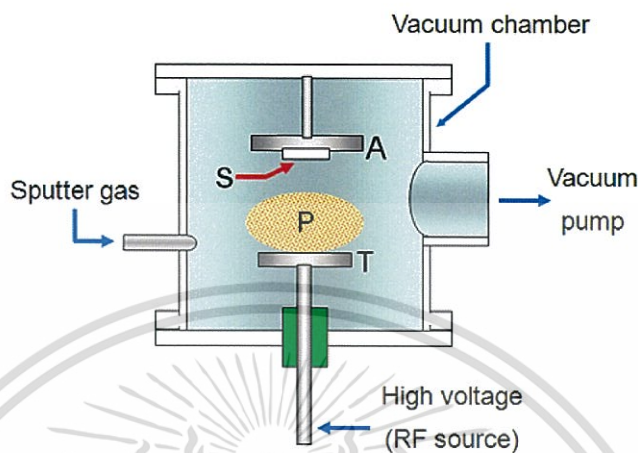
สปัตเตอริง [25,26] (Sputtering) คือกระบวนการที่ผิวของแข็งถูกระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานเช่น ไอออนที่มีความเร็ว อะตอมที่ผิวของแข็งจะถูกกระเจิงออกมาเนื่องจากการชนระหว่างอะตอมที่ผิวและอนุภาคพลังงาน ปฏิกิริยาการชนนี้เรียกว่า สปัตเตอริงกลับ (back sputtering) หรือสปัตเตอริงเชิงเดียว (simple sputtering) และอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของแข็งนี้ จะไปก่อตัวบนชิ้นงานเกิดเป็นฟิล์มบางขึ้น



รูปที่ 2.9 กระบวนการสปัตเตอริงเชิงฟิสิกส์ [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแผ่นโลหะบางถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงาน ทำให้มีอะตอมกระเจิงส่งผ่านแผ่นโลหะบางออกมา ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า สปีดเตอริง-ส่งผ่าน (Transmission sputtering)



รูปที่ 2.10 ระบบการเคลือบแบบสปีดเตอริง : A แอโนด ; T เป้า ; S ชิ้นงาน ; P พลาสมา [25]

ระบบสปีดเตอริงแบบเรียบง่ายที่สุดคือ ระบบสปีดเตอริงแบบไดโอด (Diode sputtering) ซึ่งมีองค์ประกอบง่าย ๆ คือ คู่ของขั้วไฟฟ้าแบบระนาบ โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งเป็นแคโทดเย็น (Cold cathode) และอีกขั้วหนึ่งเป็น แอโนด (Anode) ที่ผิวหน้าของแคโทดจะถูกปิดด้วยสารที่เป็นเป้าที่จะเป็นสารเคลือบ (Target) ส่วนชิ้นงานจะวางอยู่บนแอโนด ภายในห้องสปีดเตอริงจะถูกเติมด้วยแก๊สสปีดเตอริง โดยทั่วไปใช้แก๊สอาร์กอน (Ar) ที่ความดัน 0.1 Torr การโคโรดิสซาร์จะถูกรักษาไว้ภายใต้การใช้โวลเตจดีซี (DC voltage) ระหว่างขั้วไฟฟ้า ไอออน  $Ar^+$  ที่เกิดขึ้นในโคโรดิสซาร์จะถูกเร่งที่แคโทดฟอลล์ (Cathode fall) หรือ ซีท (Sheath) ไปสู่เป้าและสปีดเตอริงเป้าเป็นผลให้อะตอมเป้าหลุดออกไปสู่ชิ้นงาน และก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนชิ้นงาน ในระบบดีซีสปีดเตอริง (DC-Sputtering) เป้าจะต้องเป็นโลหะเนื่องจากโคโรดิสซาร์จหรือการไหลของกระแส จะต้องอยู่ได้ระหว่างขั้วไฟฟ้า

ด้วยการแทนที่เป้าโลหะด้วยเป้าที่เป็นฉนวนในระบบดีซีสปีดเตอริง การดีซาร์จสปีดเตอริงไม่สามารถคงไว้ได้นาน เพราะว่าจะเกิดการสร้างประจุของไอออนบริเวณด้านหน้าของเป้าฉนวน จึงต้องใช้แหล่งกำเนิดอาร์เอฟ (RF-source) กับเป้าฉนวน ระบบเช่นนี้เรียกว่า อาร์เอฟไดโอดสปีดเตอริง (RF-diode sputtering) ในระบบอาร์เอฟสปีดเตอริง ฟิล์มบางของฉนวนสามารถสร้างได้จากการสปีดเตอริงจากเป้าฉนวนโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

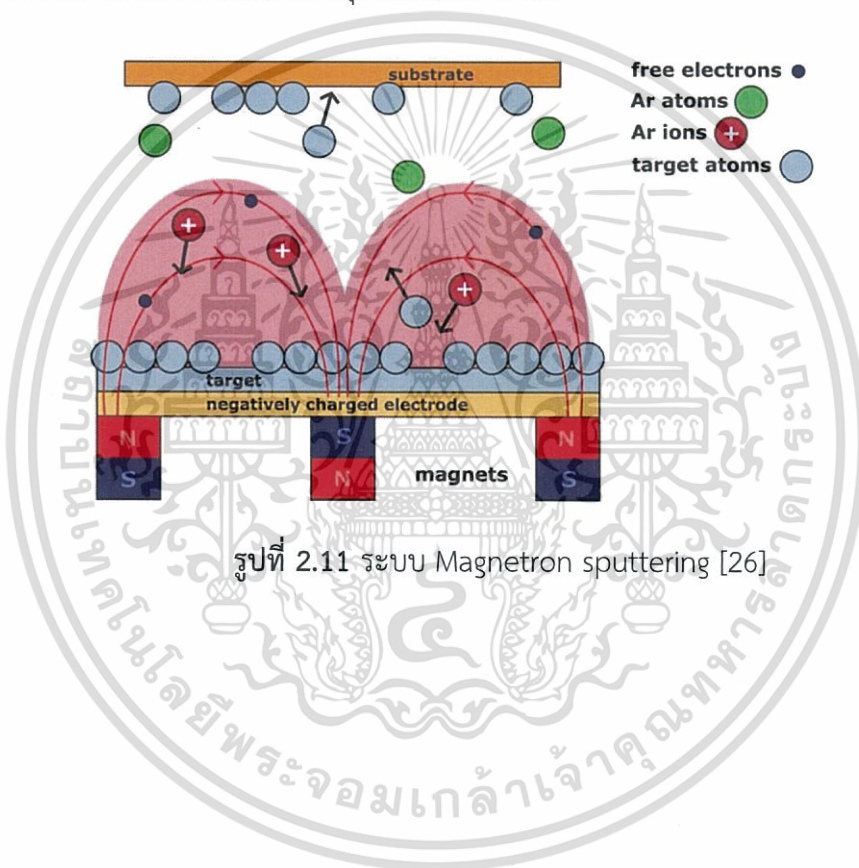
เมื่อใส่แก๊สไวกรียา เช่น ออกซิเจน ( $O_2$ ) หรือ ไนโตรเจน ( $N_2$ ) เข้าไปในห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) จะสามารถสร้างฟิล์มบางสารประกอบตระกูลออกไซด์ และไนไตรด์ได้ ระบบเช่นนี้ ถูกเรียกว่า Reactive sputtering ซึ่งจะใช้ดีซี หรือ อาร์เอฟสปีดเตอริงก็ได้

### 2.3.1 Magnetron sputtering system

ในปี ค.ศ.1936 เพนนิ่ง (Penning) ได้แนะนำการเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยการสร้างสนามแม่เหล็กบนหน้าเป้าสปีดเตอริง และถูกเรียกว่าระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง [27,28] (Magnetron sputtering system) ในปี ค.ศ. 1967 ต้นแบบของระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบระนาบสร้างขึ้นโดย วาซา (Wasa) และ แชปิน (Chapin) ได้ปรับปรุงระบบนี้อีกครั้ง สนามแม่เหล็กได้จากการเสริมคอยล์แม่เหล็กหรือแม่เหล็กถาวรเข้าไป เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขนานกับหน้าเป้าสารเคลือบ การมีสนามแม่เหล็กทำให้เพิ่มการโคจรวิดิซาร์จ สาเหตุเพราะทำให้อิเล็กตรอนมีเส้นทางการเคลื่อนที่มากขึ้น และเป็นการเคลื่อนที่แบบไซโคลลด์อล (Cycloidal motion) ในพลาสมา และศูนย์กลางของการลอยเลื่อนแบบวงโคจรอยู่ในทิศ  $E \times B$  โดยมีความเร็วลอยเลื่อน  $E/B$  เมื่อ  $E$  และ  $B$  แสดงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่เพิ่มเข้ามาในการดิซาร์จตามลำดับ สนามแม่เหล็กจัดตัวในลักษณะทำให้เส้นทางลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนเหล่านี้เป็นวงปิด ผลของการดักจับอิเล็กตรอนไว้เช่นนี้ไปเพิ่มอัตราการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของแก๊สสปีดเตอริง จากคุณสมบัตินี้ทำให้สามารถลด-ความดันแก๊สสปีดเตอริงได้ในระดับ  $10^{-4}$  Torr ซึ่งต่ำกว่าความดันปกติ  $10$  mTorr ในระบบแมกนีตรอนสปีดเตอริง สนามแม่เหล็กทำให้เพิ่มความหนาแน่นพลาสมาซึ่งทำให้เพิ่มความหนาแน่นกระแสที่เป้าแคโทด และผลลัพธ์คือ ได้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้นเนื่องจากความดันปฏิบัติการต่ำกว่าทำให้อนุภาคสปีดเตอริงเดินทางข้ามปริภูมิดิซาร์จปราศจากการชน ซึ่งผลลัพธ์คือ ได้อัตราการเคลือบสูงกว่าระบบการเคลือบที่ความดันสูงกว่า

ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จำเป็นจะต้องใช้แมกนีตรอนสปีดเตอริงแบบระนาบ หรือ สปีดเตอริงแบบระนาบ ในการโคจรวิดิซาร์จเหล่านี้ฟิล์มสปีดเตอริงจะถูกเผชิญกับโมเลกุลแก๊สสปีดเตอริงที่มีพลังงานจลน์สะท้อนกลับออกมา รวมถึงไอออนของอาร์กอนขณะโคจรวิดิซาร์จระหว่างการก่อตัวของฟิล์มบาง สาเหตุเหล่านี้ จึงทำให้ฟิล์มสปีดเตอริงมีโมเลกุลของแก๊สรวมอยู่ด้วย จึงได้มีการแนะนำระบบสปีดเตอริงโดยใช้ลำไอออนไอออนที่ชนเป้าได้มาจากแหล่งกำเนิดไอออน (Ion source) ซึ่ง แยกออกจาก

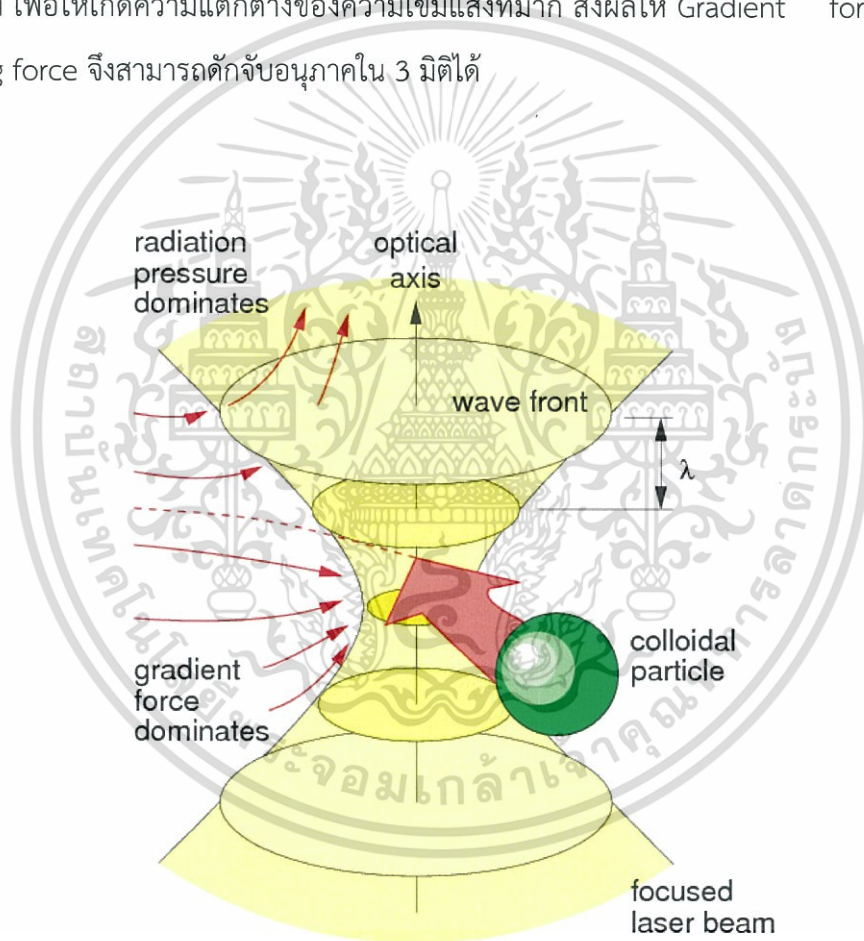
ส่วนที่เป็นห้องสุญญากาศสปัตเตอร์ริงที่วางเป้าและชิ้นงานอยู่ ดังรูป 2.10 โดยทั่วไปกระแสไอออนมีค่าประมาณ 10 ถึง 500 มิลลิแอมป์ โดยมีพลังงานไอออนจาก 0.5 ถึง 2.5 กิโลโวลต์ เนื่องจากไอออนกำเนิดในห้องดิสชาร์จซึ่งแยกออกต่างหากจากห้องสปัตเตอร์ ดังนั้นความดันปฏิบัติการในห้องสปัตเตอร์ริงสามารถลดความดันลงได้ถึง  $1 \times 10^{-5}$  mTorr ทำให้ลดปริมาณโมเลกุลแก๊สสปัตเตอร์ที่อยู่ในฟิล์มสปัตเตอร์ลงได้ ผู้บุกเบิกงานทางด้านนี้คือ โชพรา (Chopra) เขาได้แสดงการเคลือบด้วยระบบสปัตเตอร์ริงโดยใช้ลำไอออนในปี ค.ศ.1967 ถึงแม้ว่าการเคลือบโดยวิธีนี้จะไม่ใช่อย่างกว้างมากนักแต่ระบบนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการกัดแบบสปัตเตอร์ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คีมจับเชิงแสง (Optical tweezers)

Optical tweezers [29-33] เป็นเทคนิคที่ใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวดักจับ (Trap) อนุภาคขนาดเล็ก ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดย Arthur Ashkin กับ Steven Chu และที่มงาน หัวใจสำคัญของ Optical tweezers คือ การโฟกัสแสงเลเซอร์โดยเลนส์ใกล้วัตถุของกล้องจุลทรรศน์ (Microscope objective lens) ลงมาที่อนุภาค ซึ่งอนุภาคจะถูกกักไว้ที่จุดโฟกัสของเลเซอร์ โดยที่อนุภาคต้องโปร่งใส และมีดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางรอบๆ และจำเป็นที่จะต้องใช้เลนส์รวมแสงที่มีค่า Numerical aperture (NA) สูง เพื่อให้เกิดความแตกต่างของความเข้มแสงที่มาก ส่งผลให้ Gradient force มากกว่า Scattering force จึงสามารถดักจับอนุภาคใน 3 มิติได้

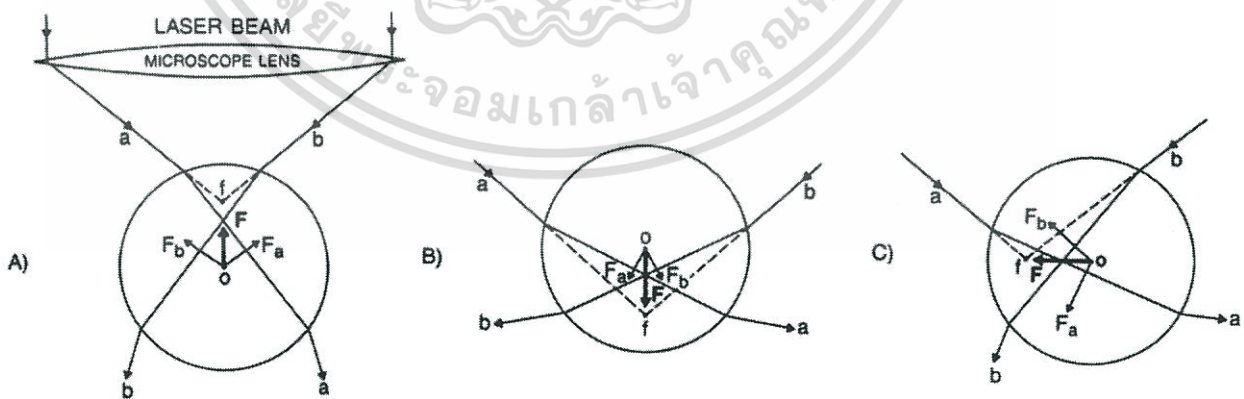


รูปที่ 2.12 จากการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆ เพื่อดักจับวัตถุขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในระบบ Optical - Tweezers [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

