

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics
เพื่อศึกษาการกระตุ้นของ surface plasmon
ที่บริเวณรอยต่อฟิล์มโลหะบาง
NUMERICAL SIMULATION WITH COMSOL
MULTIPHYSICS FOR STUDYING
THE EXCITATION OF SURFACE PLASMON IN METALIC
THIN FILM INTERFACE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics
เพื่อศึกษาการกระตุ้นของ surface plasmon
ที่บริเวณรอยต่อฟิล์มโลหะบาง
NUMERICAL SIMULATION WITH COMSOL
MULTIPHYSICS FOR STUDYING
THE EXCITATION OF SURFACE PLASMON IN METALIC
THIN FILM INTERFACE



T149335

ณัฐนิชา สมพละชัยยา
สุรกิจ คำพา
ปรมาภัส ตรีธรรกীরติ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149335
วัน เดือน ปี 12 ก.พ. 2561

12881452
b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL SIMULATION WITH COMSOL
MULTIPHYSICS FOR STUDYING
THE EXCITATION OF SURFACE PLASMON IN METALIC
THIN FILM INTERFACE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DAPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อศึกษาการกระตุ้นของ surface plasmon ที่บริเวณรอยต่อฟิล์มโลหะบาง

Numerical Simulation with COMSOL Multiphysics for Studying the Excitation of Surface Plasmon in Metallic Thin Film Interface

ชื่อนักศึกษา

นางสาวณัฐนิชา สมพละชัยยา

รหัสนักศึกษา 56051135

นายสุรภกิจ คำพา

รหัสนักศึกษา 56051233

นางสาวปรมาภัส ตรีธรรกิริติ

รหัสนักศึกษา 56051250

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ธนาภรณ์ สิวาพัฒนานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. กฤษกร ไฉ้เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ	
รศ. วิชาญ เตชิตธีระ กรรมการ	
ดร. พิษานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ กรรมการ	
ดร. วรการ นียากร กรรมการ	
อ. ธนาภรณ์ สิวาพัฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อศึกษาการกระตุ้นของ surface plasmon ที่บริเวณรอยต่อฟิล์มโลหะบาง	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐนิชา สมพละชัยยา	รหัสนักศึกษา 56051135
	นายสุรภกิจ คำพา	รหัสนักศึกษา 56051233
	นางสาวปรมาภัส ตรีธรรกิริติ	รหัสนักศึกษา 56051250
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเซนเซอร์ชนิดที่อาศัยหลักการของคลื่นผิวพลาสมอนได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจาก คลื่นผิวพลาสมอนสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับงานด้านการตรวจวัดทางชีวภาพ เช่น การพัฒนาของเซนเซอร์ของระบบภูมิคุ้มกัน, การพัฒนาทางยารักษาโรคเซนเซอร์ดีเอ็นเอและยังเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาอันตรกิริยาของสารชีวโมเลกุล ในโครงการนี้ได้สร้างแบบจำลองสำหรับศึกษาการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนประกอบด้วยชั้นของปริซึมที่จะเป็นตัวกลางในการรับแสงตกกระทบชนิด TE mode และ TM mode จากนั้นจะเป็นชั้นของโลหะบางที่เคลือบอยู่บนปริซึม ถัดไปจะเป็นชั้นของอากาศ ในโครงการนี้ได้กำหนดโลหะจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ทอง, เงิน และทองแดง ทำการจำลองผลการเกิดคลื่นผิวพลาสมอน เพื่อหาค่ามุมและค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศและค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศนั้น

คำสำคัญ: การจำลองคลื่นผิวพลาสมอน, แสงตกกระทบชนิด TE mode, แสงตกกระทบชนิด TM mode, เซนเซอร์ดีเอ็นเอ, โปรแกรมคอมโซล มัลติฟิสิกส์

Title	Numerical Simulation with COMSOL Multiphysics for Studying the Excitation of Surface Plasmon in Metallic Thin Film Interface	
Students	Miss Natnicha Sompalachaiya	Student ID56051135
	Mr. Surakit Kampa	Student ID56051233
	Miss Praramapat Treetornkeerathi	Student ID56051250
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2016	
Advisor	Lecturer Thanaporn Leelawattananon	

Abstract

Nowadays plasmon resonance sensors are becoming increasingly popular. Because surface plasmon resonance can be used for biometric applications such as the development of the immune system sensor, the development of drug therapies, the DNA sensor and also a tool for studying the interaction of biomolecules. In this project, we have created a model for studying the plasma wave at the joint between metal and air. For models used to study waveforms, include of a layer of prisms that be a medium for incident light TE modes and TM modes. Then it is a layer of thin metal coated on a prism. Next is the air layer. In this project, three types of metals are identified: gold, silver and copper. Simulate the effect of plasma wave to find the correct angular and wavelengths that produce plasma waves at the interface between the metal and the air and the electric field at the interface between the metal and the air.

