



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาาระบบเซนเซอร์แสงโดยหลักการของ Surface Plasmon Resonance
Development of optical sensor system based on Surface Plasmon Resonance

ผศ. ธนภรณ์ สีสาวพัฒนานนท์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560 คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาระบบเซนเซอร์แสงโดยหลักการของ Surface Plasmon Resonance
 แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2560

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ. ชนภรณ์ ลีลาวพัฒนานนท์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมวิจัย ดร.วรการ นียากร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance ของ SPR sensor ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำ เพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมของโลหะเงินต่อการเกิดปรากฏการณ์ SPR โดยทำทั้งการทดลองและการจำลองผล ด้วยวิธีการกระตุ้นทางแสงแบบ Kretschmann configuration โดยมีปริซึม BK7 เป็นฐานรองและเคลือบด้วยฟิล์มบางเงิน ความหนา 60 nm ความหนา 80 nm และความหนา 100 nm ในส่วนการทดลองจะใช้แหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็น p-polarized He-Ne Laser ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ซึ่งหาซื้อได้ง่าย และใช้ Hawkeye Laser เป็นตัวตรวจจับความเข้มแสงที่สะท้อนกลับออกมาที่มุมตกกระทบของแสงแต่ละมุม ในส่วนการจำลองผลจะออกแบบโมเดล SPR และวิเคราะห์ผลของสัญญาณ SPR ที่เกิดขึ้นด้วยสมการ Fresnel equation และวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่เกิดขึ้นด้วยวิธี finite element method โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลที่มาจากการทดลอง

คำสำคัญ : เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์, รูปแบบ Kretschmann , ฟิล์มบางโลหะเงิน, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Development of optical sensor system based on Surface Plasmon Resonance

Researcher: Asst. Prof. Tanaporn Leelawattananon Faculty: The Faculty of Sciences

Department: Department of Physics

Co - Researcher: Dr. Worakarn Neeyakorn Faculty: The Faculty of Sciences

Department: Department of Physics

Abstract

This research project is the study of the Surface Plasmon Resonance (SPR) at the interface between silver thin film and the water dielectric layer. The purpose is to find the suitable thickness of the silver thin film layer which produces SPR and is suitable for SPR sensor applications. Both physical experiments and simulations are conducted using the Kretschmann Configuration. In the physical experiments, BK7 prisms are coated with silver thin films with the thickness of 60 nm, 80 nm, and 100 nm. The light source is p-polarized He-Ne Laser with the wavelength of 632.8 nanometers. Hawkeye laser detectors are used to detect the laser light intensity of reflected light for each desired angle. In the simulations, SPR models are designed and results of SPR signals are analyzed using the Fresnel equation. The results of electric field plasmon waves are analyzed using the finite element method. The simulated results are found to agree with the results from the physical experiments

Keywords: Surface plasmon resonance, Kretschmann configuration, Silver Thin Film, Finite element method.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยการเล่มนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบเซนเซอร์แสงโดยหลักการของ Surface Plasmon Resonance ซึ่งเกิดขึ้นและดำเนินการจนสำเร็จลงได้ด้วยความเพียรพยายามและความตั้งใจของผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับความสนับสนุนทางด้านทุนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แหล่งทุนการจัดสรรทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 จึงขอขอบคุณ ณ ที่นี้

ผศ. ชนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์
ผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอน	4
2.2 ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	8
3.1 การสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เซอ์เฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์	8
3.2 การสร้างต้นแบบอย่างง่ายของระบบเซ็นเซอร์ทางแสง	9
บทที่ 4 ผลการวิจัย	10
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	16
เอกสารอ้างอิง	17
ประวัตินักวิจัย	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1. แสดงถึงประจุที่กระจายอยู่บนพื้นผิวและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Surface Plasmon Polariton ตามแนวแกน +X	4
รูปที่ 2.2. การเกิด Surface Plasmon excitation ที่พื้นผิว เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงตกกระทบ ปริซึมในรูปแบบของ Kretschmann	5
รูปที่ 2.3. สเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกมาจากระบบ Surface Plasmon Resonance	6
รูปที่ 3.1. ชุดทดลอง SPR ในรูปแบบของ Kretschmann's configuration	9
รูปที่ 4.1a สัญญาณ SPR เมื่อชั้นไดอิเล็กตริกคือชั้นของน้ำ และ โลหะเงินมีความหนา 60 nm จาก การทดลอง	11
รูปที่ 4.1b สัญญาณ SPR เมื่อชั้น ไดอิเล็กตริกคือชั้นของน้ำ และ โลหะเงินมีความหนา 60 nm จาก การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM	11
รูปที่ 4.2 แสดงผลภาพของคลื่นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของน้ำกับ ชั้นฟิล์มบาง โลหะเงินความหนา 60 nm	12
รูปที่ 4.3a สัญญาณ SPR เมื่อชั้น ไดอิเล็กตริกคือชั้นของน้ำ และ โลหะเงินมีความหนา 80 nm จาก การทดลอง	13
รูปที่ 4.3b สัญญาณ SPR เมื่อชั้น ไดอิเล็กตริกคือชั้นของน้ำ และ โลหะเงินมีความหนา 80 nm จาก การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM	13
รูปที่ 4.4a สัญญาณ SPR เมื่อชั้น ไดอิเล็กตริกคือชั้นของน้ำ และ โลหะเงินมีความหนา 100 nm จาก การทดลอง	15
รูปที่ 4.4b สัญญาณ SPR เมื่อชั้น ไดอิเล็กตริกคือชั้นของน้ำ และ โลหะเงินมีความหนา 100 nm จาก การวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM	15

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการทางการตรวจสอบข้อมูลและการประมวลผลข้อมูลโดยใช้ออปติคัลประกอบเกี่ยวกับแสงได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีการสร้างเซนเซอร์ทางแสง (optical sensor) ที่มีความสามารถทั้งการตรวจจับข้อมูลที่เป็น และประมวลผลข้อมูลโดยใช้หลักการของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีกว่าเซนเซอร์ชนิด non-optical sensor ในด้านของ ความไวมากกว่า ใช้ประโยชน์ได้มากกว่า และไม่มีผลกระทบทางการแทรกสอดกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น (non-electromagnetic interference) มีขนาดเล็ก [1]. เซนเซอร์ทางแสงชนิดนี้อาศัยหลักการของ surface plasmon resonance (SPR) เป็นสำคัญในขณะทำงาน โดยการกระตุ้นให้เกิด surface plasmons ที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นไดอิเล็กตริกที่ต้องการทดสอบ [2].

เซนเซอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการของ surface plasmon resonance (SPR) ได้รับความนิยมมาก เนื่องจาก SPR technology เป็นชนิด label-free-optical detection technology เซนเซอร์ชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านการตรวจจับชีวโมเลกุล (bio-molecular detection) [3-4] งานทางด้านการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างชีวโมเลกุล (interactions between different biomolecules) [5-6] และงานทางการแพทย์สำหรับตรวจโรค (detection of disease) [7-8] โดย gold based SPR biosensors ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Kretschmann [9] ได้รับความนิยมสูงสุด เนื่องจากโลหะทองเป็นโลหะมีตระกูล (noble metal) ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดต่อการเกิด SPR แต่ในปัจจุบัน พบว่าโลหะมีตระกูลชนิดอื่น เช่น เงิน และทองแดง ได้ถูกนำมาใช้แทนที่โลหะทอง เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าโลหะทอง สำหรับโลหะเงินนั้นได้รับความนิยมมากกว่าทองแดง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีกว่าทองแดง ในปัจจุบันพบว่ามีการนำ surface plasmon wave ไปใช้ใน งานวิจัยทางการตรวจวัดปริมาณสารละลายกลูโคส (glucose sensor) [10-11]. นอกจากนี้เรายังสามารถทำการปรับแต่งพื้นผิวของโลหะเงินให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อการตรวจวัดชีวโมเลกุลได้อีกด้วย