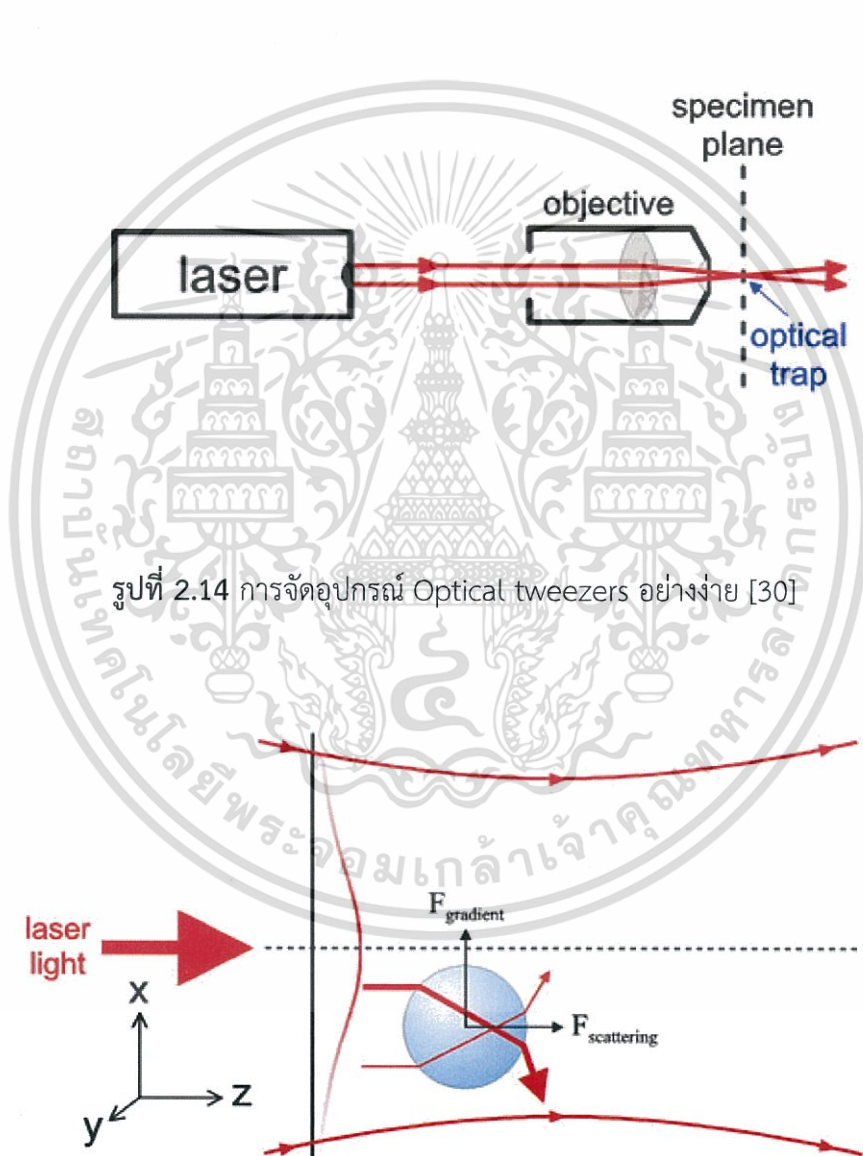
### 2.4.1 หลักการทำงานของคีมจับเชิงแสง

Optical tweezers สามารถอธิบายได้ด้วยหลัก ทศนศาสตร์เรขาคณิต (Geometrical optics) โดยใช้หลักอนุรักษ์โมเมนตัม แสงเป็นอนุภาคโฟตอนซึ่งมีโมเมนตัมเป็น  $P = \frac{h}{\lambda}$  เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอนุภาคที่มีค่าดัชนีหักเหต่างจากดัชนีหักเหของตัวกลางรอบๆอนุภาคนั้น ทำให้โมเมนตัมของแสงเกิดการหักเหไปจากแนวเดิมหลังจากผ่านอนุภาคที่ต้องการดักจับ โดยอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางของลำเลเซอร์เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) พิจารณาลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านอนุภาคทรงกลมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำดังรูป อนุภาคนี้อัตราดัชนีหักเหมากกว่าดัชนีหักเหของน้ำ ทำให้ลำแสงเลเซอร์หักเหเข้าหาจุดศูนย์กลางของอนุภาคนั้น และเมื่อพิจารณาแสงเป็นอนุภาคโฟตอน พบว่าโฟตอนที่วิ่งผ่านอนุภาคจะมีโมเมนตัมในแนวแกน Y ที่เปลี่ยนไปมีค่าเท่ากับ  $P_y$  ซึ่งทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $-y$  ด้วยแรงดล  $-P_y$  เพื่อให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมในแนวแกน Y อนุภาคจะหยุดการเคลื่อนที่เมื่อมาอยู่ในบริเวณกลางลำแสงเลเซอร์พอดี เนื่องจากบริเวณกลางลำแสงเลเซอร์เป็นจุดที่แสงจะไม่มีการหักเหเมื่อวิ่งผ่านอนุภาค แสงเลเซอร์ที่ผ่านอนุภาคที่จุดโฟกัสของ Objective lens จะมีมากกว่า 1 แนวดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 จึงต้องมีการรวมผลจากโฟตอนทุกตัวที่จะทำให้อนุภาคถูกแรงของแสงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับลำเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของลำเลเซอร์ และแรงที่กระทำในทิศทางขนานกับลำเลเซอร์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นลงไปหาจุดโฟกัส ทำให้อนุภาคถูกดักจับได้ใน 3 มิติ



รูปที่ 2.13 Gradient force ที่กระทำกับอนุภาค Mie ซึ่งจะมีแรงกระทำเข้าสู่จุดโฟกัสของเลเซอร์ [29]

การจัดอุปกรณ์ Optical tweezers อย่างง่ายแสดงในรูป โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ยิงผ่านเลนส์ ไปรวมกันเป็นจุดที่ระยะโฟกัสของเลนส์ ซึ่งจะถูกรับให้ไปตกที่อนุภาคที่ต้องการดักจับพอดี ลำแสงเลเซอร์จะมีความเข้มสูงสุดที่บริเวณกลางลำเลเซอร์ และจะมีความเข้มลดลงตามแนวรัศมี เรียกแรงที่เกิดกับอนุภาคในทิศตั้งฉากกับลำแสงว่า Gradient force และแรงที่เกิดในแนวขนานกับลำแสงเลเซอร์ว่า Scattering force



รูปที่ 2.14 การจัดอุปกรณ์ Optical tweezers อย่างง่าย [30]

รูปที่ 2.15 แรง 2 ชนิด (Scattering , Gradient) ที่เกิดขึ้นเมื่อลำเลเซอร์เคลื่อนที่ผ่านอนุภาค [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

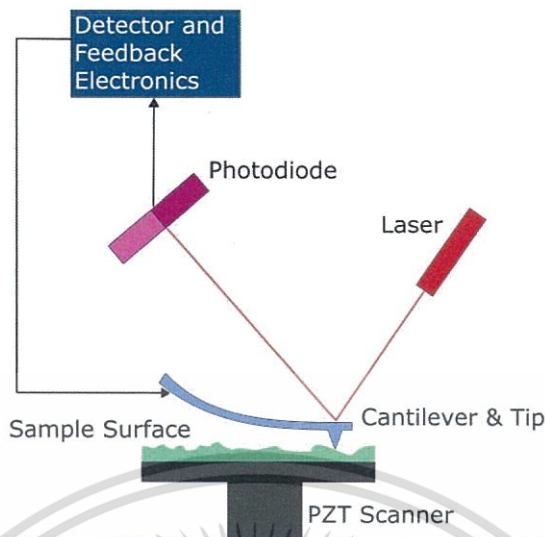
## 2.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope) หรือ AFM [34] เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) ชนิดหนึ่ง AFM มีหลักการทำงานโดยการใช้หัวอ่านซึ่งเป็นเข็มขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร เป็นตัววัดแรงดึงดูดหรือแรงผลักรที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นภาพ โดยเมื่อกดหัวอ่านลงบนพื้นผิวที่จะตรวจวัด จะเกิดแรงที่กระทำต่อก้าน (Cantilever) ของหัวอ่าน จะทำให้หัวอ่านเอียงด้วยมุมต่างๆ กันตามสภาพความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปยังก้านของหัวอ่าน จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบได้ โดย AFM มีความสามารถพิเศษคือสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลายทั้งที่เป็นฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้าได้ และมีระดับความสูงต่ำ (Roughness)

### 2.5.1 คุณสมบัติการใช้งานของ AFM

1. วิเคราะห์พื้นผิวโลหะ เพื่อดูลักษณะพื้นผิวและความขรุขระ
2. วิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบาง เพื่อดูความขรุขระ และการกระจายตัวของสารเคลือบผิวฟิล์มบาง
3. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างทางด้านชีวภาพ เช่น ลักษณะของตัวอย่างดีเอ็นเอเมื่อมีการนำสารพวกพอลิเมอร์เข้าไปผสม หรือดูลักษณะของเซลล์แบคทีเรีย เป็นต้น
4. วิเคราะห์ความหนาของแผ่นฟิล์ม หรือวิเคราะห์ความลึกของรอยตำหนิที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น วิเคราะห์ความลึกของสารเคลือบบนแว่นตา วิเคราะห์ความหนาของสารเคลือบฟิล์มในระดับนาโนเมตรของกระจกรถยนต์ เป็นต้น
5. วิเคราะห์ลักษณะของสนามแม่เหล็กบนแผ่นฮาร์ดดิสก์ หรือเครื่องบันทึกข้อมูลที่ใช้แถบแม่เหล็กต่างๆ
6. วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคนาโนชนิดต่างๆ ที่เคลือบเกาะบนผิวของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคไททานเนียมนาโนบนผิวของกระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ เป็นต้น
7. วิเคราะห์ดูการกระจายตัวของสารหลายๆ ชนิดที่รวมตัว หรือกระจายตัวกันอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยสารพอลิเมอร์หลายๆชนิด จะสามารถเห็นการรวมตัวหรือการกระจายตัวกันของสารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

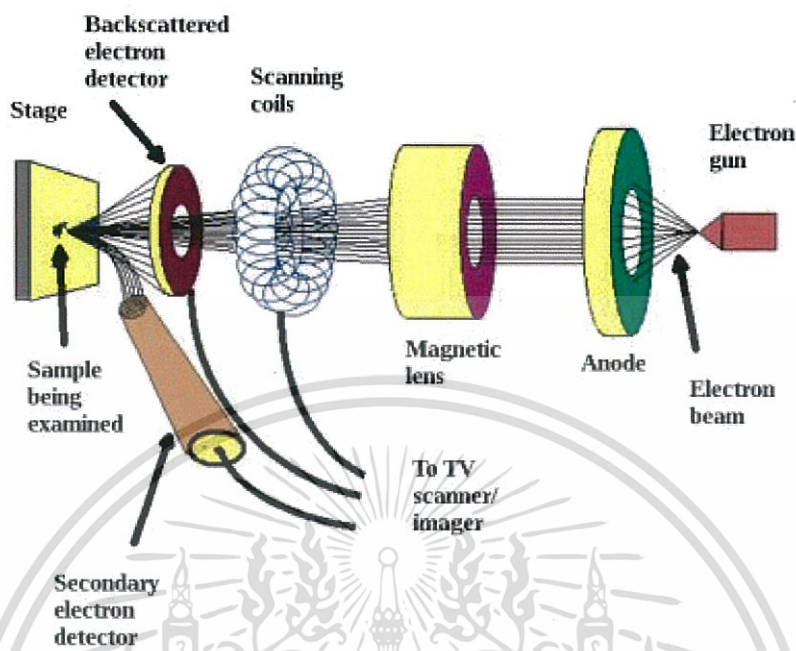


รูปที่ 2.16 การทำงานของระบบ AFM [34]

## 2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM [35] ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กความเข้มสูงบีบอัดเพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอ

### Scanning electron microscope block diagram



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของระบบ SEM [35]

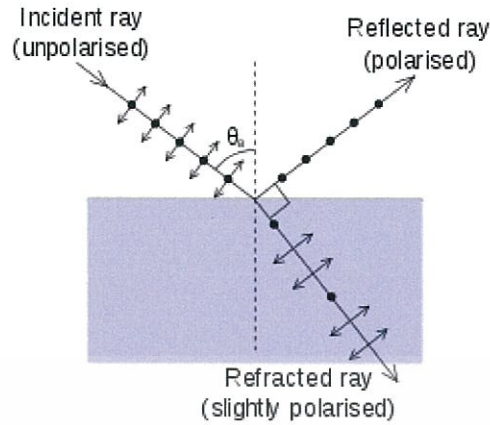
#### 2.6.1 คุณสมบัติการใช้งานของ SEM

1. ใช้ศึกษาลักษณะภายนอกของวัสดุขนาดเล็กในระดับมิลลิเมตรถึงนาโนเมตร
2. ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุ

#### 2.7 การเกิดโพลาไรซ์ของแสงโดยการสะท้อน (Brewster's angle)

การโพลาไรซ์โดยการสะท้อน หรือ ปรากฏการณ์ Fresnel Diffraction [36,37] ที่แสงเดินทางมาตกกระทบบนพื้นผิววัตถุที่มีดัชนีหักเหไม่เท่ากันแล้วแสงบางส่วนถูกสะท้อนออกไปและบางส่วนจะหักเหผ่านเข้าไปในวัตถุนั้นๆ แสงที่ถูกหักเหออกไปนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นแสงโพลาไรซ์เมื่อ มุมระหว่างเวกเตอร์แสงสะท้อนกับมุมเวกเตอร์แสงที่หักเหเข้าไปในวัตถุแล้วมีค่าเท่ากับ  $90$  องศา เรียกมุมตกกระทบบที่ทำให้เกิดเงื่อนไขนี้ว่า มุม Brewster

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ระนาบแสงตกกระทบบระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่ทำให้เกิดการโพลาไรซ์ด้วยมุม Brewster [37]

จากรูปสามารถพิจารณาได้ว่า แสงสะท้อนและแสงหักเหจะเกิดการโพลาไรซ์ได้ก็ต่อเมื่อ

$$\theta_r + \theta_t = 90^\circ$$

ส่งผลให้

$$\theta_r = \theta_i$$

เมื่อ  $\theta_r$  เป็น มุมสะท้อน

$\theta_i$  เป็น มุมตกกระทบ

$\theta_t$  เป็น มุมหักเห

หมายความว่าแสงสะท้อนจะเกิดโพลาไรซ์ชนิด S (S-polarized) และแสงหักเหจะเกิดโพลาไรซ์ชนิด P (P-polarized) ได้ดีที่สุดในมุมแสงตกกระทบบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนพอดี ทำให้แสงสะท้อนและแสงหักเหกลายเป็นแสงโพลาไรซ์ 100 %

เรียกมุมตกกระทบบ ( $\theta_i$ ) ที่ทำให้เกิดเงื่อนไขนี้ว่ามุม Brewster ( $\theta_B$ )

$$\tan\theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

เมื่อ  $n_1$  เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1

$n_2$  เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยของโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษา การดักจับ (Trapping) อนุภาคขนาดไมโครเมตร โดยใช้หลักการ Surface Plasmon Resonance (SPR) ร่วมกับระบบทัศนศาสตร์ (Optical system) โดยใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์ของระบบ Optical tweezers สำหรับการสังเกตการณ์และบันทึกภาพการดักจับอนุภาค เพื่อทดสอบสมมติฐานการเกิดปรากฏการณ์ SPR ของแต่ละตัวอย่างฟิล์มแบ่งการดำเนินงานออกเป็น ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างฟิล์มโลหะเงินและโลหะทอง

ขั้นตอนที่ 2 ทดลองหามุมลำแสงตกกระทบที่เหมาะสมในการเกิดปรากฏการณ์ SPR

โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนดังนี้

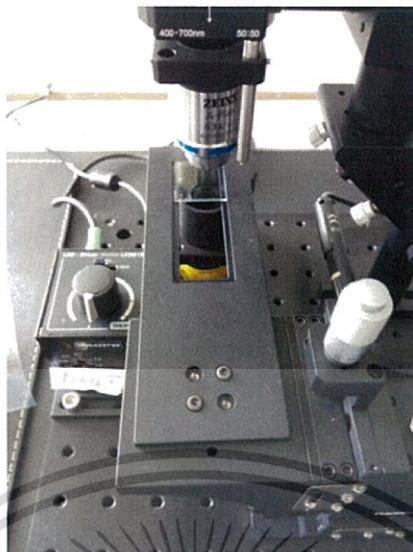
#### 3.1 การเตรียมตัวอย่างฟิล์มโลหะเงินและโลหะทอง

ในโครงการขั้นนี้ ได้เลือกใช้แผ่นกระจกแก้วสำหรับกล้องจุลทรรศน์ (Glass slide) ขนาด 75x25 mm. ซึ่งเป็นแก้วชนิด Borosilicate Glass (BSG) หนา 1 มิลลิเมตร เป็นแผ่นวัสดุที่จะนำไปเคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering process)



รูปที่ 3.1 แผ่นกระจก BSG ขนาด 75x25 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แท่นวางแผ่นกระจกสไลด์ (Microscope stage)

เนื่องจากฐานวางแผ่นกระจกสไลด์ (Stage Microscope) ของอุปกรณ์ Optical tweezers สามารถปรับเลื่อนในแนวแกน X และ Y ได้เพียงเล็กน้อย ส่งผลให้การศึกษาสารตัวอย่างจากระบบกล้องจุลทรรศน์ของอุปกรณ์มีจุดศูนย์กลางของขอบเขตการมองเห็นที่บริเวณ 1.3 cm. เท่านั้น ในโครงการนี้จึงใช้วิธีตัดขนาดของแผ่นกระจกแต่ละแผ่นเป็นขนาด 25x25 มิลลิเมตรสำหรับกระจก BSG ในการปลูกฟิล์มบางโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง



รูปที่ 3.3 แผ่น BSG ที่ตัดแล้วขนาด 25x25 mm. เทียบกับขนาดก่อนตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ตัดแล้วมาล้างโดยเครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) 3 ครั้ง ด้วยสารละลายอะซิโตน (Acetone) เป็นเวลา 5-10 นาที จากนั้นเปลี่ยนเป็นสาร เมทานอล (Methanol) ล้าง 5-10 นาทีเช่นเดิม แล้วล้างครั้งสุดท้ายด้วยน้ำปลอดประจุ (De-ionized water) 5-10 นาที แล้วใช้ลมร้อนเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.4 สารที่ใช้ในการล้างกระจกด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก 3 ครั้งโดยเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา

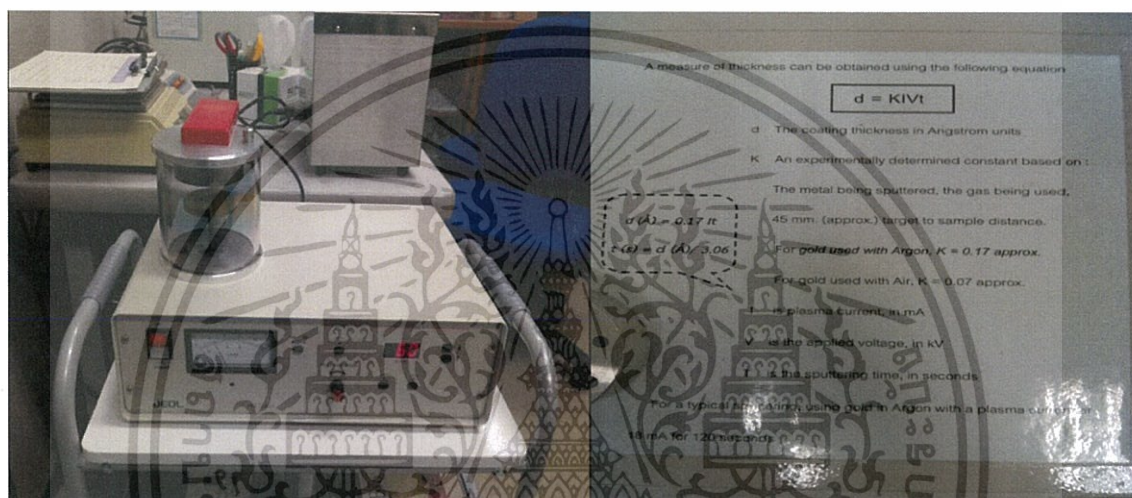


รูปที่ 3.5 (ซ้าย) แผ่นกระจกที่ใส่ร่วมกับสารทำความสะอาดในบีกเกอร์ ,(ขวา) เครื่องล้างอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การเตรียมฟิล์มโลหะทอง