Keywords: Surface plasmon wave simulation, TE mode, TM mode, DNA sensor, COMSOL Multiphysics

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้ประสบความสำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ด้วยดี เนื่องจากผู้ศึกษาค้นคว้าในการทำวิจัยครั้งนี้ได้รับความเมตตาและความกรุณา รวมถึงความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติจาก อาจารย์ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ ตลอดจนข้อเสนอแนะและข้อสงสัยต่างๆ เพื่อให้ตัวผู้ศึกษามีความรู้ความเข้าใจในสิ่งที่ทำการศึกษาค้นคว้าและสามารถนำความรู้ความเข้าใจมาต่อยอดในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งยังคงคอยชี้แนะแนวทางในการทำงานร่วมกับผู้อื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีการช่วยเหลือในด้านสนับสนุนให้มีความตรงต่อเวลา และเข้าใจถึงความคิดการใช้ชีวิตในสังคม

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์ และคณาจารย์สาขาวิชาหลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้คู่คุณธรรม ทั้งในส่วนด้านวิชาการ การช่วยเหลือ รวมถึงการทำงานร่วมกัน

ขอบคุณ เพื่อนนิสิตนักศึกษาและรุ่นพี่นิสิตนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาหลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือผู้ศึกษาค้นคว้าเป็นอย่างดี

การศึกษาค้นคว้าเพื่อจัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ ทำให้ผู้ศึกษาค้นคว้าได้รับความรู้ใหม่ๆ และการทำงานร่วมกับผู้อื่น และผู้ศึกษาค้นคว้าขอขอบโครงการพิเศษฉบับนี้เพื่อเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความกตัญญูต่อบิดา มารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณต่อผู้ศึกษาค้นคว้าทุกท่าน และผู้ศึกษาหวังว่าโครงการพิเศษฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เข้ามาศึกษาสืบต่อไป

ณัฐนิชา สมพละชัยยา
สุรภิจ คำพา
ปรมาภัส ตรีธรรกิริติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับคลื่นผิวพลาสมอน	3
2.2 ปรัชญาการเคลื่อนผิวพลาสมอน	7
2.3 Evanescent wave	10
2.4 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์	12
2.4.1 การแบ่งโครงสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์	12
2.5 ทฤษฎี dispersion relation	13
2.6 การหักเหของแสง	15
2.7 แสงประเภท TM mode และแสงประเภท TE mode	16
2.7.1 ทรานส์เวอร์สอิเล็กทริกเวฟ(Transverse Electric Wave: TE)	16
2.7.2 ทรานส์เวอร์สแมกเนตริกเวฟ (Transverse Magnetic Wave: TM)	17
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 ขอบเขตการวิจัย	19
3.2 การกำหนดค่า parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ของโลหะประเภททองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.	20
3.3 การสร้างและออกแบบการจำลอง	20
3.4 ขั้นตอนการกำหนดค่า Material ของโลหะประเภท ทองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.	21
3.5 การกำหนดข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์	22
3.5.1 กรณีกำหนด Port เป็นประเภท Periodic	22
3.5.2 กรณีกำหนด Port เป็นประเภท User defined	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	24
4.1 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ	24
4.2 ผล Simulation ของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมที่คำนวณได้จากทฤษฎี dispersion relation กับมุมที่ได้จากการ Simulate	51
4.3 กราฟที่ได้จากตารางบันทึกผลการทดลอง	71
4.3.1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	71
4.3.2 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	80
4.4 เปรียบเทียบผลจาก Simulation กับผลจากงานวิจัยที่อ้างอิง	86
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	87
5.1 สรุปผลการวิจัย	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางการดำเนินงาน	2
3.1 ตัวอย่างตารางค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ของโลหะประเภททองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.	20
3.2 ตารางค่า Material ของ Prism ของโลหะประเภททองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.	21
3.3 ตารางค่า Material ของ Air ของโลหะประเภททองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.	21
3.4 ตารางค่า Material ของ Metal ของโลหะประเภททองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.	21
4.1 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททอง	24
4.2 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภทเงิน	27
4.3 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททองแดง	30
4.4 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททอง	33
4.5 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภทเงิน	36
4.6 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททองแดง	39
4.7 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 0,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททอง	42
4.8 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 0,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภทเงิน	45
4.9 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มืองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 0,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททองแดง	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.10	แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม _{simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ของโลหะประเภททอง	51
4.11	แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม _{simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ของโลหะประเภทเงิน	54
4.12	แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม _{simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ของโลหะประเภททองแดง	57
4.13	แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม _{simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ของโลหะประเภททอง	61
4.14	แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม _{simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ของโลหะประเภทเงิน	64
4.15	แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม _{simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ของโลหะประเภททองแดง	67