สำหรับการตรวจจับสัญญาณ SPR นั้น เราสามารถตรวจจับได้โดยการใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแสง เช่น photo detector หรือ laser detector โดยสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้จะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวสำหรับโมเลกุลแต่ละชนิด เราเรียกสัญญาณ SPR นี้ว่า ค่าการสะท้อนกลับของแสง (R) เมื่อเราวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าว เราจะสามารถบ่งบอกถึงการมีอยู่ของชีวโมเลกุลใดๆได้ นอกจากนี้การจำลองผลภาพของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะ-ชั้นไดอิเล็กตริกในขณะที่เกิดปรากฏการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

surface plasmon resonance หลังจากถูกกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดแสงชนิด p-polarized ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์สัญญาณ SPR ได้อีกด้วย

ก่อนที่จะมีการสร้างชุดทดลองทางแสงนี้ สิ่งหนึ่งที่นิยมทำกัน คือการจำลองผลของสนามไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นที่รอยต่อที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำ (metal - dielectric interface) ขณะเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance โดยแสงตกกระทบเป็นชนิด TM mode ทำมุมตกกระทบปริซึมด้วยค่ามุมต่างๆกัน ด้วยวิธีด้วยวิธี finite element method (FEM) โดยใช้โปรแกรมซึ่งสนับสนุนวิธี FEM ดังกล่าวนี้ พร้อมกับวิเคราะห์ค่ามุมตกกระทบที่ทำให้ความเข้มแสงต่ำสุด สะท้อนออกจากปริซึม (Reflection) โดยในการวิเคราะห์ผล จะมีการเปลี่ยนความหนาของโลหะเงินเป็น 3 ความหนา ดังนี้ 60 nm, 80 nm และ 100 nm ตามลำดับ

หลังจากนั้น เราจะทำการสร้างระบบต้นแบบของเซนเซอร์ทางแสงอย่างง่ายชนิด Kretschmann configuration ต้นแบบอย่างง่ายนี้จะมีราคาไม่แพง โดยเราใช้โลหะเงินซึ่งหาซื้อได้ง่าย มีราคาที่ถูกกว่าโลหะทองเป็นอย่างมากและทำการทดลองเพื่อหาค่าความหนาของโลหะเงินที่เหมาะสมที่สุดต่อการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance และใช้แสงกระตุ้นเป็นแหล่งกำเนิดแสงสีแดงความยาวคลื่น 632.8 nm ซึ่งเป็นแสงที่หาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และใช้ laser detector เป็นตัวตรวจจับความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากปริซึม ซึ่งความเข้มแสงนี้สามารถบ่งบอกถึงค่าการสะท้อนกลับต่ำสุดของแสงที่ออกจากปริซึมได้ และยืนยันผลการทดลองที่ได้กับผลภาพที่ได้จากการจำลองการกระตุ้นทางแสงแบบ Kretschmann configuration โดยในการทดลอง จะมีการเปลี่ยนความหนาของโลหะเงินเป็น 3 ความหนา ดังนี้ 60 nm, 80 nm และ 100 nm ตามลำดับ ด้วยเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สร้างต้นแบบของระบบเซนเซอร์ทางแสงที่ทำงานด้วยหลักการ Surface plasmon resonance

1.2.2 ศึกษาการทำงานของต้นแบบโดยวัดค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาจากปริซึม เมื่อได้รับแสงกระตุ้นที่ทำมุมตกกระทบค่าต่างๆ และใช้โลหะเงินเป็นสารเคลือบผิวเซ็นเซอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างต้นแบบของระบบเซนเซอร์ทางแสงที่ทำงานด้วยหลักการ Surface plasmon resonance

1.3.2 ศึกษาการทำงานของต้นแบบโดยวัดความเข้มของแสงสะท้อนออกจากปริซึม (Light intensity) ที่มุมตกกระทบต่างๆ (ระหว่าง $\theta = 30^\circ$ ถึง $\theta = 80^\circ$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาหลักการของ Surface plasmon resonance
- 1.4.2 สร้างแบบจำลองของเซ็นเซอร์ทางแสง เพื่อวิเคราะห์ผลของปรากฏการณ์ Surface plasmon resonance ที่รอยต่อระหว่างโลหะเงินกับไดอิเล็กตริกของน้ำ เมื่อมีแสงตกกระทบเซ็นเซอร์ ที่มุมต่างๆ (ระหว่าง $\theta = 30^\circ$ ถึง $\theta = 80^\circ$) โดยเปลี่ยนความหนาของโลหะเงินเป็น 3 ความหนา ดังนี้ 60 nm, 80 nm และ 100 nm ตามลำดับ พร้อมกับวิเคราะห์ค่าความเข้มแสงต่ำสุดที่สะท้อนออกจากปริซึม (Reflection)
- 1.4.3 สร้างต้นแบบของเซ็นเซอร์อย่างง่าย โดยใช้ปริซึม BK7 เป็นฐาน และทำการเคลือบโลหะเงินหนา 60 nm ที่ผิวปริซึมนี้
- 1.4.4 ทดลองวัดค่าความเข้มของแสงสะท้อนนออกมาจากปริซึม (Light Intensity) ที่มุมตกกระทบต่างๆ (ระหว่าง $\theta = 30^\circ$ ถึง $\theta = 80^\circ$) และบันทึกผล
- 1.4.5 ทำซ้ำข้อ 1.4.3 และ 1.4.4 โดยใช้ปริซึม BK7 เป็นฐาน เช่นเดิม และทำการเคลือบโลหะเงินหนา 80 nm ที่ผิวปริซึมนี้
- 1.4.6 ทำซ้ำข้อ 1.4.3 และ 1.4.4 โดยใช้ปริซึม BK7 เป็นฐาน เช่นเดิม และทำการเคลือบโลหะเงินหนา 100 nm ที่ผิวปริซึมนี้
- 1.4.7 เขียนรายงานสรุปการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

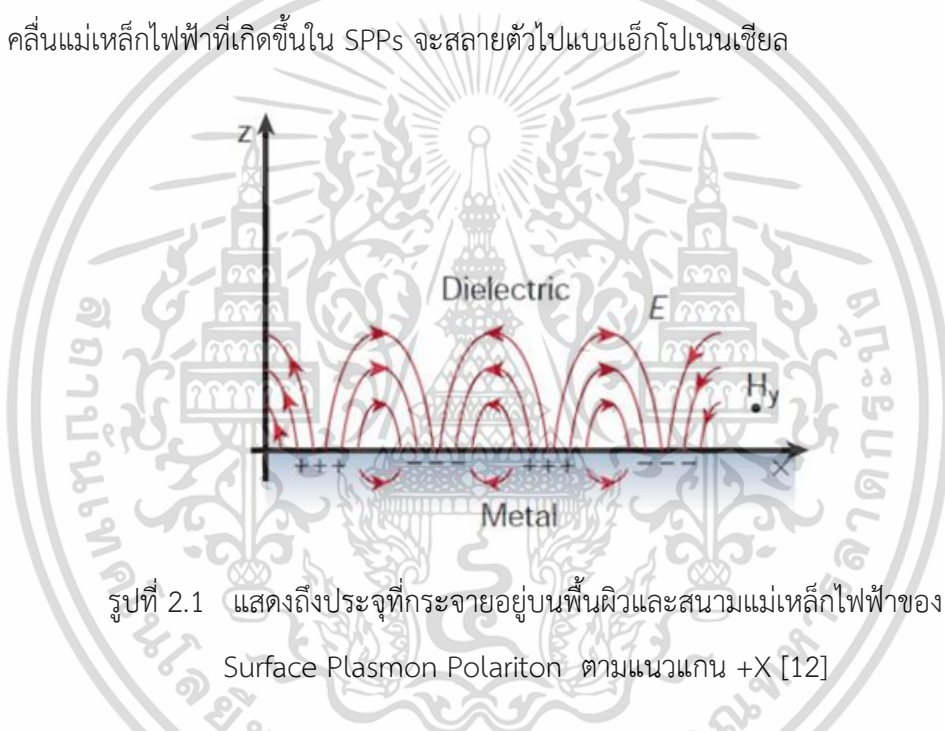
- 1.5.1. ได้รับความรู้ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance บนชั้นฟิล์มโลหะเงิน
- 1.5.2. สามารถวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะเงินความหนาต่าง ๆ กับชั้นไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำ ในกรณีที่มีแสงชนิด TM mode ตกกระทบปริซึมที่มุมตกกระทบต่างๆ ได้
- 1.5.3. สามารถสร้างต้นแบบอย่างง่ายของระบบเซ็นเซอร์แสง ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของ Surface Plasmon Resonance ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาการเคลื่อนที่ผิวพลาสมอน