ในการเตรียมตัวอย่างฟิล์มโลหะทองจะใช้ฟิล์มที่สร้างด้วยระบบ DC-Sputtering ด้วยเครื่อง JEOL JFC-1200 Fine Coater ที่สภาวะความดันคงที่  $1 \times 10^{-1}$  mbar และกระแส Discharge คงที่ 18mA ด้วยเป้าทองคำบริสุทธิ์ Ag 99.999% โดยใช้ระยะเวลาต่าง ๆ กันให้อัตราการก่อตัวของชั้นฟิล์มเท่ากับ 3.06 อังสตรอมต่อวินาที ซึ่งมีขนาดความหนาของฟิล์มโดยเฉลี่ย 3 ขนาด คือ 25 , 50 , 75 นาโนเมตร



รูปที่ 3.6 (ซ้าย) ลักษณะของเครื่อง DC-Sputtering JEOL JFC-1200 Fine Coater, (ขวา) รายละเอียดความสามารถของเครื่อง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบความหนาของฟิล์ม สามารถคำนวณจากสมการ

$$t(s) = \frac{d}{0.306}$$

โดยที่  $t$  คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)

$d$  คือ ความหนาของฟิล์ม (นาโนเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การเตรียมฟิล์มโลหะเงิน



รูปที่ 3.7 DC-Sputtering system

เป้าสเปตเตอร์ (Target) ที่ต้องการใช้เคลือบฟิล์มจะใช้เป้าโลหะเงินบริสุทธิ์ Ag 99.99% แผ่นจานกลมขนาด 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว



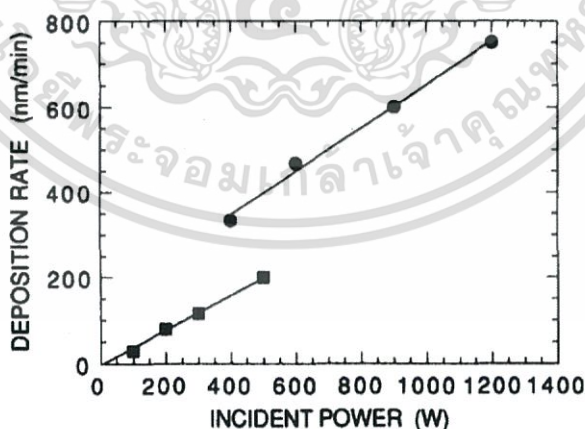
รูปที่ 3.8 คุณสมบัติของเป้าโลหะเงิน (Silver Target) สำหรับ Sputter ที่ต้องการใช้ปลูกฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ลักษณะของแผ่นเป้าโลหะเงิน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว

โดยเครื่อง DC-Sputtering นี้จำเป็นที่จะต้องหาอัตราการก่อตัวของชั้นฟิล์มต่อหน่วยเวลา ก่อน เพื่อให้สามารถนำมาคำนวณความหนาของฟิล์มที่ต้องการได้ จึงได้ใช้อ้างอิงจากงานวิจัย Silver thin films deposited by magnetron sputtering [27] มาเป็นตัวเปรียบเทียบตั้งต้นเพื่อใช้ในการทดลองหาสภาวะการเคลือบฟิล์มโลหะเงินให้ได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.10 กราฟอัตราการก่อตัวของฟิล์มโลหะเงินต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้รักษากระแส Discharge ภายใต้สภาวะความดัน  $2 \times 10^{-2}$  mbar โดยวงกลมเป็น DC-Sputtering mode และ สี่เหลี่ยมเป็น RF-Sputtering Mode

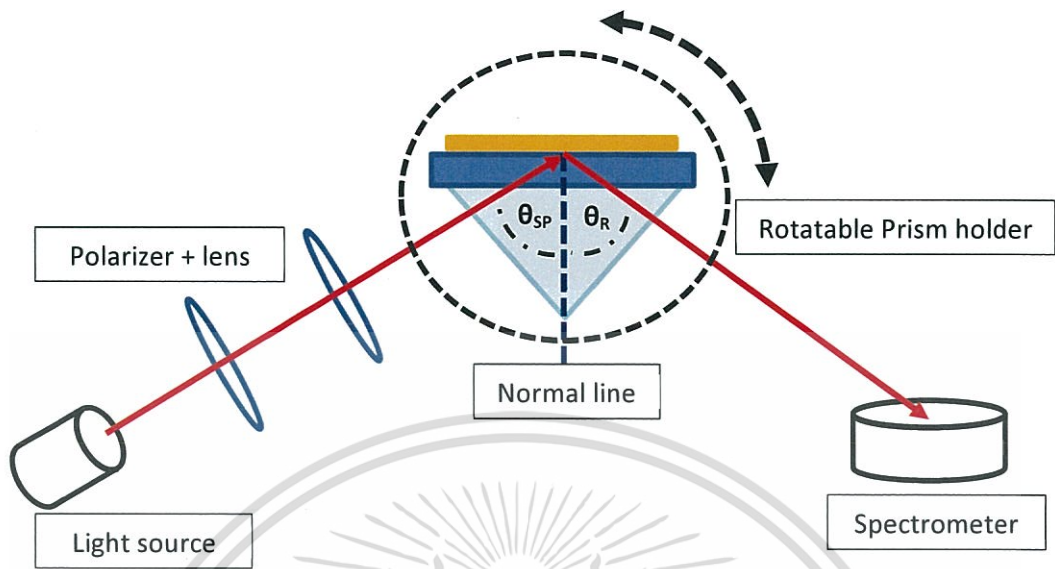
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติด้านความหนาของฟิล์ม

การตรวจสอบความหนาของฟิล์มโลหะเงินจะใช้วิธีการตรวจเช็คด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้การวิเคราะห์ฟิล์มบน Substrate ที่สามารถนำไฟฟ้าได้จึงต้องใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงินลงบนแผ่นซิลิกอน (Silicon) ร่วมไปพร้อมกันในขณะที่เคลือบบนกระจก เพื่อที่จะสามารถนำแผ่นซิลิกอนซึ่งทดลองเคลือบฟิล์มโลหะเงินด้วยสภาวะต่างๆไปวิเคราะห์ความหนาด้วย SEM ได้ ในส่วนฟิล์มโลหะทองจะเป็นการเคลือบบนกระจกเพียงอย่างเดียวเนื่องจากสามารถเคลือบขึ้นงานออกมาให้ได้ความหนาที่ต้องการได้จากระบบที่ถูกตั้งสภาวะไว้คงที่ ซึ่งคำนวณได้โดยตรงจากสมการดังที่ได้กล่าวไป จึงไม่จำเป็นที่จะต้องเคลือบลงบนแผ่นซิลิกอนเพื่อไปวิเคราะห์ความหนาด้วย SEM อีก

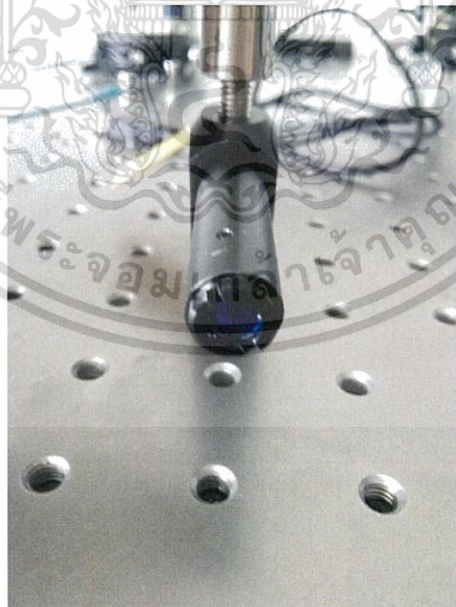
### 3.2 ทดลองหามุมลำแสงตกกระทบที่เหมาะสมในการเกิดปรากฏการณ์ SPR

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดลองโดยนำแผ่นแก้ว BSG ที่ได้ผ่านกระบวนการปลูกฟิล์มบางโลหะเรียบร้อยแล้วมาติดตั้งลงในระบบทดลอง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ให้แสงย่านสีแดง กำลัง 8 mW. ส่องกระทบปริซึมแก้ว BK-7 ที่ประกบติดอยู่กับแผ่นสไลด์ที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มมาแล้ว ซึ่งมีน้ำมัน Immersion oil ที่มีค่าดัชนีหักเห 1.52 เป็นตัวกลางประสานดัชนีหักเหของแก้วปริซึมกับแผ่นสไลด์ที่เคลือบฟิล์ม จากนั้นจะทดลองหามุมปรับค่ามุมตกกระทบของลำแสงที่ส่องเข้ากระทบแผ่นฟิล์มบางโลหะ วัดค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาจากปริซึมด้วย Spectrometer นำมาสร้างกราฟเพื่อหาค่ามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ SPR เรียกว่ามุม  $\theta_{sp}$  ซึ่งที่มุมดังกล่าวจะทำให้พลังงานโฟตอนถูกฟิล์มบางโลหะดูดซับแล้วแปรเปลี่ยนไปเป็น Plasmon wave ได้ดีที่สุด ทำให้ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับออกมามีค่าต่ำมาก



รูปที่ 3.11 ระบบทดสอบเพื่อวัดมุม  $\theta_{sp}$  ด้วย Spectrometer

ส่วนของแหล่งกำเนิดแสงจะใช้เป็นเลเซอร์ไดโอด (Laser diode) สีแดง ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ให้กำลังแสง 8 mW. ซึ่งเป็นแสงเลเซอร์ที่มีการโพลาไรซ์ (Polarized) ด้วยเลนส์ภายในระบบ และมีความยาวโฟกัสของลำเลเซอร์ที่ระยะ 3.2 เซนติเมตร มีลักษณะดังรูป



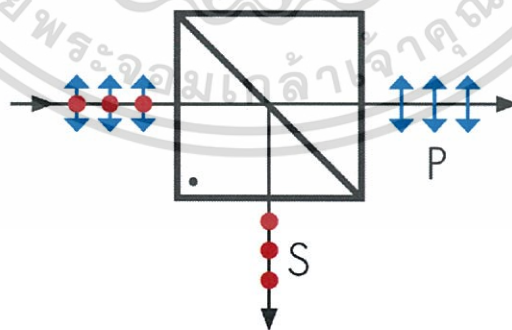
รูปที่ 3.12 ภาพเลเซอร์ไดโอดด้านหน้า ที่ใส่อยู่กับแท่นวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



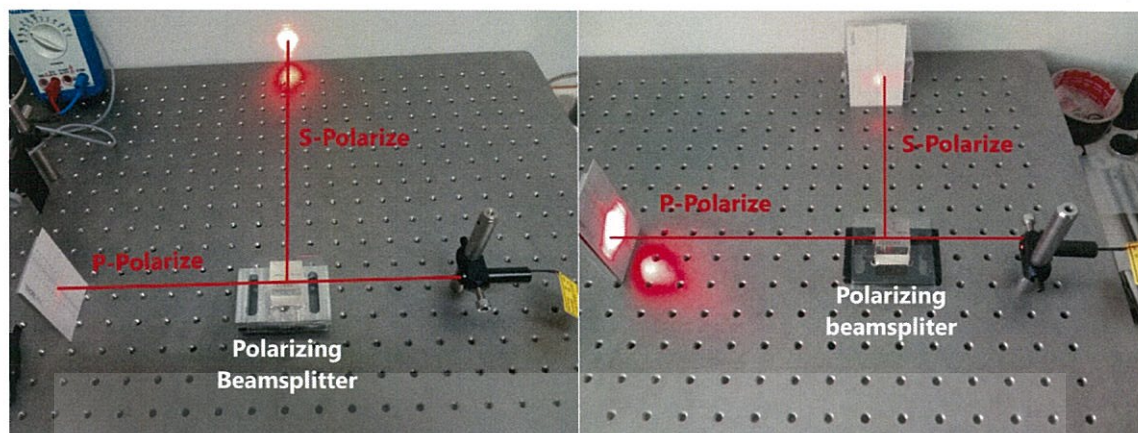
รูปที่ 3.13 (ซ้าย) ภาพเลเซอร์ไดโอดด้านข้าง , (ขวา) คุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด

เลเซอร์ไดโอดดังกล่าวให้แสงที่เป็นโพลาไรซ์มาแล้วซึ่งสามารถปรับชนิดแสงโพลาไรซ์ได้โดยการปรับหมุนตัวครอบเลเซอร์ทั้งชิ้นทำให้ในการทดลองจึงไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นโพลาไรซ์ (Polaroid) เพื่อสร้างแสงโพลาไรซ์อีก และยังทำให้สามารถจัดแสง (Alignment) ให้เป็นแสงตกกระทบบนชนิด P-polarized ที่มีงานวิจัยว่าให้ผล SP ได้ดีที่สุดด้วยการใช้ผลึกโพลาไรซ์บีมสปลิตเตอร์ (Polarizing Beam splitter) ซึ่งอาศัยหลักการโพลาไรซ์โดยการสะท้อน (Birefringent) ที่จะทำให้แสงที่ส่องผ่านแนวสะท้อนเป็นแสงชนิด P-polarized เสมอ ส่วนแสงที่สะท้อนออกจากแนวสะท้อนจะทำมุมกับแนวแสงส่องผ่านเป็นมุม 90 องศาพอดี ทำให้ได้ลำแสงสะท้อนเป็นแสงชนิด S-polarized เสมอ



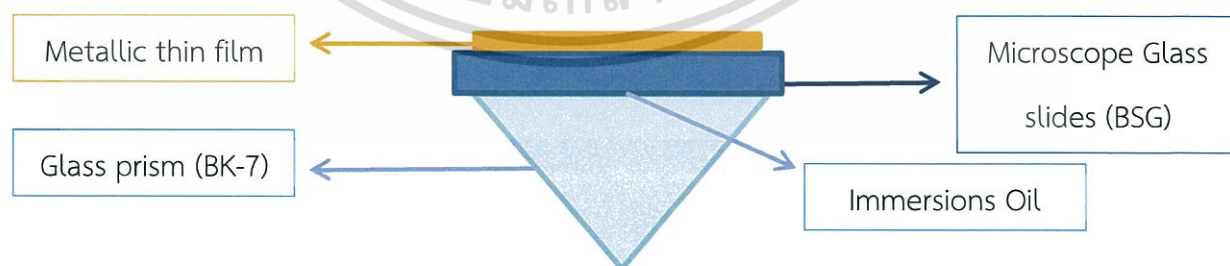
รูปที่ 3.14 ภาพการเกิดแสงโพลาไรซ์จากผลึก Polarizing Beam splitter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 (ซ้าย) ภาพขณะจัดแสงเลเซอร์เป็นแสง S-polarized เข้ม ,(ขวา) ภาพขณะจัดแสงเลเซอร์เป็นแสง P-polarized เข้ม

ส่วนที่ใช้วางตัวอย่างฟิล์มจะเป็นการจัดอุปกรณ์ในรูปแบบชุดกระตุ้นแบบ Kretschmann-Raether configuration โดยใช้ Glass prism BK-7 ทำหน้าที่หักเหคลื่นแสงที่ส่องเข้าไปให้เกิดการกระจายออกของเฟส เป็นแท่นรองติดกับแผ่นแก้ว BSG ซึ่งมีแผ่นฟิล์มบางโลหะอยู่ที่ผิวหน้า และใช้น้ำมัน Immersions oil สำหรับใช้กับ Objective lens ของกล้องจุลทรรศน์ทั่วไปเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อชั้นหักเหระหว่างแก้วปริซึมกับแก้วสไลด์ BSG ที่เคลือบฟิล์มโลหะเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของแสงในบริเวณรอยต่อดังรูป



รูปที่ 3.16 ลักษณะการวางแผ่นสไลด์ฟิล์มบนปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ลักษณะของ Rotatable Prism holder และ BK7 Prism

ตัวอย่างฟิล์มจำเป็นที่จะต้องมีช่องสำหรับใส่สารละลายด้านหน้าฟิล์มเพื่อให้ของเหลวได้สัมผัสกับผิวฟิล์มขณะทดลอง จึงได้ใช้แผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride ; PVC) แบบใสมาปิดทับด้านหน้าฟิล์มซึ่งใช้เทปโฟมกาวสองหน้าเนกประสงค์เป็นตัวยึดและสร้างช่องว่างระหว่างผิวฟิล์มกับแผ่นพลาสติกได้มากพอที่จะใส่สารละลายลงไปได้ ดังรูป



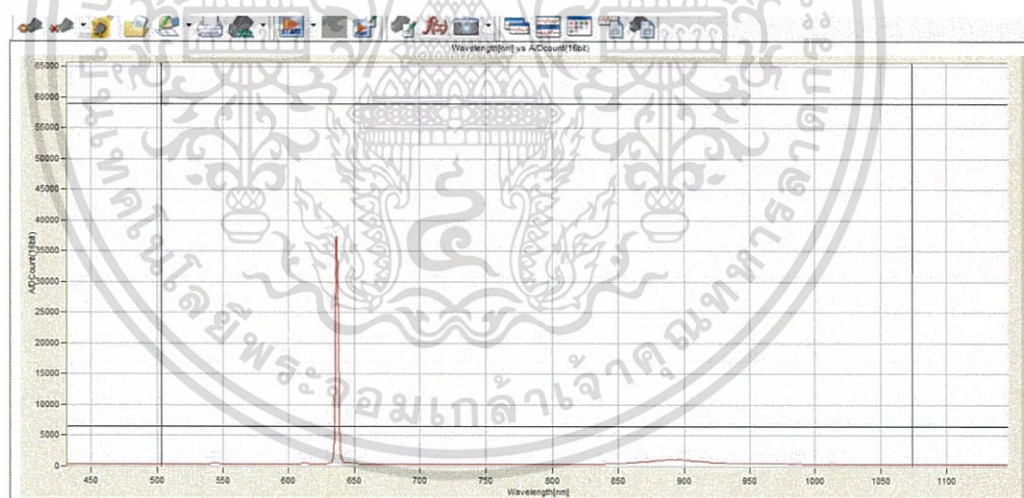
รูปที่ 3.18 ลักษณะการติดแผ่นพลาสติกด้วยเทปโฟมกาวสองหน้าเนกประสงค์เพื่อทำช่องใส่สารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่วนสุดท้ายจะเป็นเซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง ซึ่งใช้เป็น Spectrometer ที่สามารถวัดค่าความเข้มแสงออกมาเป็นกราฟแกนตั้งมีค่าเป็น A/D Count (16bit) ต่อแกนนอนที่เป็นค่าความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร ซึ่งจะแสดงผลด้วยการเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์และไดรฟ์เวอร์