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	คลื่นผิวพลาสมอนที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน ลูกศรแสดงเส้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวรอยต่อและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปตามทิศทาง Y	4
2.2	แสดงให้เห็นถึงการใช้ปริซึมโดย โครงสร้างของ (ก) Kretschmann และ โครงสร้างของ (ข) Otto	5
2.3	(ก) โครงสร้าง Kretschmann และ โครงสร้าง (ข) Otto แสดงแสงสะท้อนกลับที่อ่อนกำลังลงขณะที่เกิดคลื่นผิวพลาสมอน	5
2.4	การกระตุ้นของ surface plasmon โดยใช้โครงสร้าง Kretschmann	6
2.5	แสดงถึงประจุที่กระจายอยู่บนพื้นผิวและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Surface Plasmon Polariton ตามแนวแกน +X [1]	7
2.6	การเกิด Surface Plasmons excitation ที่พื้นผิว (ก) surface plasmon ถูกกระตุ้นด้วยแสงตกกระทบในปริซึมในรูปแบบของ Kretschmann (ข) แสดงถึงเฟสตรงกันระหว่างคลื่นแสงตกกระทบกับคลื่นผิวพลาสมอน	8
2.7	สเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกจากระบบ Surface Plasmon Resonance	9
2.8	แสดงให้เห็นถึงการสะท้อนกลับหมด โดยมุมที่เล็กกว่าคือมุมปกติ (สีแดง) และมุมที่ใหญ่กว่าคือ มุมที่สะท้อนกลับทั้งหมด (สีน้ำเงิน)	11
2.9	การสะท้อนกลับหมดของ plane wave ที่ฐานของปริซึม (ซ้าย), และการสะท้อนแสงเป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบ การสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นที่มุมวิกฤต ซึ่งก็คือ (ขวา) การสะท้อนกลับหมด [16]	11
2.10	การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย (ก) เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม และ (ข) เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม	12
2.11	การหักเหของแสงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด	15
2.12	คลื่นตกกระทบที่ทำให้เกิดมุมวิกฤต	16
2.13	Total Internal Refraction (TIR)	16
3.1	โมเดลการกระตุ้นพลาสมอนชนิดปริซึมคัปปลิง แบบ 2D	21
3.2	(ก) เมื่อแสงตกกระทบเป็นชนิด TM mode ; แสงตกกระทบจะมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน (x,y,0) ขณะตกกระทบปริซึม และ (ข) เมื่อแสงตกกระทบเป็นชนิด TE mode; แสงตกกระทบมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน (0,0,z) ขณะตกกระทบปริซึม	23
4.1	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	29
4.3	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	32
4.4	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	35
4.5	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	38
4.6	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	41
4.7	แสดงการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	44
4.8	แสดงการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	47
4.9	แสดงการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	50
4.10	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	53
4.11	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	57
4.12	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	63
4.14 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	67
4.15 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ	70
4.16 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.1 ของโลหะประเภท ทอง	71
4.17 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.2 ของโลหะประเภท เงิน	71
4.18 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.3 ของโลหะประเภท ทองแดง	72
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) กับ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	73
4.20 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.4 ของโลหะประเภท ทอง	74
4.21 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.5 ของโลหะประเภท เงิน	74
4.22 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.6 ของโลหะประเภท ทองแดง	75
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) กับ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	76
4.24 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.7 ของโลหะประเภท ทอง	77
4.25 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.8 ของโลหะประเภท เงิน	77
4.26 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.9 ของโลหะประเภท ทองแดง	78
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) กับ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น	79
4.28 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.10 ของโลหะประเภท ทอง	80
4.29 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.11 ของโลหะประเภท เงิน	80
4.30 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.12 ของโลหะประเภท ทองแดง	81
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) กับ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่นมุม แล้วเปลี่ยนค่าตกกระทบ	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.32	กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.13 ของโลหะประเภท ทอง	83
4.33	กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.14 ของโลหะประเภท เงิน	83
4.34	กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.15 ของโลหะประเภท ทองแดง	84
4.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) กับ ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่นมุม แล้วเปลี่ยนค่าตกกระทบ	85
4.36	แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง โดยกำหนดความหนาของโลหะเท่ากับ 52 nm ให้แสงตกกระทบที่มีความยาวคลื่น 632.5 nm	86



คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
SPR	Surface Plasmon resonance
ATR	Attenuated total reflection
TIR	การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection)
TM	Transverse magnetic
TE	Transverse electric



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ความต้องการทางการตรวจสอบข้อมูลและการประมวลผลข้อมูล โดยใช้อุปกรณ์ประกอบเกี่ยวกับแสงได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีการสร้าง เซนเซอร์ทางแสง (optical sensor) ที่มีความสามารถทั้งการตรวจจับข้อมูลที่จำเป็น และประมวลผลข้อมูลโดยใช้หลักการของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีข้อดีกว่าเซ็นเซอร์ชนิด non-optical sensor ในด้านของ ความไวมากกว่า ใช้ประโยชน์ได้มากกว่า ไม่มีผลกระทบทางด้าน การแทรกสอดกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น (non-electromagnetic interference) มีขนาดเล็ก เซนเซอร์ทางแสงชนิดนี้อาศัยหลักการของ surface plasmon resonance (SPR) เป็นสำคัญในขณะทำงาน โดยการกระตุ้นให้เกิด surface plasmons ที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับแฉกเปิดที่ต้องการตรวจสอบ