Surface plasmons (SPs) หรือที่รู้จักอีกชื่อหนึ่งคือ surface plasmon polariton (SPPs) คือ ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง metal-dielectric interface เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความถี่เหมาะสมจะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสนี้ การกระตุ้นนี้ทำให้อิเล็กตรอนในแถบตัวนำเกิดการสั่น ดังในรูปที่ 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใน SPPs จะสลายตัวไปแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 2.1 แสดงถึงประจุที่กระจายอยู่บนพื้นผิวและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Surface Plasmon Polariton ตามแนวแกน +X [12]

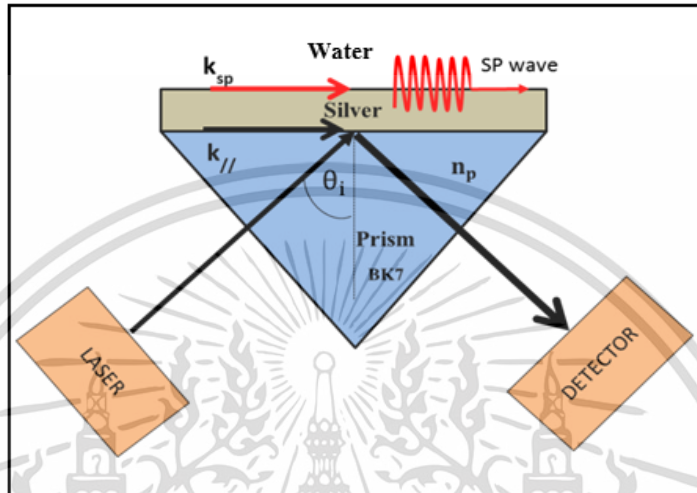
การกระตุ้นให้เกิด Surface plasmons ทำได้โดยการใช้แสงขาวให้ตกกระทบปริซึมเพื่อทำให้เฟสของแสงที่ตกกระทบผิวสัมผัสตรงกับเฟสของคลื่นผิวพลาสมอน โดยงานวิจัยในระยะแรกๆ Otto และ Kretschmann ได้สร้างชุดกระตุ้นให้เกิด surface plasmon และทำการตรวจจับแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับหมด (Attenuated total reflection, ATR) ที่อ่อนกำลังลงจนมีความเข้มแสงต่ำสุดสะท้อนออกมาจากปริซึมนั้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆที่ใช้เกรตติงเลี้ยวเบนและ optical waveguides ในการกระตุ้นให้เกิด surface plasmons อีกด้วย

สำหรับวิธีการกระตุ้นคลื่นผิวพลาสมอนที่นิยมใช้ทั่วไป คือวิธีการจัดแสงแบบ “Kretschmann configuration” โดยให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงยิงผ่านปริซึม และตกกระทบกับฟิล์มบางของโลหะซึ่งเคลือบอยู่บนปริซึม และแสงสะท้อนเข้าสู่ตัวตรวจจับแสง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยฟิล์มบางของโลหะที่สามารถเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์เซอร์เฟส พลาสมอน เรโซแนนซ์ ได้คือโลหะมีตระกูล เช่น ทอง เงิน เป็นต้น โดยที่ความหนาของชั้นฟิล์มบางของโลหะโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 50-70 นาโนเมตร เงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟสพลาสมอน เรโซแนนซ์ คือค่าเลขคลื่น (k_x) ของแสงตกกระทบในแนวขนานกับพื้นผิวโลหะต้องมีขนาดเท่ากับเลขคลื่นของคลื่นผิวพลาสมอน (k_{sp})



รูปที่ 2.2 การเกิด Surface Plasmon excitation ที่พื้นผิว เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงตกกระทบปริซึมในรูปแบบของ Kretschmann

แสงประเภท TM-polarized incident light ที่ตกกระทบบริเวณผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางชั้นไดอิเล็กตริกและชั้นตัวนำไฟฟ้า(Metal) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนขึ้นตามแนวพื้นผิวและจะเคลื่อนที่ไปตามแนวของชั้นโลหะนำไฟฟ้า (บริเวณที่คลื่นผิวพลาสมอนเคลื่อนที่จะอยู่ระหว่างชั้นผิวโลหะกับชั้นตัวกลางไดอิเล็กตริก) ทั้งนี้คลื่นผิวพลาสมอนจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของมุมตกกระทบและความยาวคลื่นตกกระทบ เป็นไปตามสมการ

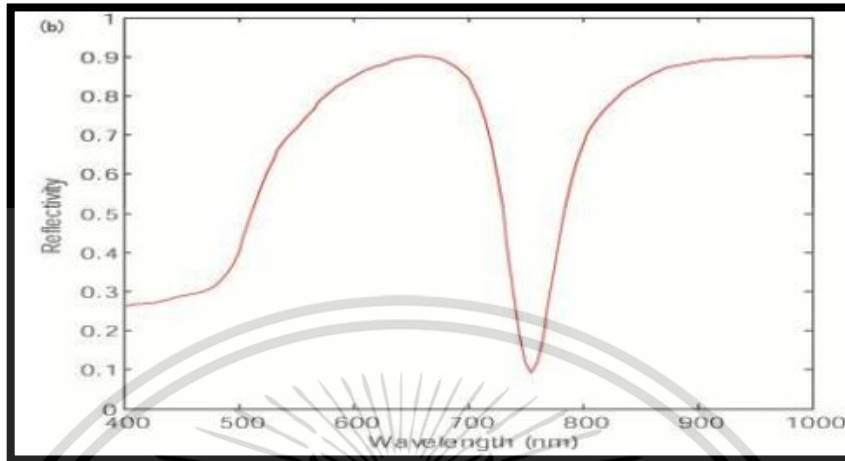
$$k_{sp} = k_x = k_0 n_p \sin\theta \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยที่ k_{sp} คือ เลขคลื่นของคลื่นผิวพลาสมอน
 n_p คือ ดัชนีหักเหของปริซึม

ภายใต้เงื่อนไขของสมการนี้ พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนที่ตกกระทบจะถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนในชั้นโลหะนำไฟฟ้า และส่งผลให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนขึ้นมา โดยคลื่นนี้จะเป็น Transverse magnetic (TM) waves สามารถตรวจจับได้ด้วยตัวตรวจจับแสง ที่มุมตกกระทบของแสงกระตุ้นเท่ากับมุมเรโซแนนซ์ ดังในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.3 โดยคลื่นที่สะท้อนออกมาหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสของโฟตอนตกกระทบ ตรงกันกับเฟสของ surface plasmon wave



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกมาจากระบบ Surface Plasmon Resonance [13]

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง และ θ คือ มุมตกกระทบ การสลายตัวไปของคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อของตัวกลาง จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงตกกระทบ หลังจากที่แก้สมการแมกซ์เวลล์สำหรับ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ ϵ_d และ ϵ_m พบว่าจะเกิดความสัมพันธ์ดังในสมการที่ 2.2 ดังนี้ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้น

$$\frac{k_{z1}}{\epsilon_m} + \frac{k_{z2}}{\epsilon_d} = 0 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.2}$$