รูปที่ 3.19 ลักษณะภายนอกของ Spectrometer sensor



รูปที่ 3.20 ลักษณะของกราฟที่บันทึกค่าได้เมื่อใช้วัดแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร

Spectrometer นี้สามารถบันทึกค่าเป็นไฟล์ไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft Excel) ได้เป็นค่าความเข้มแสงที่อ่านได้ต่อพิกเซล (Pixel) และสามารถเปลี่ยนเป็น ต่อความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตรได้

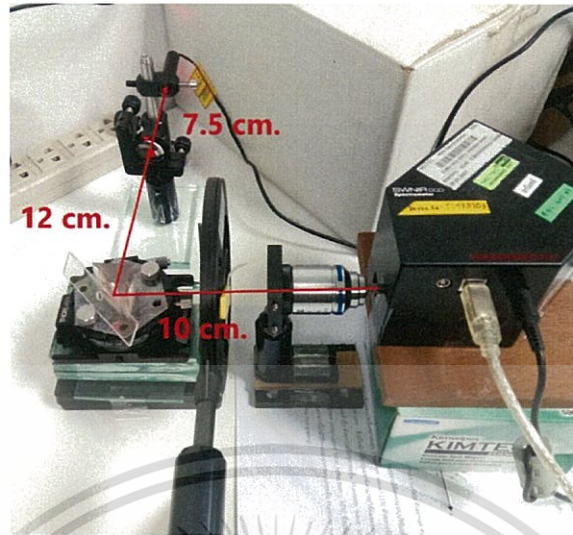
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	Wavelength	Average																				
2	432.106	364.31	361	366	372	366	371	369	366	363	361	364	370	360	375	354	374	370	374	365		
3	433.037	372.77	370	377	357	371	387	374	366	364	368	380	355	371	384	369	376	377	370	365		
4	433.967	365.53	371	368	367	370	369	369	369	362	368	364	338	371	368	358	368	366	371	379		
5	434.895	364.77	375	358	359	375	360	379	368	368	370	356	349	378	373	374	365	368	362	370		
6	435.822	365.19	369	374	370	365	372	366	353	373	368	371	351	363	367	371	376	355	357	358		
7	436.748	363.64	364	366	352	368	369	358	378	370	366	358	340	370	369	356	366	371	357	366		
8	437.673	365.52	365	369	367	368	354	370	359	366	371	369	355	371	366	348	379	354	362	371		
9	438.596	365.54	360	368	365	359	363	353	355	373	366	365	351	365	360	385	371	369	370	359		
10	439.518	365.76	369	368	365	358	367	380	366	370	373	355	350	358	376	367	373	364	372	371		
11	440.439	365.67	365	360	380	370	376	372	368	350	362	361	367	359	352	359	376	378	366	366		
12	441.359	374.08	376	367	374	380	368	378	366	389	377	357	364	375	365	388	388	381	382	390		
13	442.277	365.69	362	361	361	366	370	361	369	362	369	358	369	367	361	368	374	358	356	367		
14	443.195	364.49	367	368	359	352	383	359	358	366	367	358	375	358	359	352	361	359	363	374		
15	444.111	367.01	355	368	378	368	367	365	368	367	371	356	364	372	364	372	353	369	361	371		
16	445.026	373.08	376	363	367	365	378	387	369	363	378	373	372	382	365	374	368	374	373	376		
17	445.939	371.26	372	364	372	377	368	367	374	374	381	369	369	371	357	368	356	370	364	368		
18	446.852	369.25	373	371	366	384	377	371	372	377	379	373	379	376	362	366	364	377	358	380		
19	447.763	368.24	366	369	366	371	359	366	393	384	365	366	372	367	350	370	382	358	354	373		
20	448.673	369.33	343	362	363	370	374	373	371	369	372	374	365	375	371	367	385	374	367	364		
21	449.582	364.41	363	369	374	371	367	360	369	366	359	361	364	369	354	374	375	383	350	368		
22	450.489	368.3	374	371	354	380	365	369	360	371	374	370	354	374	362	357	367	379	359	365		
23	451.396	369.32	373	372	369	370	363	367	380	361	382	377	366	368	373	366	353	374	355	393		
24	452.301	368.66	366	368	360	369	364	363	357	369	370	378	371	376	363	365	369	382	373	371		
25	453.205	371.32	375	373	372	370	392	381	381	374	365	376	366	374	357	369	360	369	371	373		

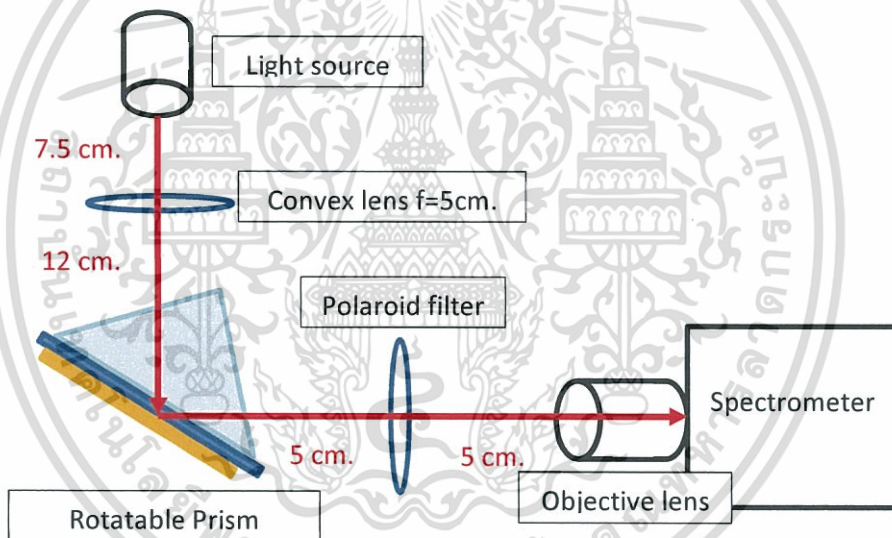
รูปที่ 3.21 ไฟล์ข้อมูล Excel ที่บันทึกค่าได้จากซอฟต์แวร์ของ Spectrometer

ค่าที่วัดได้ต่อความยาวคลื่นดังรูปข้างต้นจะเป็นค่าที่มีแสงมาตกกระทบบตำแหน่งเซ็นเซอร์แต่ละพิกเซลที่วางเรียงเป็น Array ซึ่งแต่ละพิกเซลจะถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งของความยาวคลื่นเดิมเสมอจากการจัดระบบแสงภายใน Spectrometer ซึ่งผ่านการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration) มาแล้ว ทำให้ในขณะทดลองโดยใช้เลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ความเข้มแสงสูงสุดที่วัดได้จะอยู่ในบริเวณตำแหน่งพิกเซลเดิมเสมอ คือในช่วงพิกเซลตำแหน่ง 248-253 อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 635.538 - 639.345 นาโนเมตร

เมื่อนำอุปกรณ์ทุกส่วนมาจัดวางรวมกันแล้วผลที่เกิดขึ้นคือค่าที่วัดได้โดย Spectrometer ดังกล่าวมีค่าความเข้มสูงเกินที่เซ็นเซอร์จะอ่านได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มแผ่นโพลาไรด์ (Polaroid) มาเป็นฟิลเตอร์ (Filter) ลดทอนความเข้มแสงก่อนเข้าสู่ Objective lens ที่ทำหน้าที่รวมแสงเข้าตัวเซ็นเซอร์ จึงได้รูปแบบการจัดอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 3.22 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 3.23 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในระบบทดลอง

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆ [16,38]

วัสดุ (Material)	$n$	$\epsilon$	$k$
แก้ว BK7	1.5150	2.2953	$1.2164 \times 10^{-8}$
แก้ว Borosilicate (BSG)	1.5179	2.3041	$2.9406 \times 10^{-8}$
น้ำปลอดประจุ (De-ionized water)	1.3316	1.7732	$1.4900 \times 10^{-8}$
โลหะเงิน	0.055738	-18.427	4.2931
โลหะทอง	0.18016	-11.892	3.4531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะแบ่งการรายงานผลการทดลองออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

#### 4.1 ผลการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะ

##### 4.1.1 ผลการเตรียมฟิล์มโลหะทอง

##### 4.1.2 ผลการเตรียมฟิล์มโลหะเงิน

#### 4.2 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR

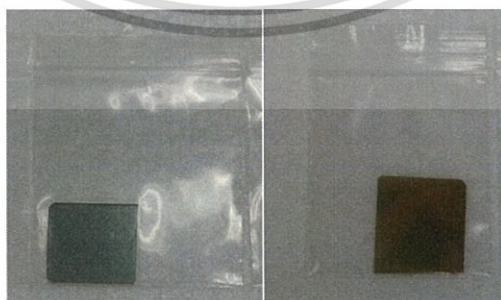
##### 4.2.1 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะทอง

##### 4.2.2 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะเงิน

#### 4.3 ปัญหาในการประยุกต์ใช้ SPR กับ Optical tweezers

#### 4.1 ผลการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะ

การเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะ จะเตรียมแบบเคลือบเป็นแผ่นเต็มพื้นที่ของแผ่นกระจกด้วยวิธี DC-Sputtering ด้วยเครื่อง Fine coat สำหรับฟิล์มโลหะทอง และเครื่อง Sputtering and Evaporator สำหรับฟิล์มโลหะเงิน



รูปที่ 4.1 (ซ้าย) ลักษณะของฟิล์ม โลหะเงินบน BSG ขนาด 25x25 มิลลิเมตร (ขวา) และฟิล์มโลหะทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ผลการเตรียมฟิล์มโลหะทอง

การเตรียมฟิล์มบางโลหะทอง จะใช้การปลูกลงบน Borosilicate Glass (BSG) ขนาด 25x25 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง JEOL JFC-1200 Fine Coater ดังรูปที่ 3.6

สามารถคำนวณความหนาที่ต้องการได้จากสมการ

$$t(s) = \frac{d}{0.306}$$

โดยที่  $t$  คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)

$d$  คือ ความหนาของฟิล์ม (นาโนเมตร)

ตารางที่ 4.1 เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางโลหะทองภายใต้สภาวะความดันคงที่  $1 \times 10^{-1}$  mbar และ กระแส Discharge คงที่ 18 mA.

ความหนาฟิล์มทองโดยเฉลี่ย (นาโนเมตร)	25	50	75
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (วินาที)	81	163	245



รูปที่ 4.2 ฟิล์มโลหะทองบน Borosilicate ขนาด 25x25 มิลลิเมตร ที่มีความหนา 25 (แถวซ้าย) , 50 (แถวกลาง), 75 (แถวขวา) นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

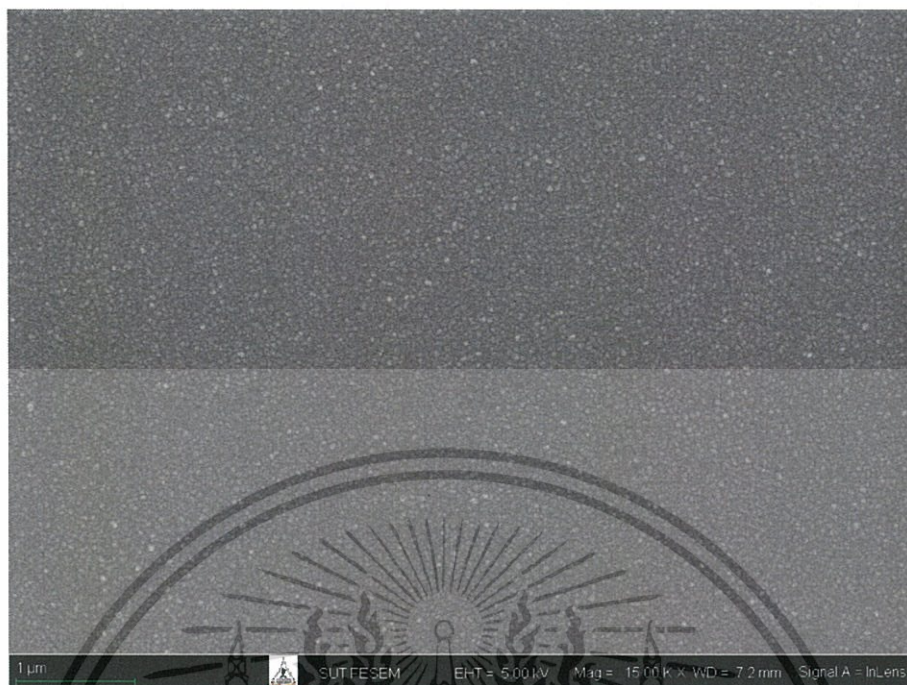
#### 4.1.2 ผลการเตรียมฟิล์มโลหะเงิน

ในการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางโลหะเงินจะใช้วิธีการเตรียมด้วยกระบวนการ DC-Sputtering ด้วยเครื่องแบบกำหนดสภาวะที่เหมาะสมเอง

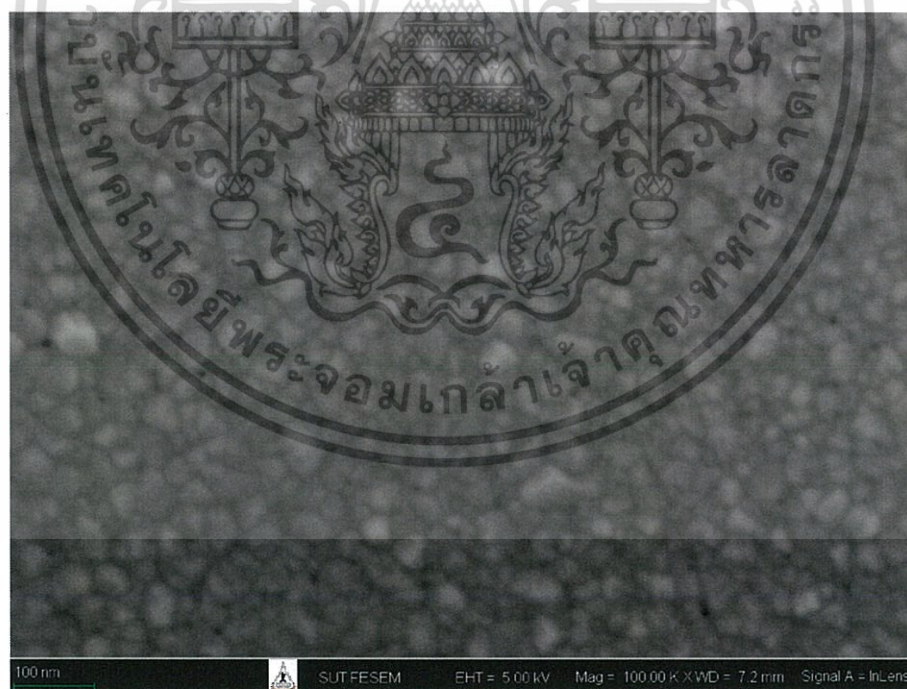
ในกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยเครื่องดังกล่าว จำเป็นต้องหาสภาวะ (Conditions) ในการปลูกฟิล์มที่เหมาะสมก่อน และหาอัตราการสะสมฟิล์ม (Deposition rate) ของเป้าโลหะเงิน (Silver Target) ที่สภาวะดังกล่าว จากนั้นจึงตรวจวัดผลของเนื้อฟิล์มและความหนาที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงิน ของตัวอย่าง Test-Ag1

Parameter	Conditions
Target	Ag
Substrate	BSG
Target to Substrate distance	10cm.
Base pressure	$4.5 \times 10^{-5}$ mbar
Gas	Ar
Gas flow rate	4mL/min
Working pressure	$1.39 \times 10^{-2}$ mbar
Voltage	413V
Current	40mA.
Time	10min



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag1 ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

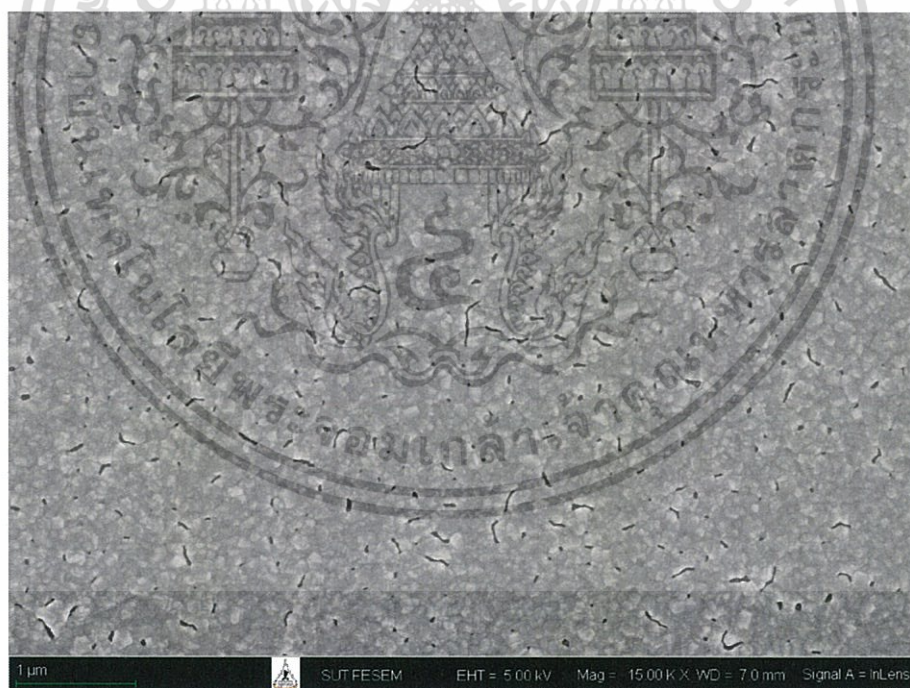


รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag1 ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะเงิน ของตัวอย่าง Test-Ag2

Parameter	Conditions
Target	Ag
Substrate	BSG
Target to Substrate distance	10cm.
Base pressure	$4.6 \times 10^{-5}$ mbar
Gas	Ar
Gas flow rate	3mL/min
Working pressure	$1.40 \times 10^{-2}$ mbar
Voltage	444V
Current	40mA
Time	7min



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag2 ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