SPR-based biochemical sensors มีบทบาทสำคัญมากในการตรวจหาค่าดัชนีหักเหของตัวกลางใดๆ (dielectric medium เช่น buffer solution, real fluid) ที่ต้องการทราบค่า ในปัจจุบันมีการสร้างเซนเซอร์ประเภทนี้และใช้งานร่วมกับตัวกลางที่เป็นอนุภาคนาโนกันเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นตัวกลางที่เป็นอนุภาคนาโนซึ่งมีขนาดเล็กมาก จะมีความไวมากในการตรวจจับ ทางแสง โดย optical sensor ชนิดนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้าน biochemical application เพื่อตรวจหาโมเลกุลของสารที่มีน้ำหนักเบา ในอนาคตเราสามารถนำ Optical sensor ที่เป็นระบบสมบูรณ์แล้ว ไปงานร่วมกับอุปกรณ์ประเภท Microfluidic และ Optoelectronic devices ได้ ซึ่งนำไปสู่ความเป็น “lab on the chip” device

ก่อนที่จะมีการสร้างชุดทดลองทางแสงนี้ สิ่งหนึ่งที่นิยมทำกัน คือการจำลองผลของสนามไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นที่รอยต่อที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับแฉกเปิดที่ต้องการตรวจสอบ หลังจากที่มีแสงตกกระทบผิวรอยต่อนี้ ทั้งกรณีของแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มีมุมตกกระทบต่างๆกัน โดยเทคนิคการวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในโครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาและสร้างแบบจำลองการเกิด surface plasmon resonance ที่บริเวณรอยต่อดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อดูผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ทั้งกรณีที่มีแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มีมุมตกกระทบต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อนำความรู้ในเรื่องทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้ามาอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance ได้
- 2) ศึกษาการใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance อย่างง่ายได้

- วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศในทั้งกรณีที่มีแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มุมตกกระทบต่างๆ ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- เพื่อนำความรู้ในเรื่องทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้ามาอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance ได้
- ศึกษาการใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อสร้างแบบจำลองการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance อย่างง่ายได้
- วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศในทั้งกรณีที่มีแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มุมตกกระทบต่างๆ ได้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- ศึกษาหลักการการทำงานของโปรแกรม COMSOL Multiphysics
- ทำการออกแบบโครงสร้างของ SPR sensors อย่างง่าย
- วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศในทั้งกรณีที่มีแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มุมตกกระทบต่างๆ
- สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
	59	59	59	59	60	60	60	60	60
1. เสนอหัวข้อโครงการ									
2. ศึกษาข้อมูลการใช้โปรแกรม									
3. ลงมือทำโครงการ									
4. ทำเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้ทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปรากฏการณ์ surface plasmon resonance บนชั้นฟิล์มโลหะ
- วิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศในทั้งกรณีที่มีแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มุมตกกระทบต่างๆ ได้

บทที่ 2

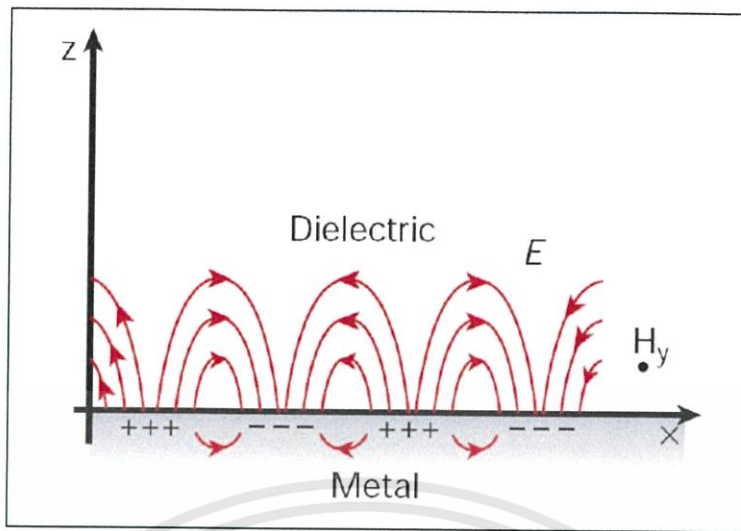
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คลื่นผิวพลาสมอนเป็นควอนตัมการสั่นแกว่งของกลุ่มพลาสมาที่บริเวณรอยต่อระหว่างฉนวนกับโลหะ มันสามารถถูกกระตุ้นโดยการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยโมเมนต์ของโพตอนตกกระทบ สอดคล้องตรงกับโมเมนต์ของคลื่นผิวพลาสมอน หรือที่เราเรียกว่า สภาวะ surface plasmon resonance (SPR) การกระตุ้นคลื่นผิวพลาสมอน หรือ surface plasmon polariton สามารถแพร่ขยายไปยังพื้นผิวระนาบโลหะ หรือบนอนุภาคนาโนโลหะหรือโครงสร้างนาโนแบบเฉพาะที่ สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำบนพื้นผิวโลหะจะค่อยๆลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลไปในตัวกลางทั้งคู่และก่อให้เกิด evanescent wave ขึ้น สนามเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวกลางไดอิเล็กทริก (dielectric) ที่ติดกับผิวโลหะ, การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยทางด้านคุณสมบัติทางแสงของตัวกลางไดอิเล็กทริก (dielectric) นี้ สามารถถูกวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยการตรวจวัดแบบเจาะจงได้

เซนเซอร์ชนิดที่อาศัยหลักการของ surface plasmon resonance ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น สเปกโตรสโคปีชนิด surface plasmon resonance สามารถตรวจวัดการยึดเกาะกันระหว่างอนาไลต์กับพื้นผิวโลหะโดยไม่ต้องติดฉลากใดๆ และสามารถที่จะตรวจวัดการยึดเกาะกันนี้แบบ real-time ได้ ประโยชน์ของการไม่ติดฉลาก จึงทำให้วิธีนี้เป็นประโยชน์สำหรับงานด้านการตรวจวัดทางชีวภาพ เช่น การพัฒนาของเซนเซอร์ของระบบภูมิคุ้มกัน, การพัฒนาทางยารักษาโรค, เซ็นเซอร์ดีเอ็นเอ และยังเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาอันตรกิริยาของสารชีวโมเลกุล ในปัจจุบันมีหลายบทความที่เกี่ยวกับคลื่นผิวพลาสมอนสเปกโตรสโคปีได้รับการตีพิมพ์

2.1 ความเป็นมาเกี่ยวกับคลื่นผิวพลาสมอน

Homola et al, และ Sharma et al ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับคลื่นผิวพลาสมอน ช่วงต้นปี 1907 และในปี 1909, Sommerfeld ได้แสดงสมการที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM) ที่พื้นผิวรอยต่อของตัวกลางชนิด loss-free และตัวกลางชนิด lossy กับพื้นผิวโลหะ โดยส่วนที่สำคัญคือส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เราสามารถใช้สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) เพื่ออธิบายการเกิดของ surface plasmon polariton ได้ดังในรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าระบบที่มีตัวกลางสองตัวกลาง ซึ่งก็คือฉนวนกับโลหะ เมื่อแสงกระทบที่ผิวหน้าระหว่างตัวกลางทั้งสองชนิด โมเมนต์เชิงเส้นของแสงจะมีคุณสมบัติอนุรักษ์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสองชนิด



รูปที่ 2.1 คลื่นผิวพลาสมอนที่รอยต่อระหว่างโลหะกับฉนวน ลูกศรแสดงเส้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวรอยต่อและสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปตามทิศทาง Y [1]

การใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ทำให้เกิดความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างค่า relative permittivity และองค์ประกอบตั้งฉากของเวกเตอร์คลื่นของสนามไฟฟ้าในตัวกลางทั้งสองชนิด ดังนี้

$$\frac{\epsilon_d}{k_{dz}} = -\frac{\epsilon_m}{k_{mz}} \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.1}$$

— โดย k_{dz} และ k_{mz} คือองค์ประกอบในแนวแกน z ของเวกเตอร์คลื่นที่แพร่เข้าไปในตัวกลางไดอิเล็กทริก (dielectric) และในโลหะ ตามลำดับ

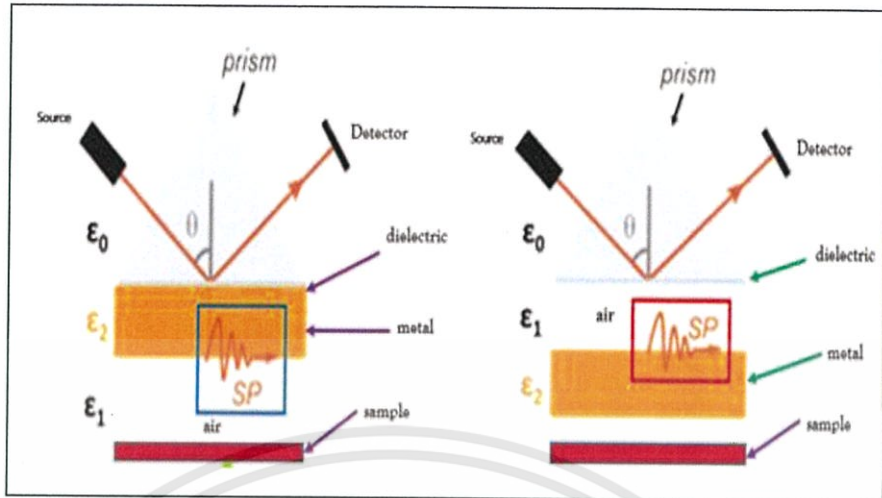
การใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) จะมีการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขต โดยทำให้เวกเตอร์คลื่นของ surface plasmon polariton (k_{spw}) เกี่ยวข้องกับเวกเตอร์คลื่นโฟตอนตกกระทบ (k) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวกลางไดอิเล็กทริก (ϵ_d) และฟิล์มโลหะ (ϵ_m) ดังต่อไปนี้