ภายใต้เงื่อนไขของสมการนี้ พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนที่ตกกระทบจะถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนในชั้นโลหะนำไฟฟ้า และส่งผลให้เกิด Surface plasmon wave ขึ้นมา เราสามารถเขียน dispersion relation ของ surface plasmon wave ที่เกิดขึ้นนี้ได้ว่า

$$k_{sp} = k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.3}$$

เมื่อ ω และ k_{sp} คือ ความถี่พลาสมอน และ เวกเตอร์คลื่นพลาสมอน ตามลำดับ

เมื่อแสงชนิด p-polarized incident light ตกกระทบปริซึมด้วยมุม θ_i จะมีการสะท้อนกลับด้วยมุมสะท้อนเท่ากับ θ_i เช่นกัน โดยค่าการสะท้อนกลับของแสงจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อมุมตกกระทบของแสงเท่ากับมุมเรโซแนนท์ ในขณะที่เกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance และตรวจจับได้จากตัวรับแสง ดังนั้นค่าการสะท้อนกลับของแสงจึงเป็นสัญญาณ SPR ชนิดหนึ่ง จากสมการ Fresnel ซึ่งอธิบายว่า เมื่อแสงชนิด p-polarized light ตกกระทบลงบนตัวกลางทั้ง 3 ชนิดด้วยมุมตกกระทบ θ โดยตัวกลางชนิดที่ 1 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริซึม ตัวกลางชนิดที่ 2 คือ ชั้นของฟิล์มบางโลหะ ซึ่งในงานวิจัยนี้เราได้ใช้โลหะเงิน 99.99% ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกซ์ของโลหะเงิน (relative permittivity; ϵ) ทั้งค่าจริงและค่าจินตภาพดังนี้ $\epsilon = \epsilon_{real} + i\epsilon_{imag}$ และตัวกลางชนิดที่ 3 คือ ชั้นของไดอิเล็กทริก เช่น อากาศ น้ำ หรือสารละลายใดๆ เป็นต้น ดังนั้นค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance, R) เป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$R = |r_{123}|^2 = \left| \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2ik_{z2}d)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(2ik_{z2}d)} \right|^2 \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.4}$$

d คือ ความหนาของชั้นฟิล์มบางโลหะ (โดยปกติ ความหนาจะมีหน่วยเป็น nm)

r_{123} คือ ค่าการสะท้อนกลับในตัวกลางชนิดที่ 1 ชนิดที่ 2 และชนิดที่ 3 ตามลำดับ โดยสามารถคำนวณ r_{ik} หรือที่เราเรียกกันว่า Fresnel coefficients ได้จากสูตรดังนี้

$$r_{ik} = \frac{\left(\frac{k_{zi}}{\epsilon_i} - \frac{k_{zk}}{\epsilon_k} \right)}{\left(\frac{k_{zi}}{\epsilon_i} + \frac{k_{zk}}{\epsilon_k} \right)} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.5}$$

k_z คือ เลขคลื่นในองค์ประกอบแกน z

ϵ คือ ค่า relative permittivity ของตัวกลางแต่ละชนิด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะเงินที่มีความหนาต่าง ๆ กับชั้นไดอิเล็กตริกของน้ำ สำหรับส่วนที่สอง จะเป็นการสร้างต้นแบบของระบบเซ็นเซอร์ทางแสงชนิด Kretschmann configuration ที่ใช้ปริซึมเป็นฐาน และใช้โลหะเงินเป็นสารเคลือบบนผิวของปริซึม ดังนี้

3.1 การสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์

เนื่องจากการกระตุ้นทางแสงเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance จะต้องทำให้ k-vector ของแสงกระตุ้นที่ตกกระทบปริซึม มีค่าเท่ากับ k-vector ของ surface plasmon wave (SP wave) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กตริกของน้ำ ดังนั้นในงานวิจัยของเรานี้ จึงออกแบบโมเดลการกระตุ้นทางแสงแบบ kretschmann configuration ซึ่งเป็นวิธีกระตุ้นทางแสงอย่างง่ายวิธีหนึ่ง โดยทำการออกแบบให้ปริซึมซึ่งมีค่าดัชนีหักเหสูง ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางโลหะเงิน ที่มีความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าของ surface plasmon wave ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กตริกของน้ำ ด้วยวิธี finite element method (FEM) โดยใช้โปรแกรมที่สนับสนุนวิธี FEM ดังกล่าวนี้

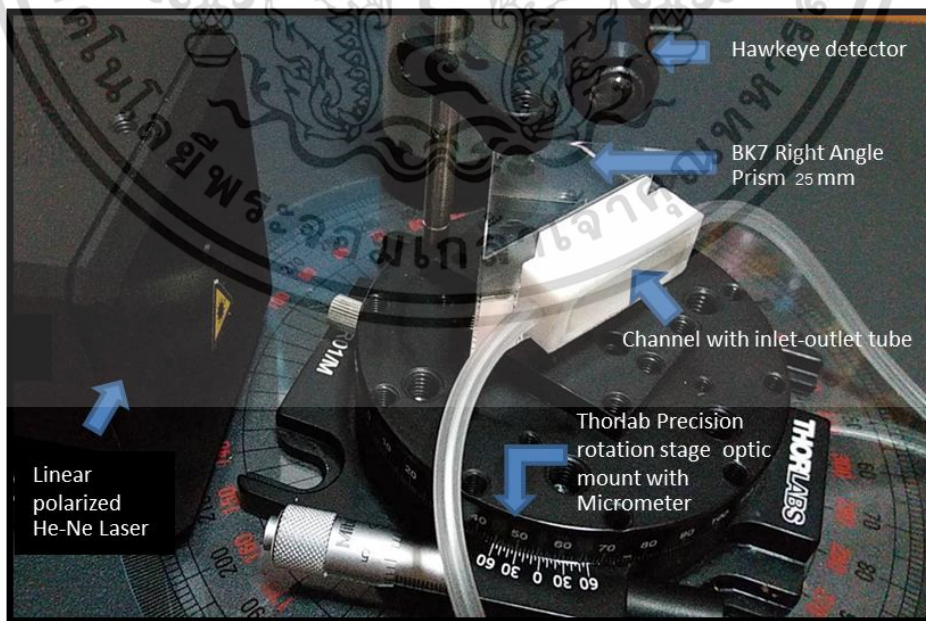
จากนั้นเรากำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้โมเดลของเรามีการกระตุ้นทางแสงเป็นไปตามเงื่อนไขของ dispersion relation ซึ่งจะทำให้ค่า k-vector ของแสงชนิด p-polarized (TM mode) ที่ตกกระทบปริซึมเท่ากับ k-vector ของ SP wave เมื่อแสงซึมผ่าน (penetrated) เข้าไปในโลหะเงินได้ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระภายในโลหะเกิดการควบคู่ (coupling) กับแสงกระตุ้นชนิดนี้ เมื่อมุมตกกระทบของแสงเท่ากับ resonance angle หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Attenuated Total Reflection angle (θ_{ATR}) จะทำให้องค์ประกอบในแนวขนานของ k-vector ของแสงกระตุ้น ตรงกัน กับ k-vector ของ SP wave ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กตริกของน้ำ ณ ขณะนี้ แสงจะส่งผ่านพลังงานของมันให้กับอิเล็กตรอนในโลหะ กลายเป็นพลังงานพลาสมอน โดยไม่เกิดการสะท้อนกลับของแสงไปยังปริซึม ส่งผลให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอน (SP wave) เคลื่อนที่ไปตามแนวขนานรอยต่อระหว่างชั้นโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กตริกของน้ำ ดังกล่าว