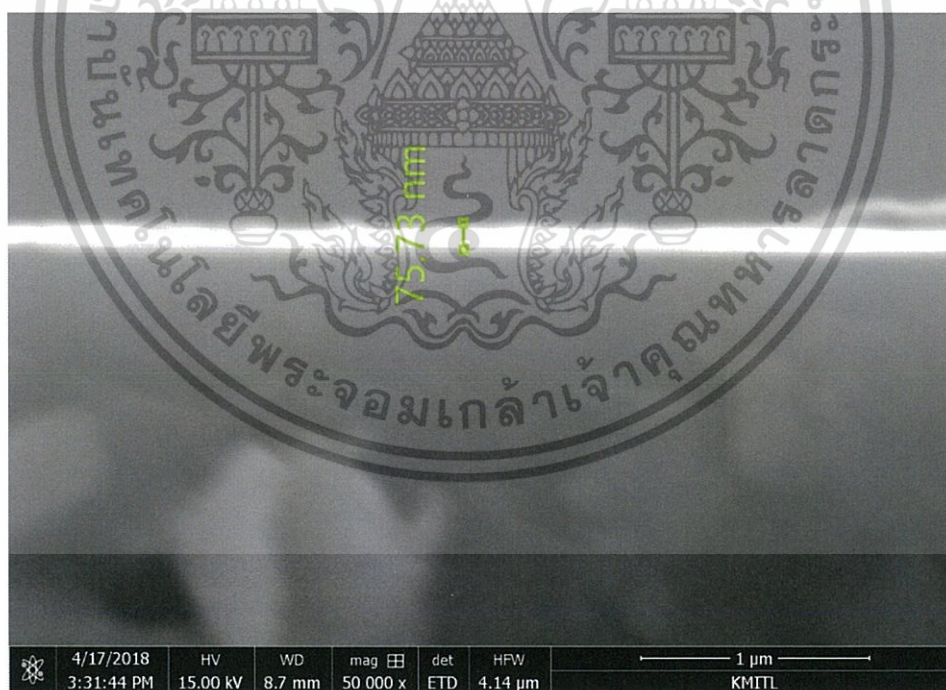
รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มโลหะเงินของตัวอย่าง Test-Ag2 ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

การหาอัตราการก่อตัว (Deposition rate) ของฟิล์มโลหะเงินด้วยระบบ DC-sputtering ใช้วิธีหาด้วยการทดลองเคลือบโดยเปลี่ยนตัวแปรเวลา (t) ที่ใช้การเคลือบฟิล์ม ซึ่งได้ผลสรุปอัตราการก่อตัวของฟิล์มโลหะเงินโดย DC-sputtering ภายใต้สภาวะ ความดัน  $1.41 \times 10^{-2}$  mbar ระยะจากเป้าถึงแผ่นกระจกที่จะเคลือบ (Target to Substrate distance) 7 เซนติเมตร

ในโครงการนี้ได้ใช้กำลังไฟฟ้า Discharge ขณะเคลือบฟิล์มเป็น 18 W. และความดันประมาณ  $1.4 \times 10^{-2}$  mbar ในทุกตัวอย่างฟิล์มโลหะเงิน

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเงินของตัวอย่าง ฟิล์มเงินหนา 75 นาโนเมตร

Parameter	Conditions
Target	Ag
Substrate	BSG
Target to Substrate distance	7cm.
Base pressure	$4.8 \times 10^{-5}$ mbar
Gas	Ar
Gas flow rate	4mL/min
Working pressure	$1.41 \times 10^{-2}$ mbar
Voltage	460V
Current	40mA
Time	6min2s

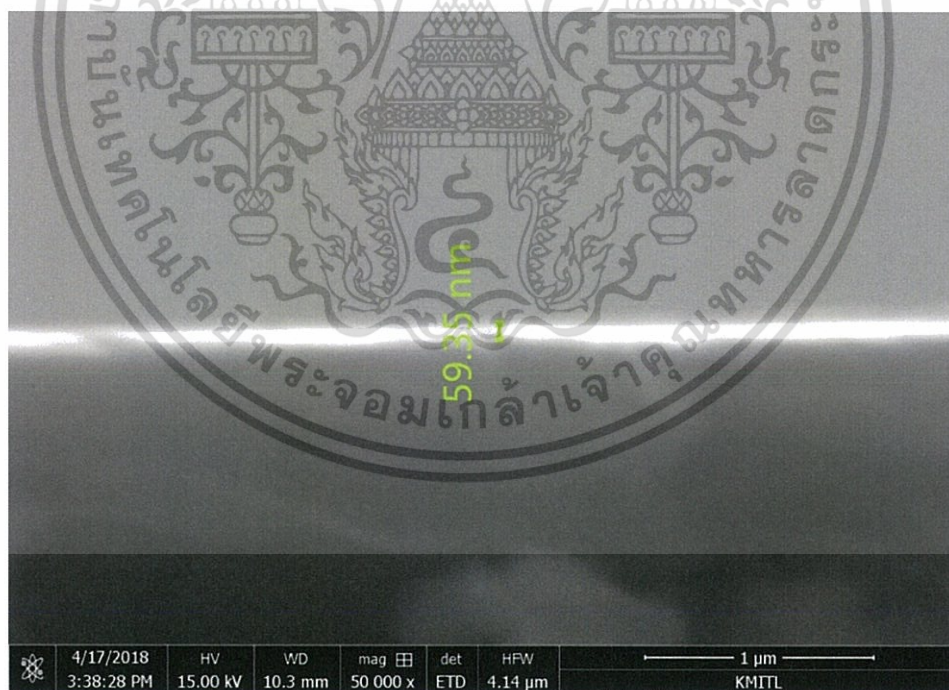


รูปที่ 4.7 ภาพ Cross section ความหนาฟิล์มโลหะเงินเฉลี่ย 75 นาโนเมตร ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเงิน ของตัวอย่าง ฟิล์มเงินหนา 50 นาโนเมตร

Parameter	Conditions
Target	Ag
Substrate	BSG
Target to Substrate distance	7cm.
Base pressure	$4.5 \times 10^{-5}$ mbar
Gas	Ar
Gas flow rate	4mL/min
Working pressure	$1.42 \times 10^{-2}$ mbar
Voltage	452V
Current	40mA
Time	4min5s

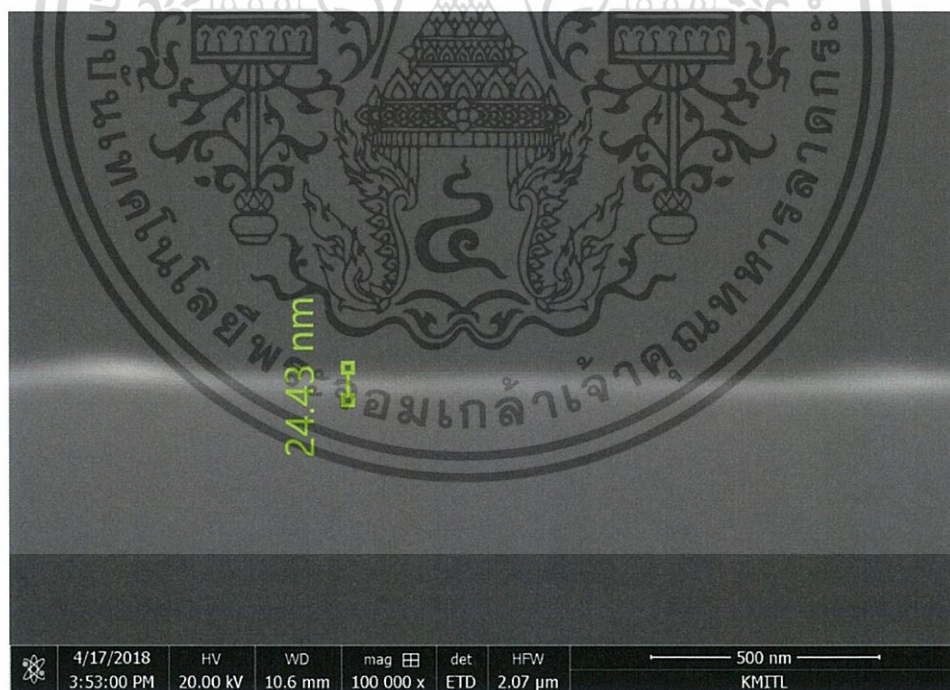


รูปที่ 4.8 ภาพ Cross section ความหนาฟิล์มโลหะเงินเฉลี่ย 50 นาโนเมตร ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ กำลังขยาย 50,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์แสดงค่าสภาวะต่างๆที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเงิน ของตัวอย่าง ฟิล์มเงินหนา 25 นาโนเมตร

Parameter	Conditions
Target	Ag
Substrate	BSG
Target to Substrate distance	7cm.
Base pressure	$3.31 \times 10^{-5}$ mbar
Gas	Ar
Gas flow rate	4mL/min
Working pressure	$1.41 \times 10^{-2}$ mbar
Voltage	450V
Current	40mA
Time	2min3s



รูปที่ 4.9 ภาพ Cross section ความหนาฟิล์มโลหะเงินเฉลี่ย 25 นาโนเมตร ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนที่ กำลังขยาย 100,000 เท่า บันทึกด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

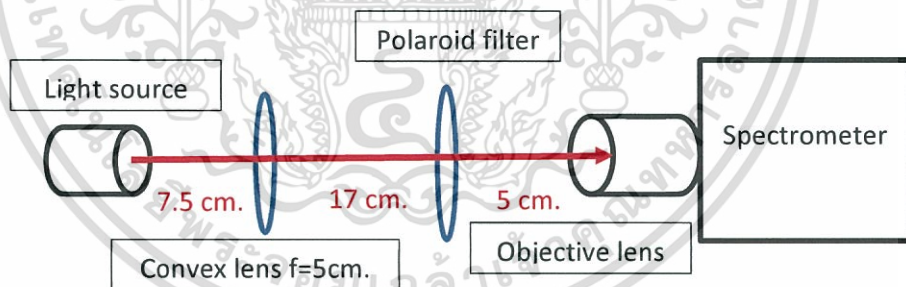
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางโลหะเงินภายใต้สภาวะความดันคงที่  $1.4 \times 10^{-2}$  mbar และ กำลังไฟฟ้าคงที่ 18 Watt

ความหนาฟิล์มเงินโดยเฉลี่ย (นาโนเมตร)	25	50	75
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ (วินาที)	123	245	362

## 4.2 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR

การทดลองหามุมการเกิด SPR ที่เหมาะสมในการก่อให้เกิด SPR จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด ที่ให้ความยาวคลื่นแสงสีแดง 635 นาโนเมตร ดังที่กล่าวไปในบทที่ 3 และใช้รูปแบบการจัดอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.22 ได้ผลการทดลองในรูปแบบไฟล์ Excel ดังรูปที่ 3.21 แต่ จำเป็นต้องทำการวัดความเข้มแสงโดยตรงเพื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%R) จากนั้นจึงต้องนำข้อมูลค่าการสะท้อนที่วัดได้ของแต่ละมุมมาสร้างตารางใหม่เพื่อให้แสดงผลกราฟแกนนอนเป็นมุมตกกระทบ (องศา) และแกนตั้งเป็น เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%) โดยเทียบจากการทดลองเก็บข้อมูลค่าความเข้มแสงที่ไม่เกิดการสะท้อนใดๆ ที่ระยะทางห่างจากตำแหน่งวางปริซึม 10 เซนติเมตร ซึ่งมีรูปแบบการจัดอุปกรณ์ดังรูป



รูปที่ 4.10 การวัดความเข้มแสงโดยตรงเพื่อใช้เทียบกับค่าความเข้มการสะท้อน

จากนั้นจะนำค่าความเข้มการสะท้อนที่วัดได้ของทุกๆ มุมมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%R) เทียบจากค่าความเข้มที่วัดได้แบบไม่มีการสะท้อนจากรูปที่ 4.14 ด้วยสมการ

$$\%R = \frac{\text{ค่าความเข้มแสงที่วัดโดยตรง}}{\text{ความเข้มแสงที่วัดได้จากการสะท้อน}} \times 100\%$$

ค่าความเข้มแสงที่วัดโดยตรงขณะทดลองตัวอย่างฟิล์มโลหะทองจะมีค่าเท่ากับ 65,000 ส่วนค่าความเข้มแสงที่วัดโดยตรงขณะทดลองฟิล์มบางโลหะเงินเท่ากับ 50,000 ในหน่วย A/D Count 16 bit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

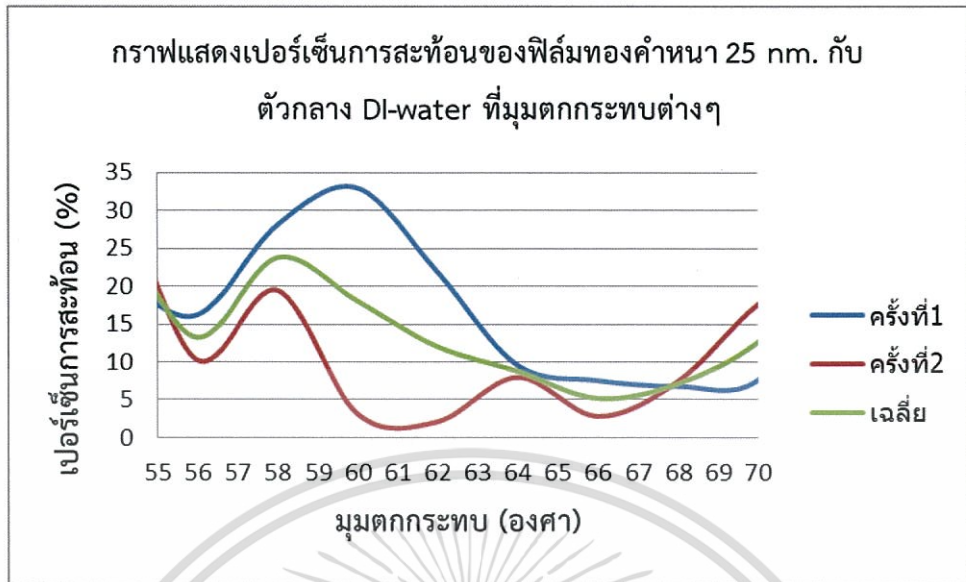
การทดลองนี้จะวัดค่าการสะท้อนของแสงที่สะท้อนออกจากฟิล์มโลหะที่ผิวด้านหน้าของฟิล์มสัมผัสอยู่กับน้ำปอดประจุ (De-ionized water) โดยจะทำการปรับมุมครึ่งละ 2 องศาตั้งแต่มุม 54 องศา ถึง 70 องศา และได้ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มบางโลหะทอง ตามตารางที่ 4.8 ถึง 4.11 และผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะเงิน ตามตารางที่ 4.13 ถึง 4.16

#### 4.2.1 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะทอง

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะทองหนา 25 นาโนเมตร

มุมตกกระทบ (องศา)	ค่าความเข้มการสะท้อน (A/D Count 16 bit)		เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%)		
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
54	13912.01	21212.38	19.8743	30.3034	25.08885
56	11351.63	7170.25	16.21661	10.24321	13.22991
58	19667	13629.6	28.09571	19.47086	23.78329
60	23098.32	2199.16	32.9976	3.141657	18.06963
62	15393.28	1468.88	21.9904	2.0984	12.0444
64	6719.59	5577.03	9.599414	7.967186	8.7833
66	5273.66	1975.35	7.5338	2.821929	5.177864
68	4745.56	5194.28	6.779371	7.4204	7.099886
70	5292.7	12274.61	7.561	17.53516	12.54808

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

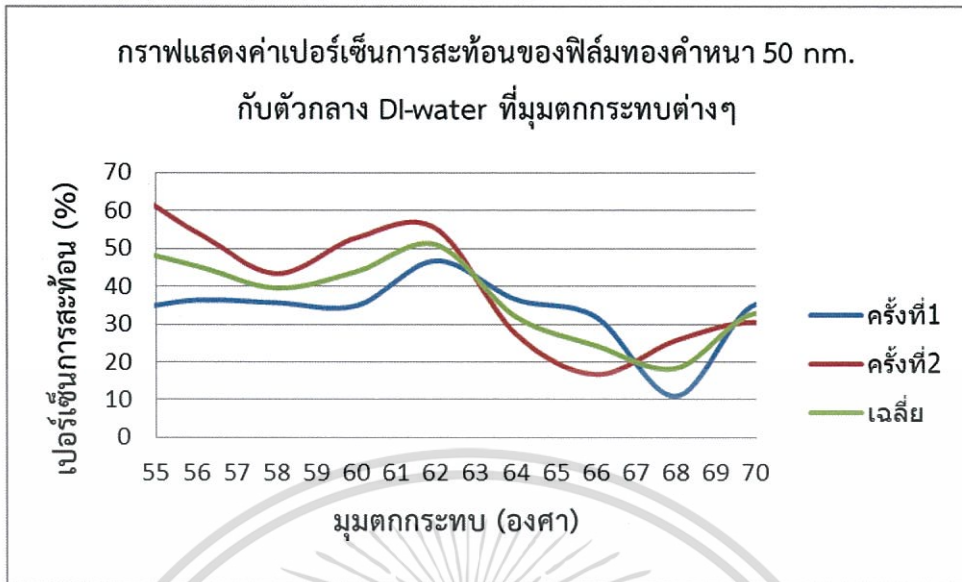


รูปที่ 4.11 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะทองคำหนา 25 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะทองคำหนา 50 นาโนเมตร

มุมตกกระทบ (องศา)	ค่าความเข้มการสะท้อน (A/D Count 16 bit)		เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%)		
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
54	23629.3	45392.3	33.75614	64.84614	49.30114
56	25425.65	38027.03	36.32236	54.32433	45.32334
58	24956.97	30340.42	35.65281	43.34346	39.49814
60	24422.99	36986.12	34.88999	52.83731	43.86365
62	32720.92	38686.7	46.74417	55.26671	51.00544
64	25571.97	19202.34	36.53139	27.43191	31.98165
66	22336.43	11713.68	31.90919	16.73383	24.32151
68	7680.62	17992.12	10.97231	25.70303	18.33767
70	24653.52	21365.07	35.21931	30.52153	32.87042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