เส้นโฟตอนจะอยู่ทางด้านซ้ายของเส้นโค้งการกระจาย SP (SP dispersion) ที่ทุกค่าความถี่ ซึ่งหมายความว่า มันไม่สามารถเป็นไปได้ที่แสงจะกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณผิวโลหะจากการส่องแสงโดยตรง มีเงื่อนไขอื่นอีกสองข้อที่จะต้องเกิดขึ้นพร้อมกันเพื่อกระตุ้น SPs บนพื้นผิวระนาบโลหะ ซึ่งโลหะต้องมีค่าจริงของค่าคงที่ฉนวนเป็นเครื่องหมายลบ

1. โฟตอนตกกระทบจะต้องมีองค์ประกอบในแนวแกน z ของเวกเตอร์คลื่นไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากแสง p-polarized มีสนามไฟฟ้าในระนาบตกกระทบและเวกเตอร์คลื่นตั้งฉากกับพื้นผิว, มันสามารถกระตุ้น surface plasmon บนพื้นผิวระนาบได้

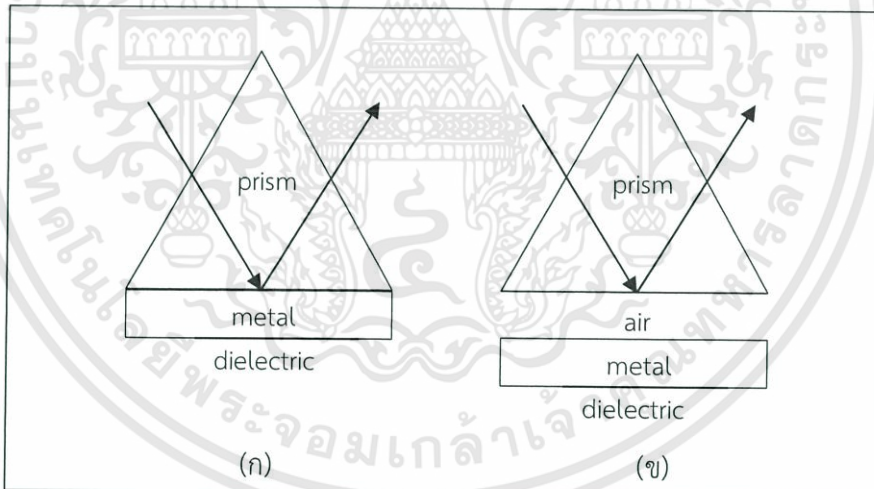
2. โมเมนตัมของโฟตอนตกกระทบ จะต้องถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนพื้นผิวบางอย่างหรือการตั้งค่าแสงบางอย่าง ยกตัวอย่างเช่น การทำให้โฟตอนผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มโมเมนตัมของโฟตอนได้ เวกเตอร์คลื่นของแสงสามารถเพิ่มขึ้นได้ n เท่า เมื่อแสงผ่านทะลุตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงการใช้ปริซึมโดย (ก) โครงสร้างของ Kretschmann [2] และ (ข) โครงสร้างของ Otto [3]

โครงสร้าง Kretschmann แผ่นสไลด์แก้วที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มทองบางจะถูกนำมาผนึกติดกับปริซึมที่มีดัชนีหักเหสูง คลื่นผิวพลาสมอนถูกทำให้เกิดขึ้น เมื่อแสงซึ่งตกกระทบปริซึมด้วยมุมที่สูงกว่ามุมวิกฤตทะลุผ่านเข้าไปในฟิล์มทอง และเกิดการสะท้อนภายในทั้งหมด