โดยเราทำการกำหนดค่ามุมตกกระทบเป็นหลายๆค่า เริ่มตั้งแต่ 30 องศา จนถึง 80 องศา โดยเพิ่มค่ามุมทีละ 0.03 องศา เพื่อสังเกตค่ามุมตกกระทบที่ทำให้เกิด surface resonance wave และกำหนดให้แหล่งกำเนิดแสงเป็นชนิด TM mode ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 632.8 nm และความหนาของฟิล์มบางโลหะเงินเท่ากับ 60 nm, 80 nm และ 100 nm ตามลำดับ

3.2 การสร้างต้นแบบอย่างง่ายของระบบเซ็นเซอร์ทางแสง

ระบบต้นแบบของเซ็นเซอร์ทางแสงอย่างง่ายชนิด Kretschmann configuration ที่ถูกสร้างขึ้น เราได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงสีแดงชนิด p-polarized (Linear polarized He-Ne Laser) ซึ่งมีความยาวคลื่น 632.8 nm เป็นแสงกระตุ้นซึ่งเป็นแสงที่หาซื้อได้ง่าย และใช้ detector เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ SPR และเราจะใช้ Thorlab Precision rotation stage optic mount with Micrometer เพื่อเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบของแสง (θ_i) ที่จะตกกระทบลงบนปริซึม สำหรับ SPR sensor ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยตัวกลาง 3 ชั้น ดังนี้ ตัวกลางชั้นที่หนึ่งคือ BK7 Right Angle Prism ขนาด 25 mm. ส่วนตัวกลางชั้นที่สองคือ ชั้นของฟิล์มบางโลหะเงินบริสุทธิ์ 99.99% โดยเราจะทดลองทั้งหมด 3 ค่าความหนา ดังนี้ คือ ความหนา 60 nm , 80 nm และ 100 nm ซึ่งถูกเคลือบลงบนผิวบนของปริซึมด้วยวิธี DC magnetron sputtering สำหรับตัวกลางชั้นที่ 3 คือชั้นของน้ำ เราบรรจุน้ำอยู่ใน channel ที่มีท่อไหลเข้า-ออก (inlet-outlet tube) โดย channel นี้ถูกยึดติดไว้กับปริซึม ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 และทำการตรวจจับสัญญาณ SPR ด้วย detector ซึ่งสัญญาณนี้จะแสดงถึงค่าการสะท้อนกลับของแสงจากปริซึมนั่นเอง หลังจากนั้นเราจะวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าวนี้และยืนยันผลการทดลองที่ได้โดยเปรียบเทียบกับผลภาพจากการจำลองการกระตุ้นทางแสงแบบ Kretschmann configuration ด้วยวิธีด้วยวิธี finite element method (FEM) โดยใช้โปรแกรมซึ่งสนับสนุนวิธี FEM ดังกล่าวนี้

เนื่องจากการกระตุ้นทางแสงเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance จะต้องทำให้ k-vector ของแสงกระตุ้นที่ตกกระทบปริซึม มีค่าเท่ากับ k-vector ของ surface plasmon wave (SP wave) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะกับชั้นไดอิเล็กตริกดังกล่าว ซึ่งทำให้เราสามารถตรวจจับสัญญาณ SPR ที่สะท้อนกลับออกมาจากปริซึมได้ โดยใช้ detector



รูปที่ 3.1 ชุดทดลอง SPR ในรูปแบบของ Kretschmann's configuration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

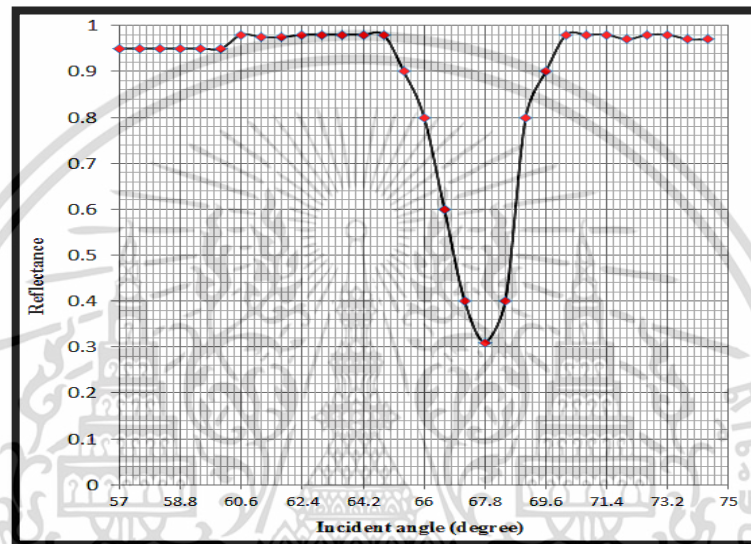
จากผลการทดลองครั้งที่ 1 เมื่อมีแสงประเภท p-polarized He-Ne Laser ซึ่งมีความยาวคลื่น 632.8 nm ตกกระทบปริซึมที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางโลหะเงินที่มีความหนา 60 nm ด้วยมุมตกกระทบต่างๆ โดยที่ชั้นไดอิเล็กทริกคือชั้นของน้ำ ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.33 เมื่อนำ detector ตรวจจับความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากปริซึม ที่มุมต่างๆ จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อม detector โดยหากความเข้มแสงที่ตรวจจับได้นี้ มีความเข้มแสงมาก จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์มาก ที่ detector และหากความเข้มแสงที่ตรวจจับได้นี้ มีความเข้มแสงน้อย จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ต่ำ ที่ detector ดังนั้นเราจึงสามารถนำค่าความต่างศักย์ที่วัดที่มุมต่างๆ หาค่ามุมเรโซแนนซ์ที่ทำให้แสงเกิดการสะท้อนกลับต่ำสุดได้ โดยการหาค่าอัตราส่วนระหว่างความต่างศักย์ที่วัดได้จากแสงที่ตกกระทบปริซึมกับความต่างศักย์ที่วัดได้จากแสงสะท้อนกลับจากปริซึมนั่นเอง ดังที่แสดงในตารางที่ 1 โดยความต่างศักย์ที่วัดได้จากแสงที่ตกกระทบปริซึม มีค่าเท่ากับ 0.875 volt

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม detector ที่มุมสะท้อนออกจากปริซึมค่าต่างๆ เมื่อโลหะเงินมีความหนา 60 nm

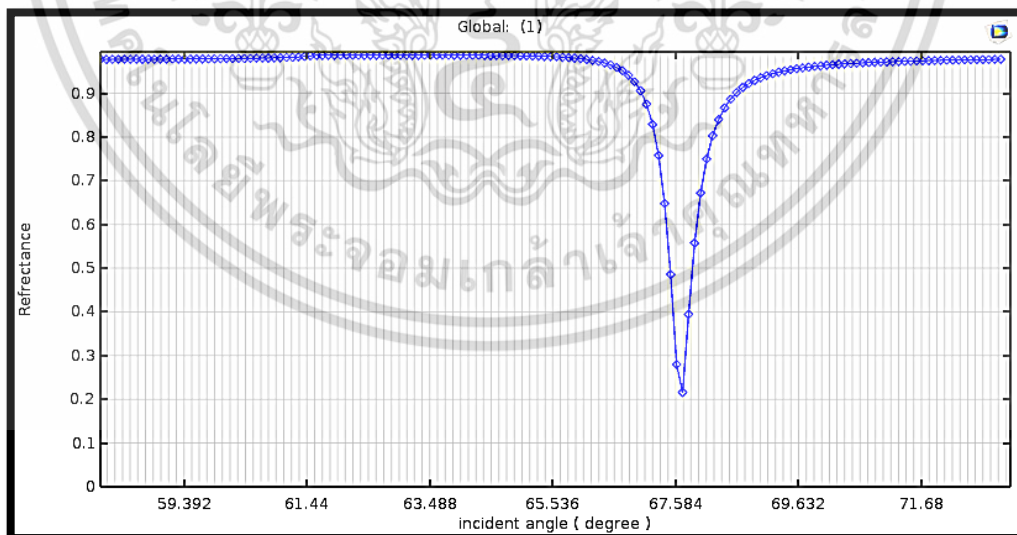
มุมสะท้อนกลับ (degree)	ความต่างศักย์ที่วัดได้ (Volt)	ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance)
64.2	0.8575	0.98
64.8	0.8575	0.98
65.4	0.7875	0.9
66.0	0.700	0.8
66.6	0.525	0.6
67.2	0.350	0.4
67.8	0.272	0.31
68.4	0.350	0.4
69.0	0.700	0.8
69.60	0.7875	0.9
70.2	0.8575	0.98
70.8	0.8575	0.98
71.4	0.8575	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราพบว่า ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อมุมตกกระทบปริซึมเท่ากับ 67.8 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1a ซึ่งใกล้เคียงกับผลภาพที่วิเคราะห์ด้วยวิธี finite element method ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่ามุมเรโซแนนซ์เท่ากับ 67.5 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1b นอกจากนี้ผลภาพของสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบางโลหะเงินกับชั้นไดอิเล็กทริกของน้ำ พบว่ามีแอมพลิจูดสนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.12×10^5 V/m ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นคลื่นที่ชัดเจน และมีความสม่ำเสมอตลอดผิวรอยต่อ ซึ่งบ่งบอกได้ถึงความเป็นสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอน