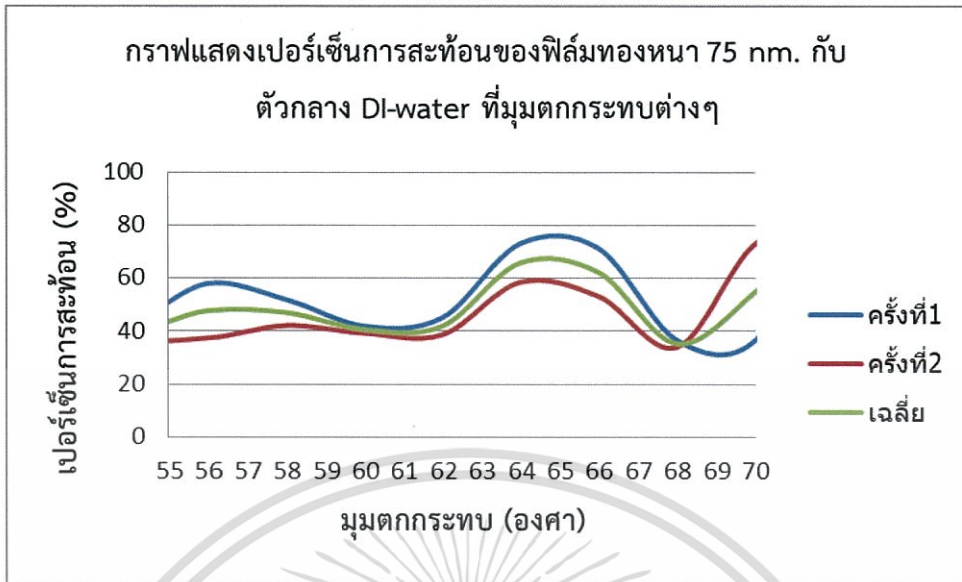


รูปที่ 4.12 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะทองคำ 50 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะทองคำ 75 นาโนเมตร

มุมตกกระทบ (องศา)	ค่าความเข้มการสะท้อน (A/D Count 16 bit)		เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%)		
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
54	30235.21	27305.4	43.19316	39.00771	41.10044
56	40605.1	26225.61	58.00729	37.46516	47.73622
58	36351.67	29522.97	51.93096	42.17567	47.05331
60	29342.87	27489.74	41.91839	39.27106	40.59472
62	31653.78	27160.01	45.21969	38.80001	42.00985
64	51171.6	40988.72	73.10229	58.55531	65.8288
66	49907.22	37263.23	71.29603	53.23319	62.26461
68	25688.16	23816.72	36.69737	34.02389	35.36063
70	25658.96	51088.43	36.65566	72.98347	54.81956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

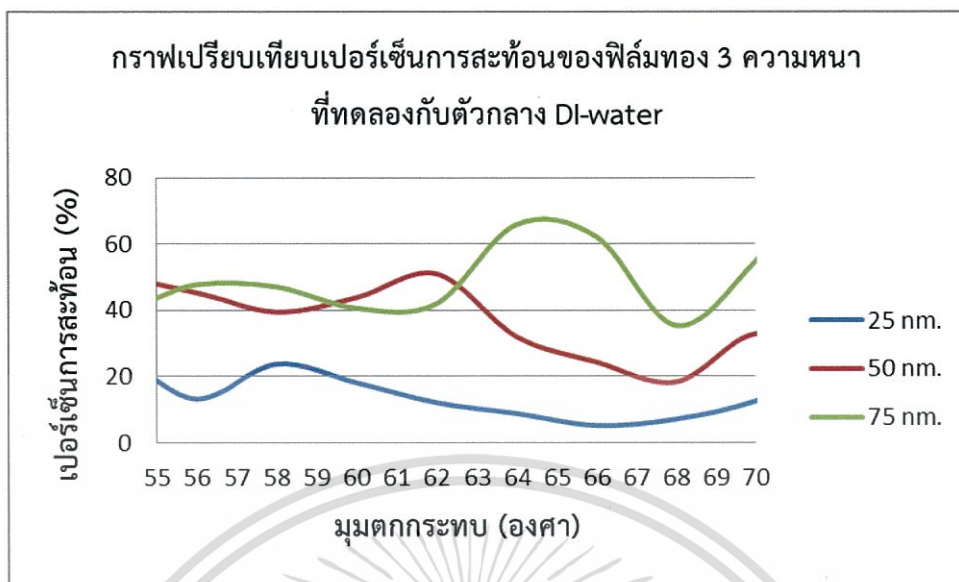


รูปที่ 4.13 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะทองคำ 75 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะทองที่มีความหนา 3 ระดับ

มุมตกกระทบ (องศา)	เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ย (%)		
	25 nm.	50 nm.	75 nm.
54	25.08885	49.30114	41.10044
56	13.22991	45.32334	47.73622
58	23.78329	39.49814	47.05331
60	18.06963	43.86365	40.59472
62	12.0444	51.00544	42.00985
64	8.7833	31.98165	65.8288
66	5.177864	24.32151	62.26461
68	7.099886	18.33767	35.36063
70	12.54808	32.87042	54.81956

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะทอง 3 ความหนา

ตารางที่ 4.12 สรุปผลมุมที่มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำที่สุดของฟิล์มโลหะทอง 3 ระดับความหนา ที่วัด  
ภายใต้ตัวกลางน้ำปอดดประจุ (De-ionized water)

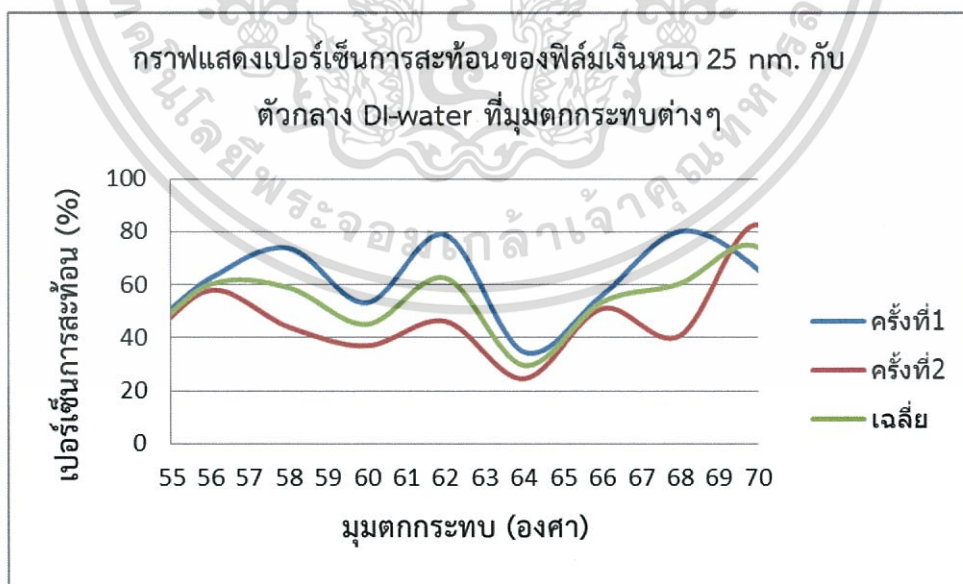
ความหนาฟิล์มทอง (นาโนเมตร)	เปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำสุด (%)	มุมตกกระทบที่มีเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนต่ำที่สุด (องศา)
25	5.177864	66
50	18.33767	68
75	35.36063	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการทดลองหามุมการเกิด SPR ของตัวอย่างฟิล์มโลหะเงิน

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 25 นาโนเมตร

มุมตกกระทบ(องศา)	ค่าความเข้มการสะท้อน (A/D Count 16 bit)		เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%)		
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
54	20892.08	18020.44	41.78416	36.04088	38.91252
56	31257.29	28948.02	62.51458	57.89604	60.20531
58	36982.81	22067.36	73.96562	44.13472	59.05017
60	26620.66	18499.3	53.24132	36.9986	45.11996
62	39485.93	23127.39	78.97186	46.25478	62.61332
64	17366.8	12307.51	34.7336	24.61502	29.67431
66	28009.11	25513.74	56.01822	51.02748	53.52285
68	40092.77	20396.85	80.18554	40.7937	60.48962
70	32995.8	41363.82	65.9916	82.72764	74.35962

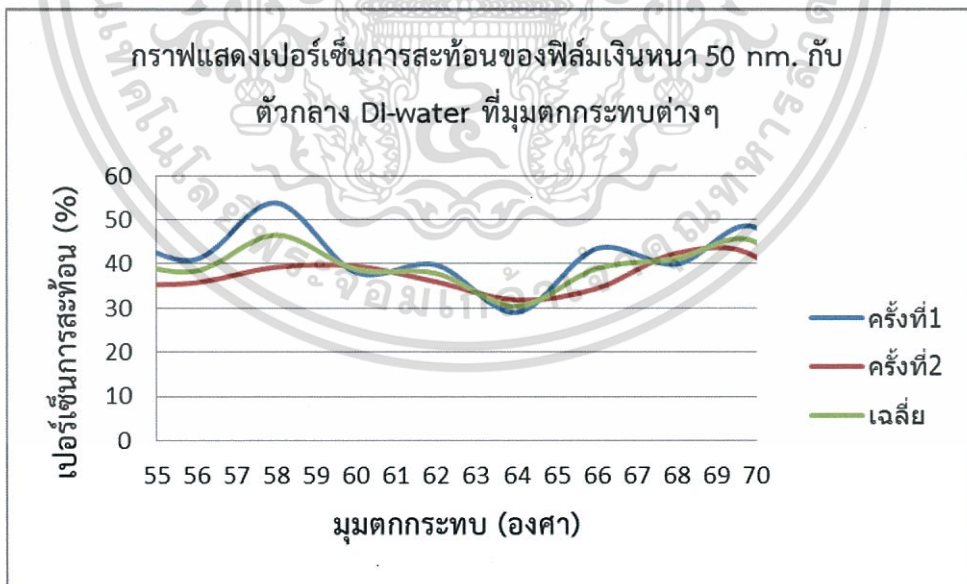


รูปที่ 4.15 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 25 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 50 นาโนเมตร

มุมตกกระทบ (องศา)	ค่าความเข้มการสะท้อน (A/D Count 16 bit)		เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%)		
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
54	22315.72	17338.58	44.63144	34.67716	39.6543
56	20536	17884.6	41.072	35.7692	38.4206
58	26932.28	19635	53.86456	39.27	46.56728
60	19054.6	19752.41	38.1092	39.50482	38.80701
62	19892.9	17964.08	39.7858	35.92816	37.85698
64	14533.7	15913.85	29.0674	31.8277	30.44755
66	21737.82	17215.48	43.47564	34.43096	38.9533
68	19986.04	21207.83	39.97208	42.41566	41.19387
70	24111.64	20745.42	48.22328	41.49084	44.85706

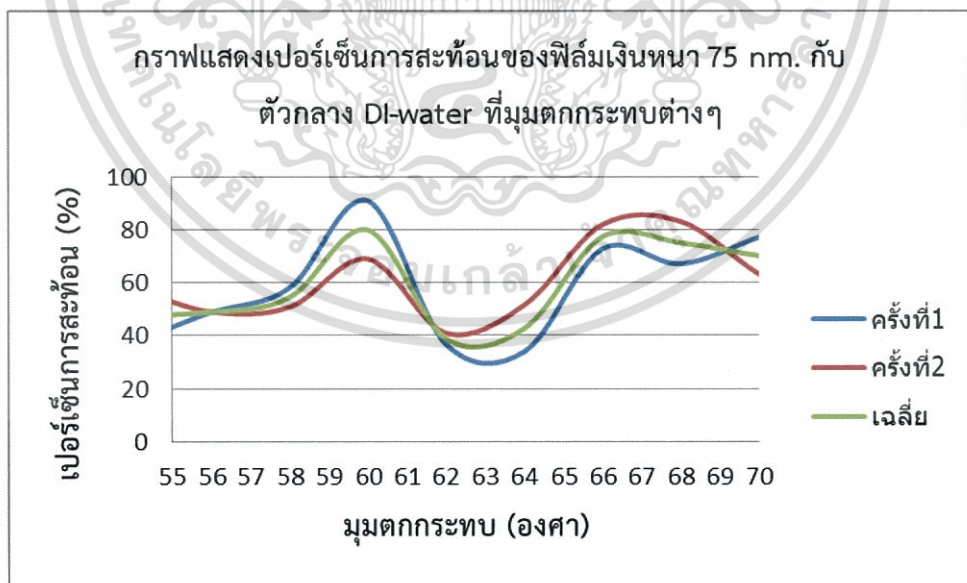


รูปที่ 4.16 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองวัดความเข้มการสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 75 นาโนเมตร

มุมตกกระทบ (องศา)	ค่าความเข้มการสะท้อน (A/D Count 16 bit)		เปอร์เซ็นต์การสะท้อน (%)		
	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	การ ทดลอง ครั้งที่ 1	การ ทดลอง ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
54	19734.88	28801.43	39.46976	57.60286	48.53631
56	24473.61	24454.35	48.94722	48.9087	48.92796
58	29073.96	25409.05	58.14792	50.8181	54.48301
60	45496.81	34481.46	90.99362	68.96292	79.97827
62	18430.18	20490.64	36.86036	40.98128	38.92082
64	16942.47	25712.82	33.88494	51.42564	42.65529
66	36376.95	40932.02	72.7539	81.86404	77.30897
68	33562.31	41557.95	67.12462	83.1159	75.12026
70	38521.62	31691.13	77.04324	63.38226	70.21275

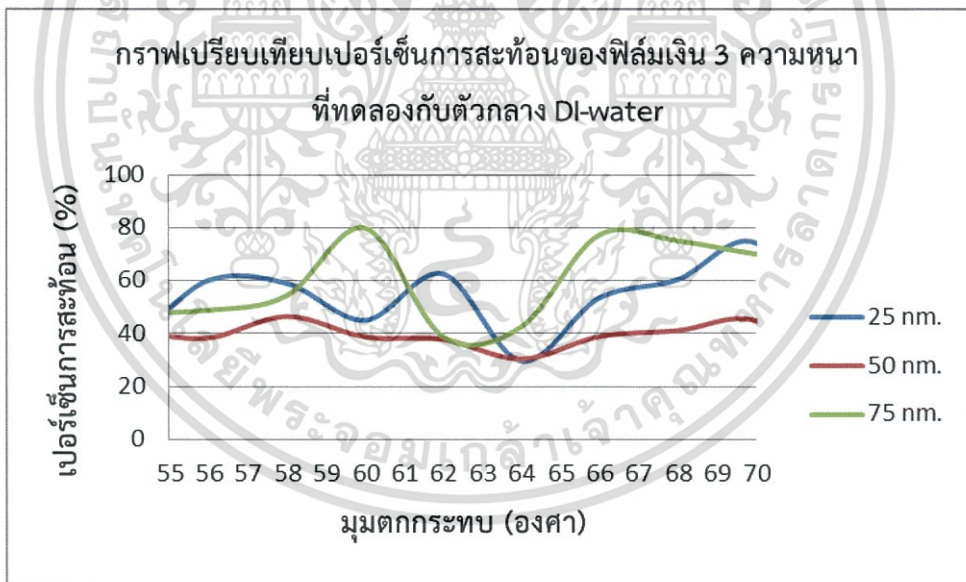


รูปที่ 4.17 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนของฟิล์มโลหะเงินหนา 75 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะเงินที่ 3 ระดับความหนา

มุมตกกระทบ (องศา)	เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ย (%)		
	25 nm.	50 nm.	75 nm.
54	38.91252	39.6543	48.53631
56	60.20531	38.4206	48.92796
58	59.05017	46.56728	54.48301
60	45.11996	38.80701	79.97827
62	62.61332	37.85698	38.92082
64	29.67431	30.44755	42.65529
66	53.52285	38.9533	77.30897
68	60.48962	41.19387	75.12026
70	74.35962	44.85706	70.21275



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยของฟิล์มโลหะเงิน 3 ความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 สรุปผลมุมที่มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำที่สุดของฟิล์มโลหะเงิน 3 ระดับความหนา ที่วัด  
ภายใต้ตัวกลางน้ำปลอดประจุ (De-ionized water)

ความหนาฟิล์มเงิน (นาโนเมตร)	เปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำสุด (%)	มุมตกกระทบที่มีเปอร์เซ็นต์ การสะท้อนต่ำที่สุด (องศา)
25	29.67431	64
50	30.44755	64
75	38.92082	62

เพื่อการเปรียบเทียบการดูดกลืนพลังงานแสงของฟิล์มตัวอย่าง จะใช้การคำนวณค่าความแตกต่าง  
ของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุด (%R<sub>max</sub>) เทียบกับเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยต่ำสุด (%R<sub>min</sub>) ของฟิล์ม  
ตัวอย่างแต่ละตัวโดยจะมีสมการ

$$\Delta\%R = \%R_{\max} - \%R_{\min}$$

โดยที่  $\Delta\%R$  คือ ค่าความต่างของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุดกับต่ำสุด

%R<sub>max</sub> คือ เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุด

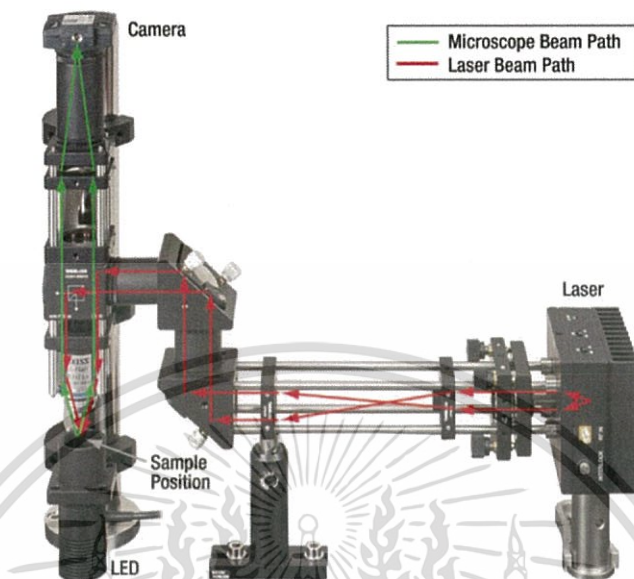
%R<sub>min</sub> คือ เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยต่ำสุด

ตารางที่ 4.18 ค่าความแตกต่างของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของฟิล์มตัวอย่างแต่ละชั้น

ฟิล์มโลหะ ความหนาฟิล์มโลหะ (นาโนเมตร)	ทอง			เงิน		
	%R <sub>min</sub>	%R <sub>max</sub>	$\Delta\%R$	%R <sub>min</sub>	%R <sub>max</sub>	$\Delta\%R$
25	5.177864	25.08885	19.910986	29.67431	74.35962	44.68531
50	18.33767	51.00544	32.66777	30.44755	46.56728	16.11973
75	35.36063	62.26461	26.90398	38.92082	79.97827	41.05745

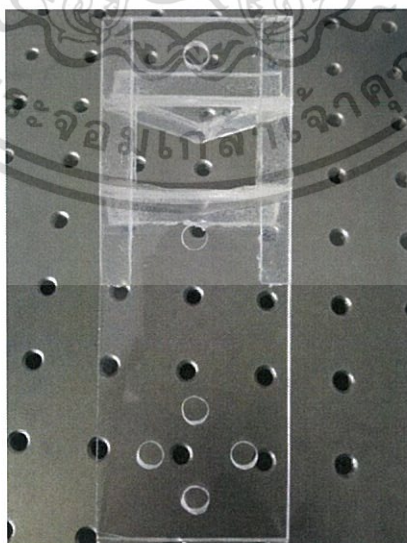
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ปัญหาในการประยุกต์ใช้ SPR กับ Optical tweezers