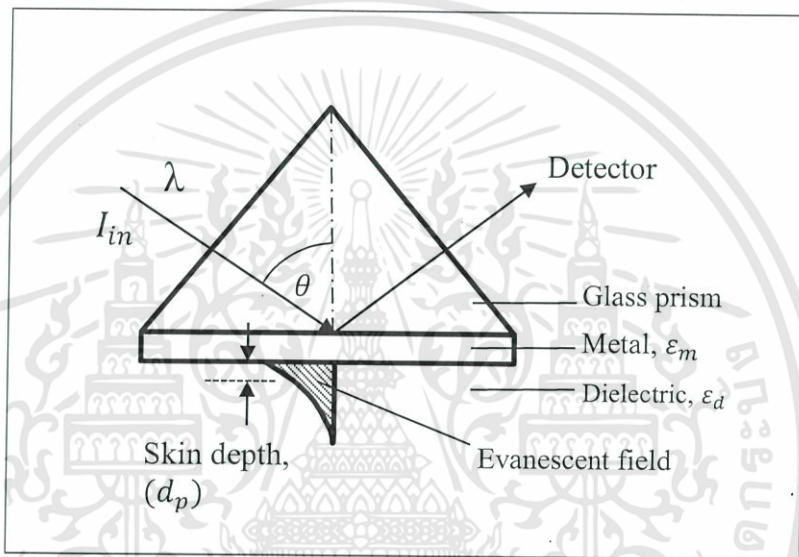
รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้าง Kretschmann และ (ข) โครงสร้าง Otto แสดงแสงสะท้อนกลับที่อ่อนกำลังลงขณะที่เกิดคลื่นผิวพลาสมอน

โครงสร้างของ Kretschmann เป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาใช้งาน เพราะว่าโครงสร้างนี้มีความเรียบง่ายต่อการผลิต เนื่องจากเป็นส่วนแรกของ BIAcore SPR instrument[4] สำหรับระบบ SPR นี้ โดยทั่วไปเชื่อกันว่าจะให้ผลที่ดีที่สุดที่จะนำไปสู่คุณสมบัติพิเศษในการวิเคราะห์ ultra-thin organic, biopolymer หรือ biomolecular films เนื่องจากความสามารถในการ label-free, real time, and ultra-sensitive measurements ทางไบโอเคมีจึงได้นำเทคนิคนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ characterize biological surface และการเกิดปฏิกิริยาผิวสัมผัสระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 โมเลกุล ตัวอย่างเช่น antibody-antigen binding [5-6], DNA hybridization, [7-9] และ protein-DNA interaction [10-13]

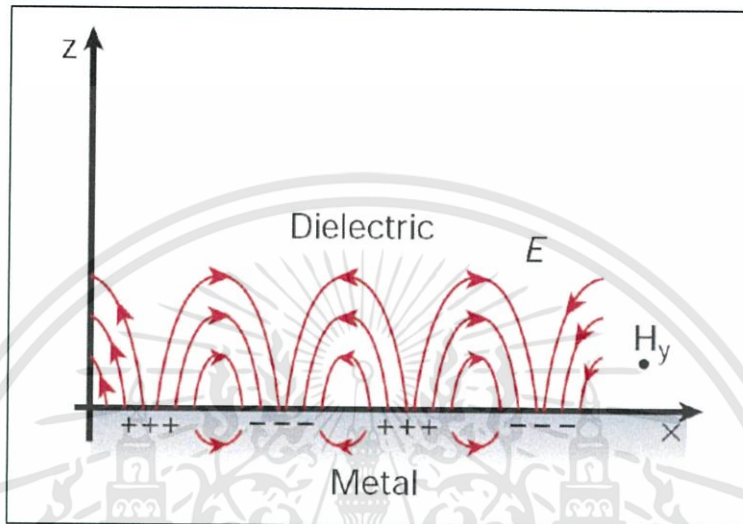
สำหรับรูปแบบการติดตั้ง SPR ที่นิยมมากที่สุด จะประกอบด้วยปริซึมที่ถูกเชื่อมต่อแบบโครงสร้าง Kretschmann ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ภายในจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่เด่นๆ คือ ส่วนแรกจะเป็นปริซึมชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหสูงที่สุด และนำไปเชื่อมกับลำแสงโพตอน ส่วนถัดไปจะเป็นชั้นของโลหะบางที่มีความหนาประมาณ 50 nm สัมผัสกับปริซึม ซึ่งแผ่นโลหะบางจะใช้ทองคำ(gold, Au) เนื่องจากทองคำมีความเสถียรภาพสูง ถึงแม้ว่าเงิน(silver, Ag)จะให้ผลดีที่สุดกับระบบ SPR ก็ตาม และชั้นที่สามจะเป็นชั้นของไดอิเล็กทริก (dielectric) ที่จะคอยตรวจสอบและเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหในระหว่างการทดลอง



รูปที่ 2.4 การกระตุ้นของ surface plasmon โดยใช้โครงสร้าง Kretschmann [14]