4.1a)



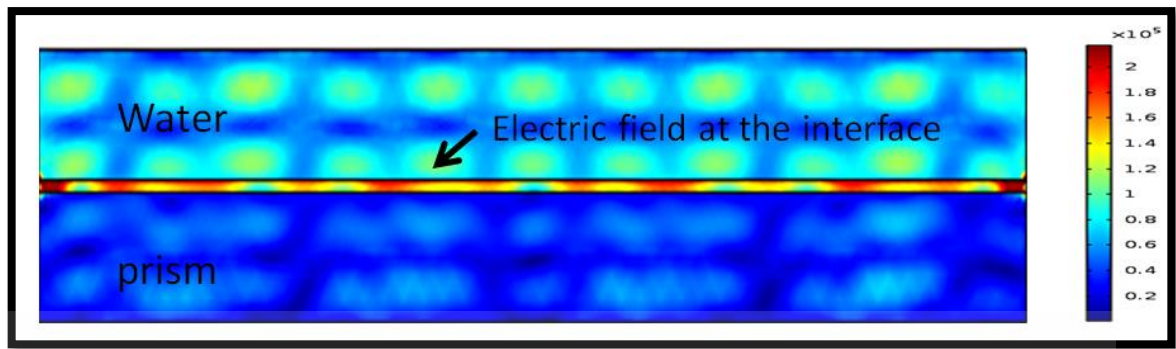
4.1b)

รูปที่ 4.1 สัญญาณ SPR เมื่อชั้นไดอิเล็กทริกคือชั้นของน้ำ และโลหะเงินมีความหนา 60 nm

4.1a) จากการทดลอง มุมตกกระทบของแสงเท่ากับ 67.8 องศา

4.1b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM มุมเรโซแนนซ์เท่ากับ 67.584 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงผลภาพของคลื่นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของน้ำกับ
ชั้นฟิล์มบางโลหะเงินความหนา 60 nm

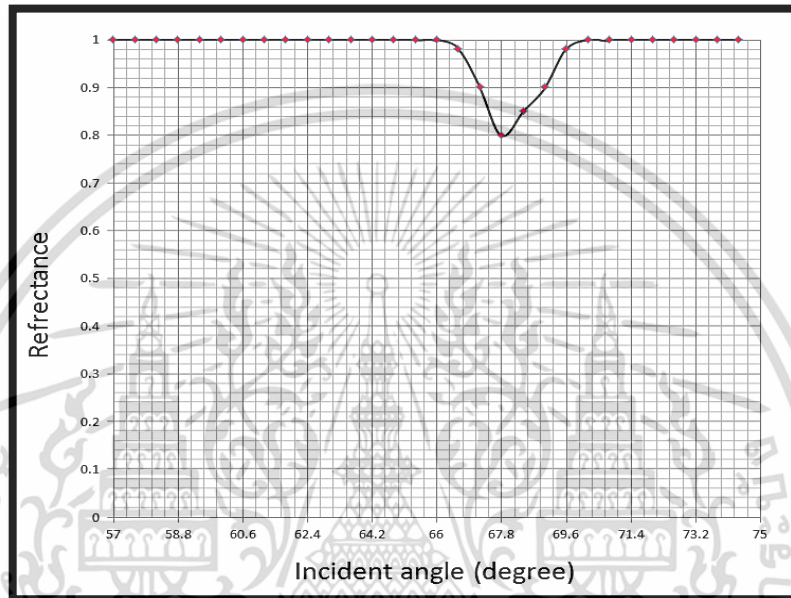
จากผลการทดลองครั้งที่ 2 เมื่อมีแสงประเภท p-polarized He-Ne Laser ซึ่งมีความยาวคลื่น 632.8 nm ตกกระทบปริซึมที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางโลหะเงินที่มีความหนา 80 nm เมื่อนำ detector ตรวจสอบความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากปริซึม ที่มุมต่างๆ จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อม detector ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 โดยความต่างศักย์ที่วัดได้จากแสงที่ตกกระทบปริซึม มีค่าเท่ากับ 0.875 volt เช่นเดิม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม detector ที่มุมสะท้อนออกจากปริซึมค่าต่างๆ เมื่อโลหะเงินมีความหนา 80 nm

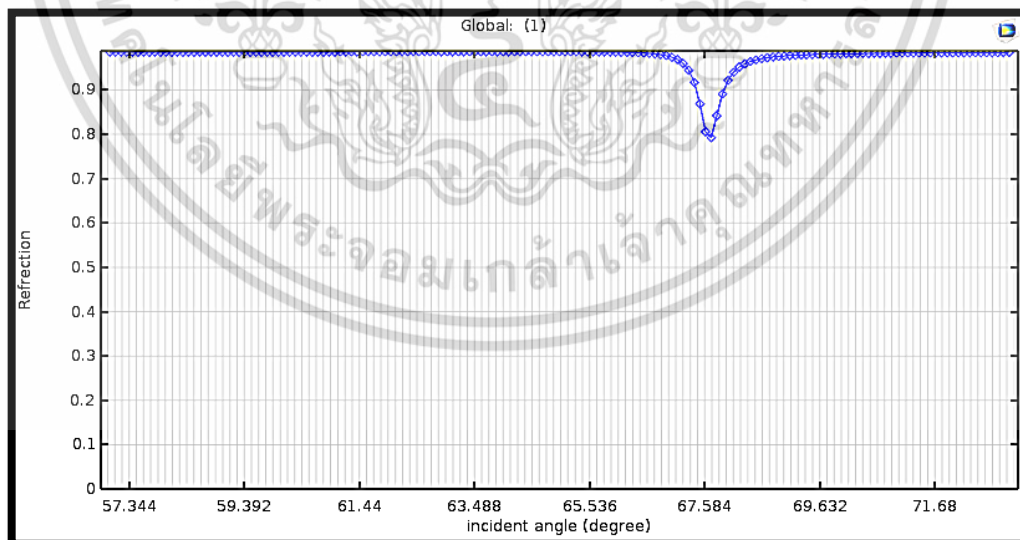
มุมสะท้อนกลับ (degree)	ความต่างศักย์ที่วัดได้ (Volt)	ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance)
64.2	0.875	1
64.8	0.875	1
65.4	0.875	1
66	0.875	1
66.6	0.8575	0.98
67.2	0.7875	0.9
67.8	0.700	0.8
68.4	0.744	0.85
69	0.7875	0.9
69.6	0.8575	0.98
70.2	0.875	1
70.8	0.875	1
71.4	0.875	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราพบว่าค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อนำ detector ตรวจจับแสงที่สะท้อนออกจากปริซึม มีค่าค่อนข้างมาก ทำให้ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) ที่คำนวณได้มีค่าสูงเท่ากับ 0.8 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3a ซึ่งใกล้เคียงกับผลภาพที่วิเคราะห์ด้วยวิธี finite element method ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3b ซึ่งบ่งบอกได้ว่าโลหะเงินที่มีความหนา 80 nm มีแนวโน้มที่จะไม่สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะเงินกับไดอิเล็กทริกของน้ำได้