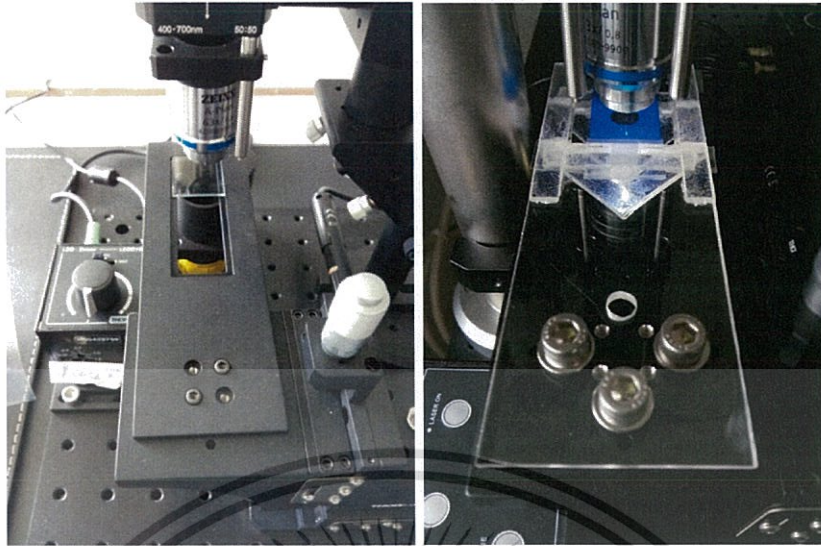
รูปที่ 4.19 เส้นทางเดินแสงของ Optical tweezers [39]

จากการทดลองนำมาใช้ในการประยุกต์ใช้จริงกับอุปกรณ์ Optical tweezers โดยติดตั้งอุปกรณ์ของชุดกระตุ้น SPR เช่นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เลนส์รวมแสงเลเซอร์ให้ยึดติดกับที่ และจะเป็นจะต้องเปลี่ยนตำแหน่งตัวอย่างของ Optical tweezers ดั้งเดิมซึ่งไม่มีช่องสำหรับติดตั้งปริซึม ไปใช้ตำแหน่งตัวอย่างที่ออกแบบให้มีช่องสำหรับวางผลึกปริซึมไว้ข้างใต้ตำแหน่งวางแผ่นสไลด์ตัวอย่าง ดังรูป



รูปที่ 4.20 ลักษณะของแทนวางตัวอย่างสำหรับชุดกระตุ้น SPR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



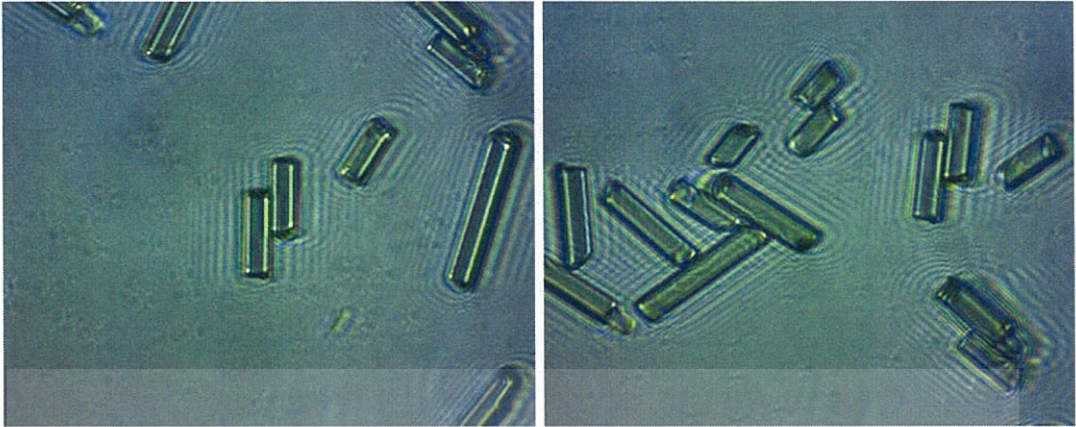
รูปที่ 4.21 (ซ้าย) แท่นวางตัวอย่างของ Optical tweezers, (ขวา) แท่นวางตัวอย่างชุดกระตุ้น SPR

จากการทดลองใช้แท่นวางดังกล่าวกับแผ่นสไลด์ดั้งเดิมของ Optical tweezers ทำให้ทราบว่าระบบการจัดชุดกระตุ้น SPR แบบ Kretschmann–Raether ดั้งเดิมที่ใช้ในการทดลองหาค่ามุมแสงตกกระทบนี้ทำให้เกิดปัจจัยที่ส่งผลต่อการสังเกตการภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ ซึ่งเกิดปัญหากับความคมชัดของภาพ โดยจะสังเกตเห็นวัตถุชิ้นเดียวแยกเป็น 2 ชิ้น เกิดจากการที่แสงไฟจาก LED ช่างได้แท่นวางตัวอย่างมีเส้นทางเดินที่ถูกหักเหโดยปริซึมทำให้เส้นทางเดินของแสงดังกล่าวถูกแยกออกเป็นหลายเส้นทาง เมื่อแสงเหล่านั้นตกกระทบวัตถุที่ต้องการสังเกตจึงเกิดภาพขึ้นหลายภาพซ้อนกันและแยกออกจากกัน ทำให้เห็นวัตถุชิ้นเดียวเป็นหลายชิ้นได้



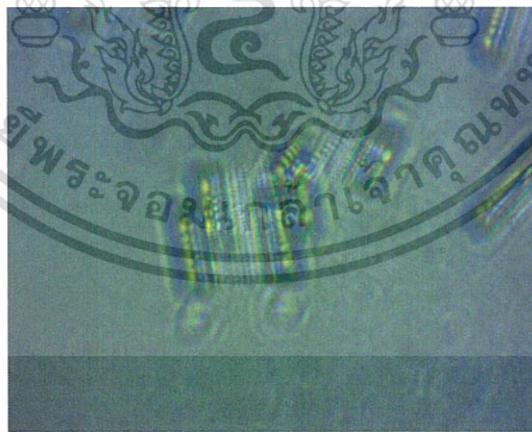
รูปที่ 4.22 แผ่นสไลด์ดั้งเดิมของ Optical tweezers เป็นชนิดหลุมใส่สารตัวอย่าง (Cavity Slides)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 การหักเหของแสงโดยปริซึมทำให้เกิดการซ้อนกันของภาพวัตถุ Nano-rod

นอกจากปัญหาในเรื่องความคมชัดของภาพที่ได้แล้วระนาบของแท่นวางตัวอย่างที่อาจจะไม่ได้ตั้งฉากกับระนาบกล้องจุลทรรศน์พอดี ทำให้เมื่อมองด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงๆจะทำให้การปรับโฟกัสทำได้ยากเพราะระนาบที่มองเห็นจะเอียงตามระนาบของแท่นวาง เมื่อทำการเลื่อนตำแหน่งของแท่นวางเพียงเล็กน้อย ภาพที่เกิดการเบลอขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากจุดโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์มีขนาดเล็กมาก ซึ่ง Objective lens 63x ที่ใช้นี้มีระยะโฟกัส (f) เพียงแค่ 0.5 มิลลิเมตร และโฟกัสที่เล็กมากนี้ส่งผลให้การเลื่อนระนาบของแท่นวางตัวอย่างที่มีการเอียงไม่ตั้งฉากกับกล้องเพียงเล็กน้อยจะทำให้ภาพเกิดหลุดโฟกัสได้ง่าย



รูปที่ 4.24 ความคมชัดของภาพจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อทำการเลื่อนตำแหน่งแท่นวางที่ไม่ได้ระนาบฉากกับกล้อง

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มตัวอย่างโลหะเงินและโลหะทองที่ผิวหน้าฟิล์มสัมผัสอยู่กับน้ำปอดดประจุ (De-ionized water) เมื่อจัดระบบกระตุ้นในแบบ Kretschmann–Raether ด้วยแสงเลเซอร์สีแดงที่ให้กำลังแสง 8 mW. ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ชนิด P-polarized แล้วสามารถสรุปผลได้ดังหัวข้อถัดไป

##### 5.1.1 สรุปผลการหามุม SPR ของฟิล์มบางโลหะทอง

ฟิล์มโลหะทองหนา 25 นาโนเมตร จะมีมุมตกกระทบที่ให้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่มุม 66 องศา ส่วนตัวอย่างฟิล์มโลหะทองหนา 50 และ 75 นาโนเมตร มีมุมตกกระทบที่ให้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่มุม 68 องศา สรุปได้ว่ามุมตกกระทบ 66 ถึง 68 องศา มีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นมุม SPR ( $\theta_{sp}$ ) ของตัวอย่างฟิล์มโลหะทอง และตัวอย่างที่ให้ผลการดุดกลืนพลังงานแสงตกกระทบได้ดีที่สุดจากค่าความต่างของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุดกับต่ำสุด ( $\Delta\%R$ ) คือตัวอย่างฟิล์มโลหะทองที่มีความหนาเฉลี่ย 50 นาโนเมตร

##### 5.1.2 สรุปผลการหามุม SPR ของฟิล์มบางโลหะเงิน

ฟิล์มโลหะเงินหนา 25 และ 50 นาโนเมตร มีมุมตกกระทบที่ให้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่มุม 64 องศา ส่วนตัวอย่างฟิล์มโลหะเงินหนา 75 นาโนเมตร มีมุมตกกระทบที่ให้เปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่มุม 62 องศา สรุปได้ว่ามุมตกกระทบ 62 ถึง 64 องศา มีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นมุม SPR ( $\theta_{sp}$ ) ของตัวอย่างฟิล์มโลหะเงิน และตัวอย่างที่ให้ผลการดุดกลืนพลังงานแสงตกกระทบได้ดีที่สุดจากค่าความต่างของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยสูงสุดกับต่ำสุด ( $\Delta\%R$ ) คือตัวอย่างฟิล์มโลหะเงินที่มีความหนาเฉลี่ย 25 นาโนเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. ตัวอย่างที่ให้ผลความต่างของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยได้ไม่ตรงตามทฤษฎีในรูปที่ 2.5 คือ ตัวอย่างฟิล์มโลหะทองความหนาเฉลี่ย 25 นาโนเมตร ซึ่งให้กราฟเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยในส่วนที่มีค่าต่ำมีความชันของกราฟมาก และฟิล์มโลหะเงินความหนา 50 นาโนเมตรที่วัดค่า  $\Delta\%R$  ได้ต่ำที่สุดและมีลักษณะกราฟเปอร์เซ็นต์การสะท้อนที่ค่อนข้างเป็นเส้นตรงทุกมุมต่างจากทฤษฎี อาจเกิดจากการทดลองที่ออกแบบมาได้ไม่ดีคือทำการทดลองซ้ำได้เพียงแค่ตัวอย่างละ 2 ครั้งเนื่องจากปัญหาทางด้านเวลาและความพร้อมของอุปกรณ์ หรือความผิดพลาดอาจจะเกิดจากคุณภาพของฟิล์มทั้ง 2 ตัวอย่างที่ใช้ทดลองนี้ อาจไม่ดีพอ ในการวิจัยต่อไปควรเพิ่มจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ และใช้ตัวอย่างฟิล์มชนิดเดียวกันหลายๆตัวอย่างในการทดลอง เพื่อการหากราฟเปอร์เซ็นต์การสะท้อนเฉลี่ยที่แม่นยำยิ่งขึ้น

2. คุณสมบัติความหนาของฟิล์มตัวอย่างทุกชิ้นควรนำไปตรวจเช็คความหนาด้วยระบบ Atomic force microscope เพื่อความถูกต้องแม่นยำที่มากกว่า Scanning electron microscope

3. ในการทดลองวัดค่าแสงสะท้อนจากชุดกระตุ้น SPR ควรใช้ปริซึมที่มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมซึ่งทำให้แสงที่ส่องเข้าสู่ปริซึมจะตั้งฉากกับแนวขอบครึ่งวงกลมของปริซึมเสมอ ไม่เกิดการหักเหและสะท้อนออกให้เกิดการสูญเสียพลังงานแสงตกกระทบบนเข้าสู่ตัวฟิล์ม

4. ในการทดลองครั้งต่อไป จำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้ชุดทัศนศาสตร์วางเลื่อนวงกลมสำหรับการใช้เซ็นเซอร์รับแสงที่สะท้อนออกจากชุดทดลอง เนื่องจากขณะทดลองปรับมุมตกกระทบบ ตำแหน่งลำแสงสะท้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆเช่นกันจึงต้องมีการเลื่อนตำแหน่งชุดเซ็นเซอร์ในลักษณะการเลื่อนแบบโค้งตามเส้นรอบรูปวงกลมไปปรับให้ตรงตลอดก่อนการเก็บค่าความเข้มแสงสะท้อนเพื่อรักษา ระยะห่างของชุดเซ็นเซอร์กับปริซึมให้เท่าเดิมเสมอในลักษณะคล้ายกับรัศมีของรูปวงกลม หากระยะรัศมีนี้มีการเปลี่ยนแปลงไปไม่สม่ำเสมอ ค่าความเข้มแสงที่วัดได้จะเป็นการวัดที่ระยะต่างกันส่งผลให้ค่าความเข้มแสงแต่ละมุมที่วัดมีความแตกต่างกันได้อย่างมาก

5. ควรใช้อุปกรณ์ Collimator เพื่อปรับรับแสงสะท้อนออกจากชุดทดลองก่อนเข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์ เพื่อความง่ายต่อการเก็บปริมาณแสงให้เข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์ได้อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากในการทดลองของโคตรงานนี้ไม่ได้ใช้อุปกรณ์ Collimator ทำให้การเก็บปริมาณแสงทั้งหมดเข้าสู่ช่อง Input ของเซ็นเซอร์

ไม่สามารถทำได้เพราะช่องดังกล่าวมีขนาดเล็กกว่าความกว้างของจุดแสงสะท้อน จึงแนะนำให้ใช้เลนส์ของ Collimator ที่มีความกว้างเลนส์มากกว่าจุดแสงสะท้อนจะสามารถเก็บปริมาณแสงได้ดีกว่า จากนั้นจึงนำแสงจาก Collimator เข้าสู่เซนเซอร์ จะช่วยลดการสูญเสียปริมาณแสงสะท้อนที่ไม่เข้าเซนเซอร์ไปได้

6. จากการทดลองเมื่อใช้งานฟิล์มตัวอย่างไปได้ระยะหนึ่งเนื้อฟิล์มโลหะจะเริ่มเกิดลอกออกจากกระจกสไลด์ หากต้องการใช้งานหลายครั้งอาจจะต้องมีการเคลือบโลหะโครเมียม (Cr) เป็นชั้นบางๆ เพื่อเป็นตัวยึดผานระหว่างเนื้อแก้ว BSG กับฟิล์มโลหะทองส่วนโลหะเงินจะใช้ निकเกิล (Ni) เป็นตัวผาน หรือใช้กำลังไฟฟ้าที่ต่ำลงในการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปีดเตอร์ เพื่อให้ฟิล์มมีการก่อตัวที่เป็นระเบียบช่วยลดความไม่สม่ำเสมอของขนาดเกรนทำให้ฟิล์มมีความเรียบและเพิ่มแรงยึดเกาะของฟิล์มกับ Substrate

7. ในการประยุกต์ใช้จริงกับอุปกรณ์ Optical tweezers อาจมีความจำเป็นต้อง ติดตั้งอุปกรณ์ของชุดกระตุ้น SPR เช่นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เลนส์รวมแสงเลเซอร์ให้ยึดติดกับที่ เนื่องจากในการจัดระบบทัศนศาสตร์ให้ได้มุมของลำแสงตกกระทบชั้นฟิล์มตามที่ต้องการ สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย ทั้งเรื่องของระนาบของแท่นวางตัวอย่างที่อาจจะไม่ได้ระนาบขนานกับพื้นที่พอดี ทำให้เมื่อมองด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงๆจะทำให้การปรับโฟกัสทำได้ยากเพราะระนาบที่มองเห็นจะเอียงตามระนาบของแท่นวาง นอกจากนี้การใช้ปริซึมติดตั้งในส่วนด้านล่างของแผ่นกระจกสไลด์ยังทำให้เกิดการหักเหของแสงไฟจากใต้แท่นวางที่ใช้ส่องให้ภาพบนสไลด์เข้าสู่เลนส์กล้องจุลทรรศน์ส่งผลให้เห็นภาพวัตถุเดียวกันซ้อนกันเป็น 2 ภาพ ในการพัฒนาให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับ Optical tweezers ได้จริงจะต้องคำนึงถึงการแก้ปัญหาในส่วนนี้ เช่นการเปลี่ยนรูปแบบชุดกระตุ้นจากการใช้ปริซึมตาม Kretschmann–Raether มาเป็นการใช้แผ่นกระจกสไลด์ที่มีความหนาพอดีผ่านการเคลือบฟิล์มโลหะ และใช้แสงกระตุ้นเข้าจากปลายขอบด้านข้างของกระจกสไลด์ให้แสงสามารถเดินทางสะท้อนไปมาในกระจกสไลด์ได้ เป็นต้น