4.3a)



4.3b)

รูปที่ 4.3 สัญญาณ SPR เมื่อชั้นไดอิเล็กทริกคือชั้นของน้ำ และโลหะเงินมีความหนา 80 nm

4.3a) จากการทดลอง

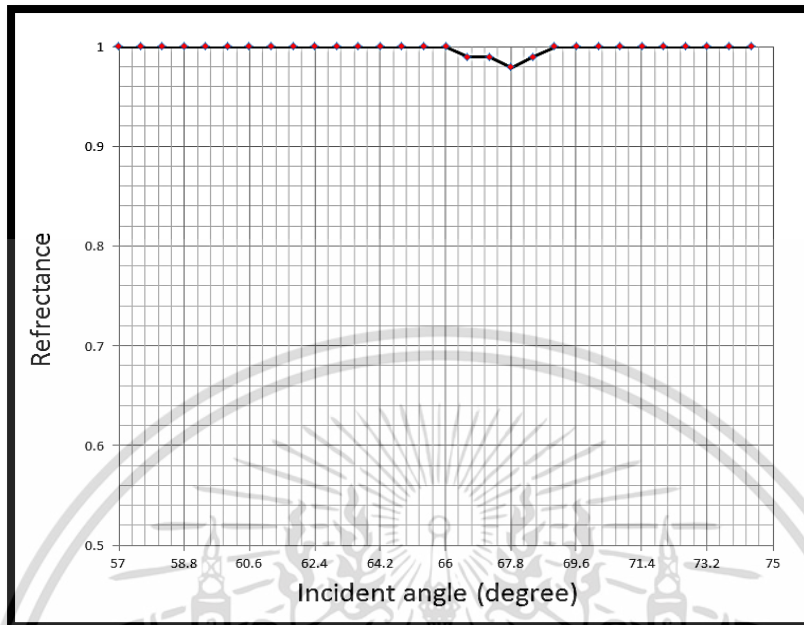
4.3b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

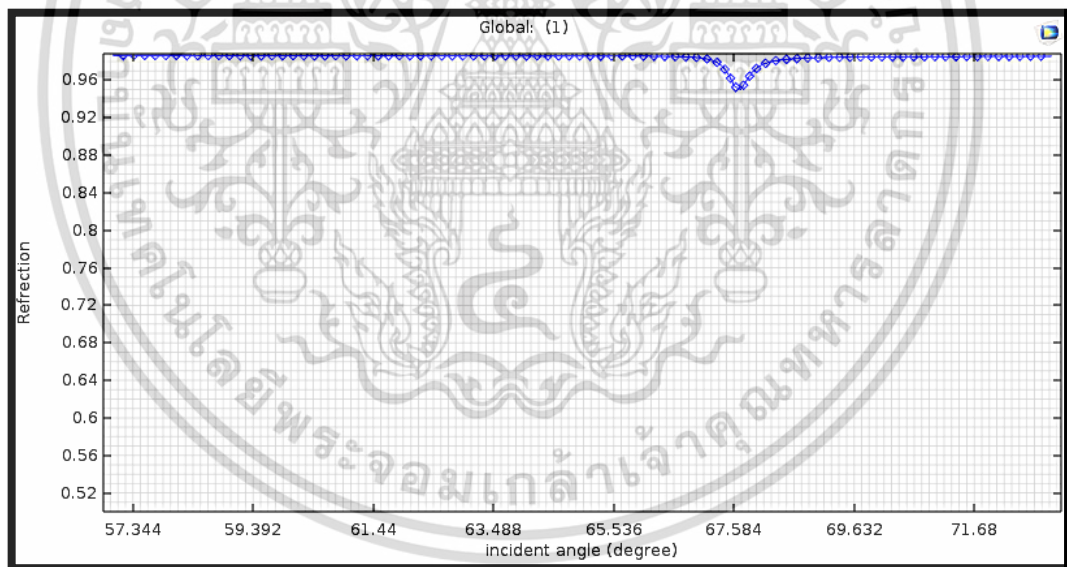
จากผลการทดลองครั้งที่ 3 เมื่อมีแสงประเภท p-polarized He-Ne Laser ซึ่งมีความยาวคลื่น 632.8 nm ตกกระทบปริซึมที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางโลหะเงินที่มีความหนา 100 nm เมื่อนำ detector ตรวจจับความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากปริซึม ที่มุมต่างๆ จะทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อม detector ดังที่แสดงในตารางที่ 4. 3 โดยความต่างศักย์ที่วัดได้จากแสงที่ตกกระทบปริซึม มีค่าเท่ากับ 0.875 volt เช่นเดิม ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อม detector ที่มุมสะท้อนออกจากปริซึมค่าต่างๆ เมื่อโลหะเงินมีความหนา 100 nm

มุมสะท้อนกลับ (degree)	ความต่างศักย์ที่วัดได้ (Volt)	ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance)
64.2	0.875	1
64.8	0.875	1
65.4	0.875	1
66	0.875	1
66.60	0.866	0.99
67.2	0.866	0.99
67.8	0.875	0.98
68.4	0.866	0.99
69	0.875	1
69.6	0.875	1
70.2	0.875	1
70.8	0.875	1
71.4	0.875	1

เราพบว่าค่าความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อนำ detector ตรวจจับแสงที่สะท้อนออกจากปริซึม มีค่าเกือบจะเท่ากับ ความต่างศักย์ 0.875 Volt ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จาก Hawkeye detector ในกรณีที่ตรวจจับแสงตกกระทบปริซึม ทำให้ค่าการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) ที่คำนวณได้มีค่าสูงมาก เท่ากับ 0.96 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4a ซึ่งใกล้เคียงกับผลภาพที่วิเคราะห์ด้วยวิธี finite element method ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4b ซึ่งบ่งบอกได้ว่าโลหะเงินที่มีความหนา 100 nm มีแนวโน้มที่จะไม่สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะเงินกับไดอิเล็กตริกของน้ำได้



4.4a)



4.3b)

รูปที่ 4.4 สัญญาณ SPR เมื่อชั้นไดอิเล็กทริกคือชั้นของน้ำ และโลหะเงินมีความหนา 100 nm

4.4a) จากการทดลอง 4.4b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในช่วงหลายปีมานี้ เทคนิค SPR ได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้าน biosensor application อย่างมาก โดยเฉพาะในขอบเขตงานที่เกี่ยวข้องกับ medical หรือ biology เนื่องจาก SPR biosensors ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในแง่ของความไวในการตรวจสอบชีวโมเลกุลต่างๆที่ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวโลหะ และสามารถบ่งบอกการมีอยู่ของชีวโมเลกุลนั้นได้ โดยโลหะเงินเป็นโลหะมีตระกูลอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก in the field of biomedical diagnostics

ในงานวิจัยนี้ เราได้ทำการสร้างระบบต้นแบบของเซนเซอร์ทางแสงอย่างง่ายชนิด Kretschmann configuration โดยเคลือบฟิล์มบางของโลหะเงินที่มีความหนา 60 nm , 80 nm และ 100 nm ด้วยวิธี RF magnetron sputtering ลงบนปริซึม BK7 ผลการทดลองวัดค่าความเข้มแสงที่สะท้อนกลับออกมา พบว่าระบบต้นแบบของเซนเซอร์ทางแสงที่ใช้โลหะเงินที่มีความหนา 60 nm ให้ค่าความเข้มแสงสะท้อนกลับต่ำสุด เข้าใกล้ศูนย์ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะเงินกับไดอิเล็กทริกของน้ำ โดยมุมเรโซแนนซ์ ณ ขณะนั้นมีค่าใกล้เคียงสอดคล้องกับผลที่วิเคราะห์ได้ด้วยสมการ Fresnel และสอดคล้องกับผลภาพของสนามไฟฟ้าคลื่นผิวพลาสมอนที่วิเคราะห์ด้วยวิธี FEM ซึ่งเกิดขึ้นที่มุมเรโซแนนซ์ที่ใกล้เคียงกันด้วยเช่นกัน ทำให้กล่าวได้ว่า ความหนา 60 nm เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านเป็นเซนเซอร์ตรวจจับชีวโมเลกุล ชนิดที่ต้องอาศัยหลักการของ surface plasmon resonance