8. การทดลองนำฟิล์มตัวอย่างมาใช้ร่วมกับการดักจับของ Optical tweezers จะต้องใช้ระบบ Flow injection มาเป็นตัวแปรในการทดลองดักจับ แต่ระบบนี้เกิดปัญหาในส่วนของารออกแบบและใช้วัสดุในการทำช่องสารละลายไหลผ่าน (Flow-channel) เพื่อใช้กับตัวอย่างฟิล์ม ซึ่งวัสดุที่ได้นำมาใช้ทำ Channel นี้เป็นแผ่นพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride ; PVC) แบบใสความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งหนาเกินกว่าระยะโฟกัสระบบกล้องจุลทรรศน์ของ Optical tweezers ( $f=0.50$  มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้สังเกตและบันทึกภาพ ภาพที่ได้จึงไม่สามารถส่องทะลุแผ่นพลาสติกดังกล่าวลงไปยังส่วนอนุภาคที่สนใจได้ และ Channel ดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องในเรื่องของรอยรั่ว (Leaking) จึงทำให้ไม่สามารถทำการทดลองต่อได้ เนื่องด้วยสาเหตุข้างต้น ในการวิจัยครั้งต่อไปควรออกแบบ Flow-channel ให้สามารถใช้ในการเคลือบฟิล์มโลหะลงบนแผ่นวัสดุ Channel ได้เลยเพื่อลดปัญหาในเรื่องรอยรั่ว และใช้วัสดุที่มีความบางพอเหมาะในการปิด Channel จากด้านบนเพื่อให้กล้องจุลทรรศน์สามารถส่องโพกัสทะลุเข้าไปยังส่วนของเหลวบนแผ่นฟิล์มด้าน Channel ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Pia Lansaker. *Gold-base Nanoparticle and Thin Film*. Faculty of science and technology Uppsala University, 2012.
- [2] Ilya V Shadrivov, Richard W Ziolkowski, Alexander A Zharov and Yuri S Kivshar. *Excitation of guided waves in layered structures with negative refraction*. n.p., 2004.
- [3] Christian Girard and Alain Dereux. *Near-field optics theories*. 1996.
- [4] Katherine A. Willets and Richard P. Van Duyne. *Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing*. Department of Chemistry Northwestern University Evanston, 2007.
- [5] Yong Chen and Hai Ming. *Review of Surface Plasmon Resonance and Localized Surface Plasmon Resonance Sensor*. Department of Optics & Optical Engineering Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology University of Science and Technology of China, 2012.
- [6] Hong Liu, Bing Wang, Eunice S. P. Leong, Ping Yang, Yun Zong, Guangyuan Si, Jinghua Teng and Stefan A. Maier. *Enhanced Surface Plasmon Resonance on a Smooth Silver Film with a Seed Growth Layer*. n.p., 2010.
- [7] J. Stoltenberg and D. Pengra. *Surface Plasmon Resonance in a Thin Metal Film*. n.p., 2017.
- [8] Martin Magnuson. *Surface Plasmon Resonance in Thin Gold Films*. Laboratory of Applied Physics Linkoping Institute of Technology, 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] B.D.Gupta and R.K.Verma. *Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Sensors: Principle, Probe Designs, and Some Applications*. 2009.
- [10] Shaopeng Wang and Nongjian Tao. *Surface Plasmon resonance enhanced optical absorption spectroscopy for studying molecular adsorbates*. Arizona state University, 2001.
- [11] William L. Barnes, Alain Dereux and Thomas W. Ebbesen. *Surface plasmon subwavelength optics*. Nature, 2003.
- [12] LinLin Zhao, K. Lance Kelly and George C. Schatz. *The Extinction Spectra of Silver Nanoparticle Arrays: Influence of Array Structure on Plasmon Resonance Wavelength and Width*. Department of Chemistry Northwestern University Evanston, 2003.
- [13] Anatoly V. Zayatsa, Igor I. Smolyaninovb, Alexei A. Maradudinc. *Nano-optics of surface plasmon polaritons*. n.p., 2004.
- [14] Hyuk Rok Gwon and Seong Hyuk Lee. *Spectral and Angular Responses of Surface Plasmon Resonance Based on the Kretschmann Prism Configuration*. The Japan Institute of Metals, 2010.
- [15] Refractive index [Online]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Refractive>
- [16] Refractive index database [Online]. Available from: <https://refractiveindex.info>
- [17] Permittivity [Online]. Available from: <http://maxwells-equations.com-/materials-/permittivity.php>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [18] M Righini, C Girard and R Quidant. *Light-induced manipulation with surface plasmons*. n.p., 2008.
- [19] อภิวัดน์ ชมภูสอ. *โครงสร้างระดับนาโนของทอง: การสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง*. ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556.
- [20] Leif J. Sherry, Shih-Hui Chang, George C. Schatz and Richard P. Van Duyne. *Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy of Single Silver Nanocube*. Chemistry Department Northwestern University, 2005.
- [21] ณัฐพันธ์ ศุภกา. *เปิดโลกรัสตุนาโน*. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2549.
- [22] สอนง เอกสิทธิ์. *การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนแบบควบคุมสัญญาณวิทยาการจัดการความรู้เพื่อแปรรูปผลงานวิจัยพื้นฐานให้เป็นผลิตภัณฑ์นวัตกรรมทำกำไร*. หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [23] สอนง เอกสิทธิ์. *ต่อยอดงานวิจัยพื้นฐานสู่การประยุกต์เชิงพาณิชย์: ประสบการณ์จากเทคโนโลยีซิลเวอร์นาโน*. หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [24] Kitsakorn Locharoenrat and Pattareeya Kittidachachan. *Construction of Linear Optical Spectrometer and Optical Characterization of Metallic Nanostructured Surface*. Faculty of science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.
- [25] Weerasak Somkhunthot, Thanusit Burinprakhon, Nuwat Pimpabute, Ian Thomas and Vittaya Amornkitbamrung. *Design and construction of bipolar pulsed-DC magnetron sputtering system for thin film synthesis*. Khon Kaen Institute of Technology, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

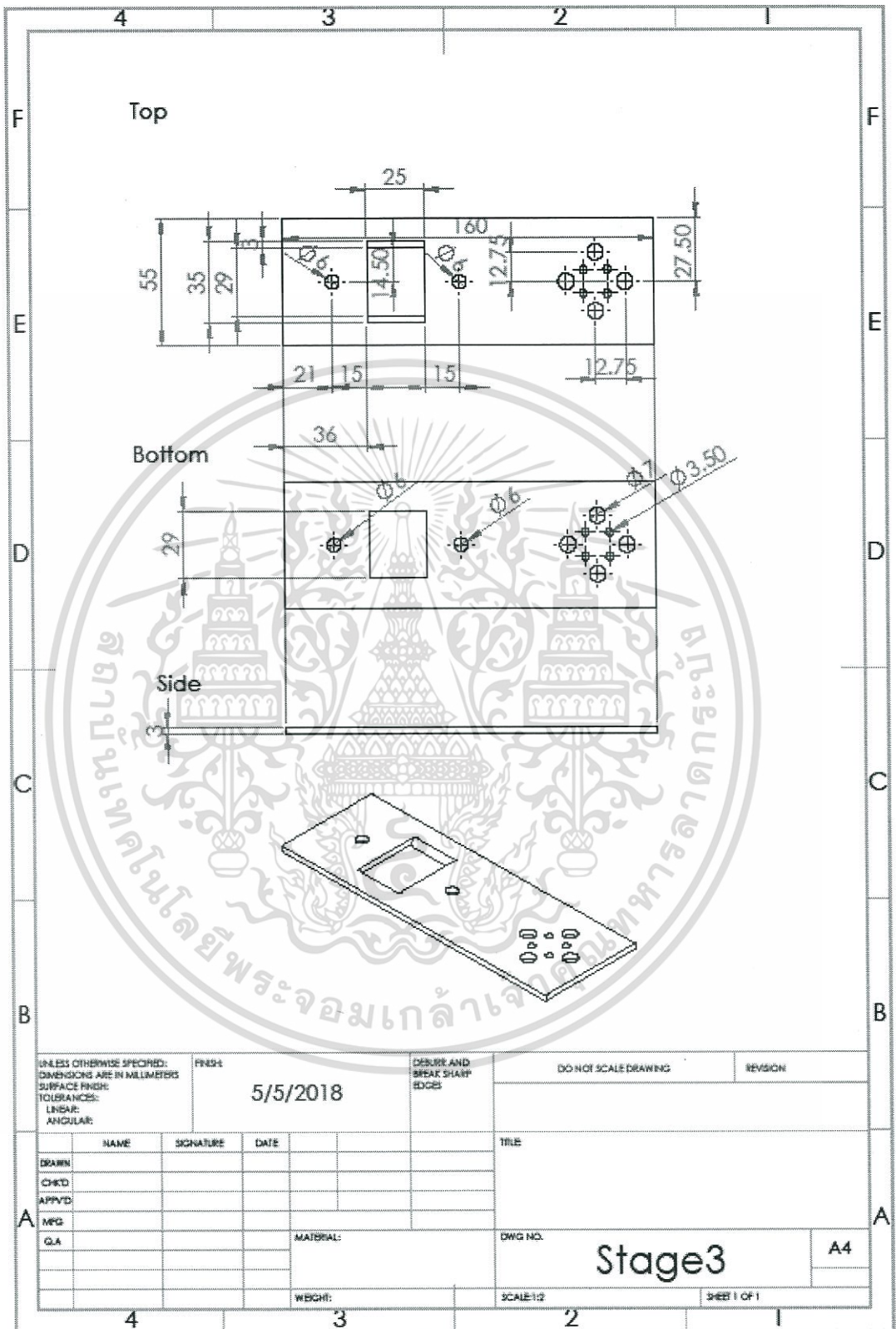
- [26] วิลาลินี วุฒิธิกรสกุล. *การเคลือบฟิล์มบางแบบสเปตเตอริง*. MTEC, 2541.
- [27] N. Maróchal and E. Quesnel. *Silver thin films deposited by magnetron sputtering*. Nuclear Research Center of Grenoble, 1994.
- [28] วรารุณี เถาลัดดา. *การออกแบบและสร้างแคโทดสำหรับระบบปลูกฟิล์มบางอาร์เอฟแมกเนตรอนสเปตเตอริง*. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553
- [29] A. Ashkin. *Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime*. AT&T Bell Laboratories Holmdel New Jersey, 1992.
- [30] Onofrio M. Maragò, Philip H. Jones, Pietro G. Gucciardi, Giovanni Volpe and Andrea C. Ferrari. *Optical trapping and manipulation of nanostructures*, Nature Nanotechnology, 2013.
- [31] Tatsuya Shoji and Yasuyuki Tsuboi. *Plasmonic Optical Tweezers toward Molecular Manipulation: Tailoring Plasmonic Nanostructure, Light Source, and Resonant Trapping*. Japan Science and Technology Cooperation, 2014.
- [32] Samir K. Mondal, Sudipta Sarkar Pal and Pawan Kapur. *Optical fiber nano-tip and 3D bottle beam as non-plasmonic optical tweezers*. CSIR-Central Scientific Instruments Organization Sector 30 C Chandigarh India, 2012.
- [33] Vladimir D. Miljkovic and Borja Sepulveda. *Optical force in plasmonic nanoparticle dimers*. n.p., 2010.
- [34] Yasas Dganapala. *Dielectric Constant Measurement Using Atomic Force Microscope System*. Wittenberg University, 2009.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [35] ยูพตี เผ่าพันธ์. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน. ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ม.ป.ป.
- [36] Brewster's angle [Online]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Brewster%27s\\_angle](https://en.wikipedia.org/wiki/Brewster%27s_angle)
- [37] โพลาริเซชัน (Polarization) [Online]. Available from: [http://www.mwit.ac.th/~pornmong/PPT\\_Polarization.pdf](http://www.mwit.ac.th/~pornmong/PPT_Polarization.pdf)
- [38] ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และ อนรรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล. วัสดุโลหะ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ม.ป.ป.
- [39] *Portable Optical Tweezers*. Thorlabs, n.d.

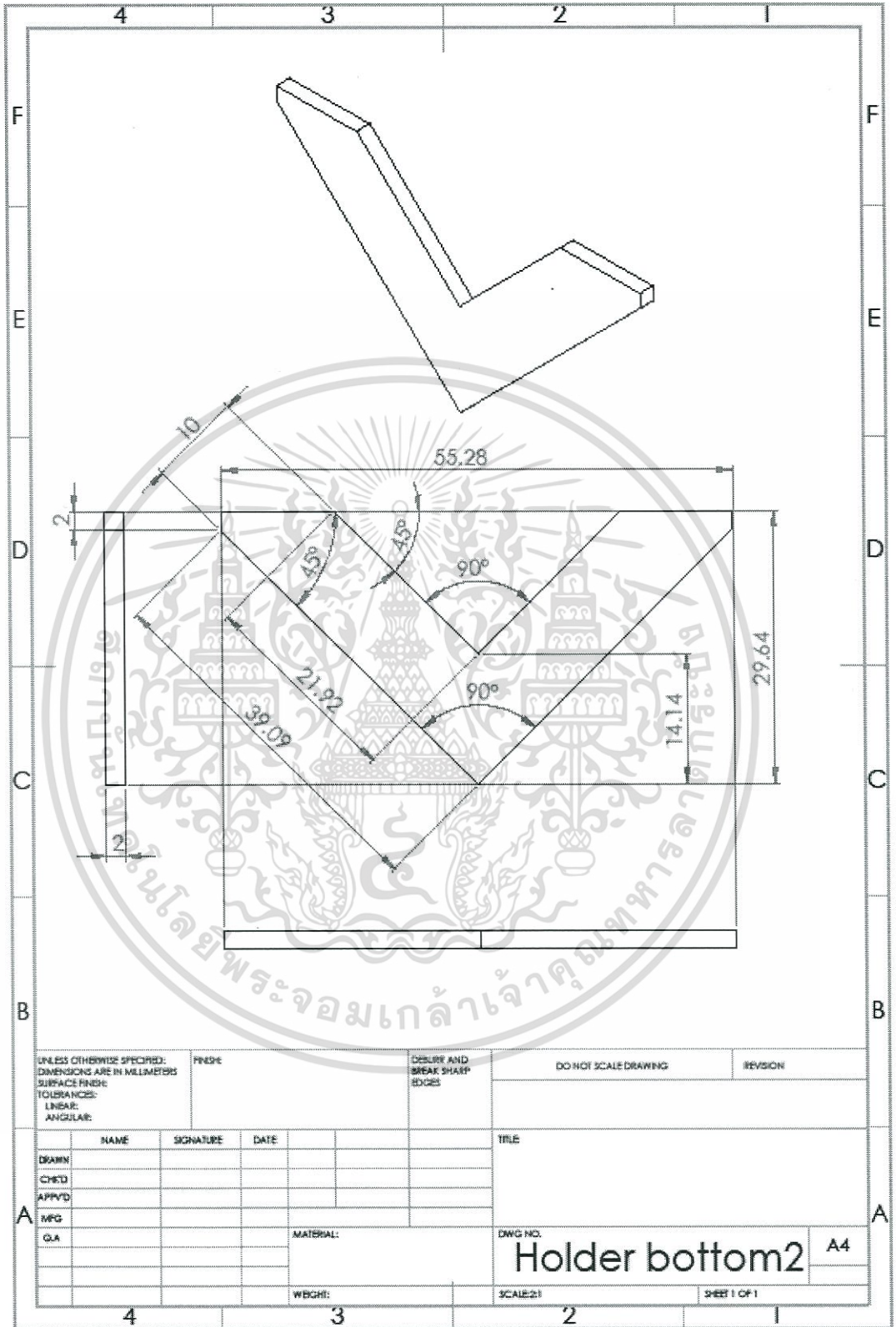


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



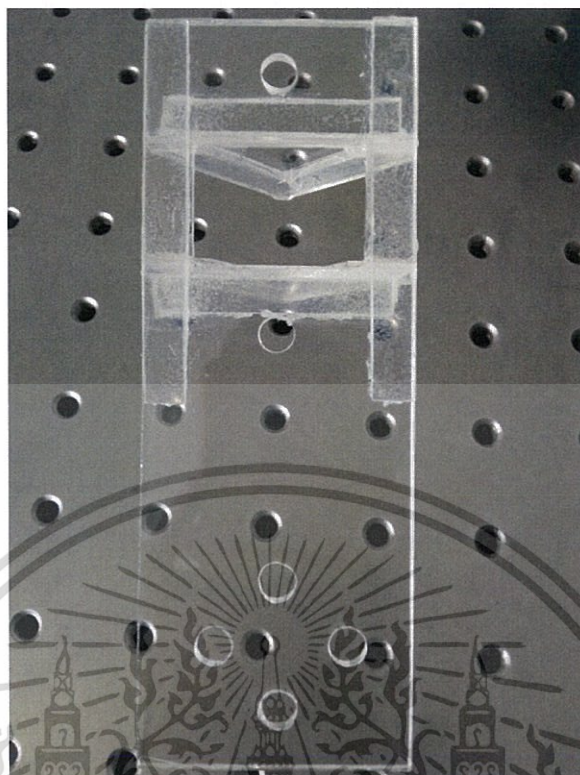
รูปที่ 1A แทนวางแผนสไลด์กล้องจุลทรรศน์และปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

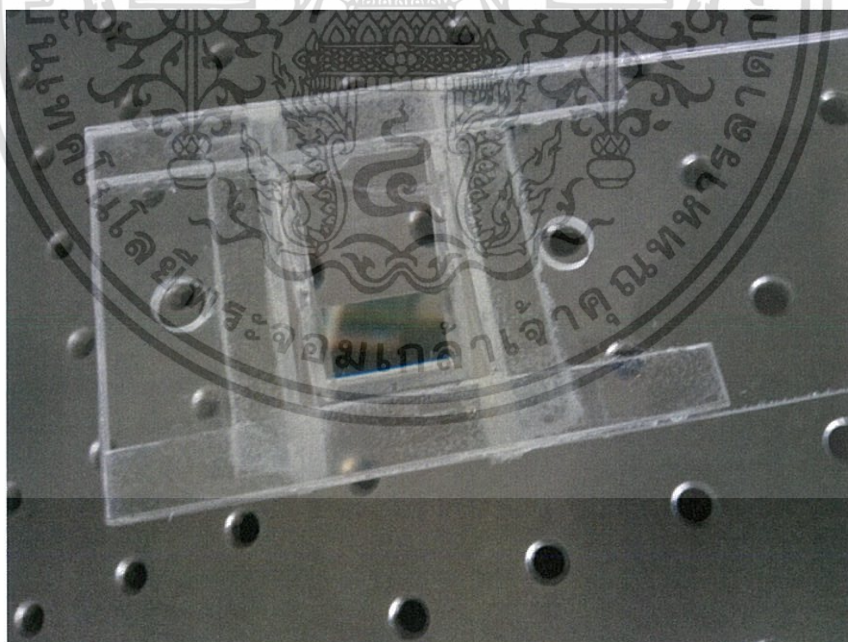


รูปที่ 2A ชิ้นส่วนใต้แทนวางแผ่นสไลด์สำหรับป้องกันปริซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3A ลักษณะของแท่นวางแผ่นสไลด์รูป 1ก ประกอบกับรูป 2ก



รูปที่ 4A ลักษณะการใส่ผลึกปริซึมลงในช่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 13 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นายอชิสรณ์ บุญศิริจิรพงษ์ รหัสประจำตัว 57051055

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การศึกษาการสั่นพ้องของพลาสมอนในฟิล์มบางโลหะ เพื่อการประยุกต์ใช้ในการดักจับเชิงแสง

ชื่อภาษาอังกฤษ THE STUDY OF PLASMONIC RESONANCE IN METAL THIN FILMS FOR OPTICAL TRAPPING APPLICATION

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น และได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.55 % หรือโปรแกรม Turnitin - %

ลงชื่อ.....อชิสรณ์ บุญศิริจิรพงษ์.....

(นายอชิสรณ์ บุญศิริจิรพงษ์)

ข้าพเจ้า ดร. วรการ นียากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ ของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....ดร. วรการ นียากร.....

(ดร. วรการ นียากร)

อาจารย์ที่ปรึกษา