ในขณะที่ระบบต้นแบบของเซนเซอร์ทางแสงที่ใช้โลหะเงินที่มีความหนา 80 nm และ 100 nm ให้ค่าความเข้มแสงสะท้อนกลับค่อนข้างสูง ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะเงินกับไดอิเล็กทริกของน้ำ ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าโลหะเงินที่มีความหนา 80 nm และ 100 nm ไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับชีวโมเลกุล ที่ต้องอาศัยหลักการของ surface plasmon resonance

เอกสารอ้างอิง

1. Grattan, K. T. V. and Meggitt, B. T. (eds), Optical fibre sensor technology, Chapman & Hall, London, (1995).
2. Raether, H., [Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings], Springer, New York, (1988).
3. Bhatta, D.; Stadden, E.; Hashem, E.; Sparrow, I.J.G.; Emmerson, G.D. Multi-purpose optical biosensors for real-time detection of bacteria, viruses and toxins. *Sens. Actuator. B* , 2010, 149, 233-238.
4. Guo L, Ferhan AR, Lee K, Kim DH., “Nanoarray-based biomolecular detection using individual Au nanoparticles with minimized localized surface plasmon resonance variations”, *Anal Chem.*, 2011;83(7):2605-12.
5. Patching, S.G. Surface plasmon resonance spectroscopy for characterization of membrane protein- Ligand interactions and its potential for drug discovery. *Biochim. Biophys. Acta* 2014, 1838, 43–55.
6. Bhattarai JK, Sharma A, Fujikawa K, Demchenko AV, Stine KJ. Electrochemical synthesis of nanostructured gold film for the study of carbohydrate—lectin interactions using localized surface plasmon resonance spectroscopy. *Carbohydr. Res.* 2015, 405: 55–65.
7. Liu R., Wang Q., Li Q., Yang X., Wang K., Nie W., “Surface plasmon resonance biosensor for sensitive detection of microRNA and cancer cell using multiple signal amplification strategy”, *Biosens Bioelectron.* 2017;87:433-438.
8. Mariani, S.; Minunni, M. Surface plasmon resonance applications in clinical analysis. *Anal. Bioanal. Chem.* 2014, 406, 2303–2323.
9. E. Kretschmann and H. Raether, “Notizen: Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light,” *Z. Natur. A* 23(12), 1968, 2315–2316.
10. J. Wang, S. Banerji, N. Menegazzo, W. Peng, Q. Zou, K. S. Booksh, "Glucose detection with surface plasmon resonance spectroscopy and molecularly imprinted hydrogel coatings", *Talanta*, 2011, vol. 86, pp. 133-141.
11. D. Li, D. Yang, J. Yang, Y. Lin, Y. Sun, H. Yu, and K. Xu, “Glucose affinity measurement by Surface plasmon resonance with borate polymer binding,” *Sens. Actuators A Phys.* 222, 2015, pp. 58–66.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Anker, J. N., Hall, W. P., Lyandres, O., Shah, N. C., Zhao, J. and Van Duyne, R. P., "Biosensing with plasmonic nanosensors," Nature Materials 7, 442-453 (2008).
13. Sharma, A. K, Jha, R. and Gupta, B. D., "Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review," IEEE Sensors 7(8), 1118-1129 (2007).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนภรณ์ สีลาวัฒนานนท์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Asst. Prof. Tanaporn Leelawattananon

หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ที่อยู่ เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 6212

โทรศัพท์มือถือ 089-131-5442

E-mail: tanaporn.le@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2540	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	สจล.กรุงเทพฯ
2548	ปริญญาโท	วท.ม.	เทคโนโลยีสารสนเทศ	สจล.กรุงเทพฯ

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

- a. โครงการวิจัยเรื่อง “การวัดความเร็วของพื้นผิวโดยใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมตรีแบบเลื่อนเฟส”
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน เงินรายได้ ประจำปี 2556
งบประมาณ 50,000 บาท

- b. โครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาต้นแบบของระบบส่งข้อมูลทางแสงแบบไร้สายสำหรับการใช้งานภายในอาคาร ”
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน เงินรายได้ ประจำปี 2557
งบประมาณ 50,000 บาท

- c. โครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาต้นแบบของระบบรับส่งข้อมูลทางแสงแบบสองทิศทางระยะใกล้”
ตำแหน่ง หัวหน้าโครงการวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน เงินรายได้ ประจำปี 2558
งบประมาณ 50,000 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d. โครงการวิจัยเรื่อง “การสร้างต้นแบบของระบบรับส่งข้อมูลเสียงและวีดิโอแบบเรียลไทม์ โดยใช้เลเซอร์ไดโอด”

ตำแหน่ง	หัวหน้าโครงการวิจัย
แหล่งทุนสนับสนุน	เงินรายได้ ประจำปี 2559
	งบประมาณ 50,000 บาท

ผลงานตีพิมพ์

1. Thanaporn Leelawattananon and Suphamit Chittayasothorn , **A Student-oriented Physics E-tutorial System**, Proceedings of the 9th WSEAS International on COMPUTERS 2005, July 11-16, 2005, Vouliagmeni, Athens, Greece.
2. Thanaporn Leelawattananon and Worakarn Neeyakorn, **Experimental Study of Visible Light Data Transferring System Based on High Power white LEDs**, Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering and Applied Science (ICEAS 2014), 2014, pp. 451-458, Dec.29-31, 2014, Hong Kong.
3. Tanaporn Leelawattananon, Warawoot Thowladda and Suphamit Chittayasothorn, **Surface roughness measurement application using multi-frame techniques**, International Conference on Computer Application Technologies (CCATS2015), 2015, pp.86-91, Aug 31-Sept 2, Matsue, Japan.
4. Tanaporn Leelawattananon and Suphamit Chittayasothorn, **A Prototype Full duplex Data Transfer System based on Red Laser Pointer Module**, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, Special issue : Advances in Digital Technologies (For The 7th International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT 2016) , Volume 282, pp. 137-147, Taiwan.
5. Tanaporn Leelawattananon ,Kitsakorn Locharoenrat and Suphamit Chittayasothorn, **Simulation of Copper Thin Film Thickness Optimization for Surface Plasmon using the Finite Element Method**, Proceedings of the 7th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2017) ,2017, pp. 188-195, Spain.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)

ดร. วรการ นียากร

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)

Dr. Worakarn Neeyakorn

เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

4-4499-00004-39-5

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่อยู่

เลขที่ 3 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทรศัพท์มือถือ

091 991 4599

E-mail:

worakarn.ne@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
1999	ปริญญาตรี	B.S.	Physics	Lehigh University, USA
2006	ปริญญาเอก	Ph.D.	Physics	North Carolina State University, USA

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ผลงานตีพิมพ์

1. Thanaporn Leelawattananon and Worakarn Neeyakorn, **Experimental Study of Visible Light Data Transferring System Based on High Power white LEDs**, Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering and Applied Science (ICEAS 2014), 2014, pp. 451-458, Dec.29-31, 2014, Hong Kong.
2. S. Plaipichit, P. Buranasiri, R. Nuansri, W. Neeyakorn, **Multi high-order anisotropic self-diffraction in Cerium doped BaTiO₃ crystal** Proceedings. SPIE 8258, Organic Photonic Materials and Devices XIV Jan 21, 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้