2.2 ปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอน

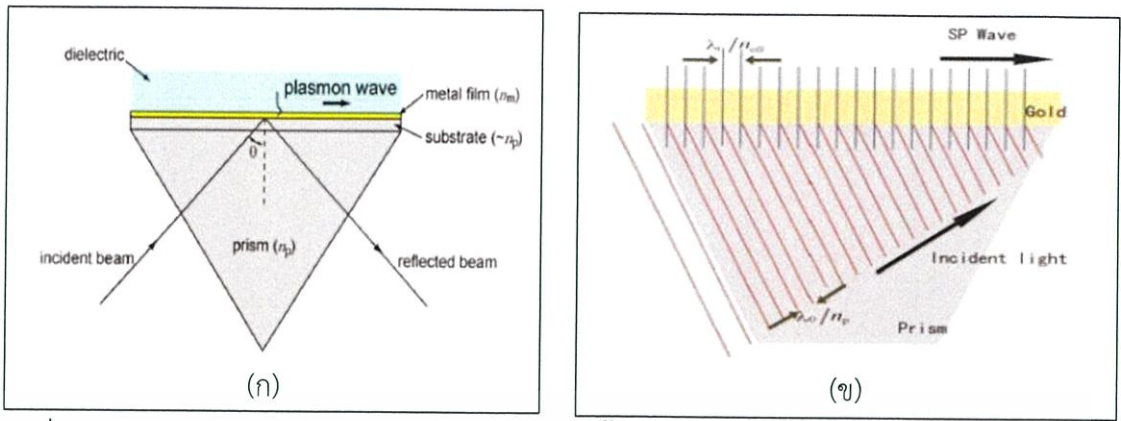
Surface plasmons (SPs) หรือที่รู้จักอีกชื่อหนึ่ง คือ surface plasmon polariton (SPPs) คือ ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง metal-dielectric interface เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีความถี่เหมาะสม จะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชั้นที่บริเวณผิวสัมผัสนี้ การกระตุ้นนี้ทำให้อิเล็กตรอนในแถบตัวนำเกิดการสั่น ดังในรูปที่ 2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใน SPPs จะสลายตัวไปแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 2.5 แสดงถึงประจุที่กระจายอยู่บนพื้นผิวและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Surface Plasmon Polariton ตามแนวแกน +X [1]

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

สำหรับการตรวจจับ ATR ของ Kretschmann นั้น จะตรวจจับโดยใช้ Microscope เลื่อนตำแหน่งเป็นมุมต่างๆ ดังในรูปที่ 2.6 โดยใช้หลักการตรวจจับดังนี้ เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห มากกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห น้อยกว่า และแสงนั้นตกกระทบผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดนี้ด้วยมุมมากกว่ามุมวิกฤต แสงจะเกิดการสะท้อนกลับหมด เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Total Internal Reflection (TIR) และ TIR จะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งขึ้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดนี้ เรียกว่า evanescent electromagnetic field ขนาดแอมพลิจูดของคลื่นจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางระหว่างผิวสัมผัส โดยระยะทางที่ evanescent wave เคลื่อนที่เข้าไปได้เรียกว่า penetration depth ซึ่งระยะทางนี้มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น



รูปที่ 2.6 การเกิด Surface Plasmons excitation ที่พื้นผิวระหว่างรอยต่อสองรอยต่อ

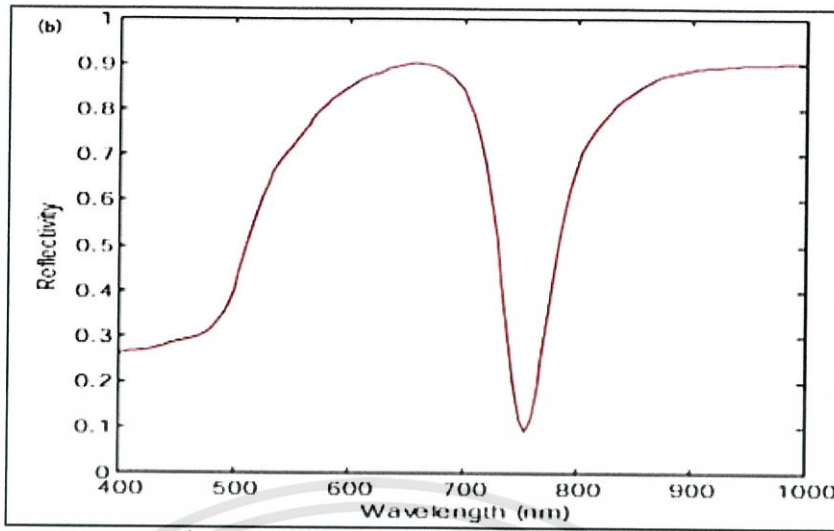
- (ก) คลื่น surface plasmon ถูกกระตุ้น ด้วยแสงตกกระทบในปริซึมในรูปแบบของ Krestchmann
- (ข) แสดงถึงเฟสตรงกันระหว่างคลื่นแสงตกกระทบกับคลื่นผิวพลาสมอน

แสงประเภท TM-polarized incident light ที่ตกกระทบบริเวณผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางชั้นไดอิเล็กทริก (dielectric) และชั้นตัวนำไฟฟ้า (metal) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จะกระตุ้นให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนขึ้นตามแนวพื้นผิวและจะเคลื่อนที่ไปตามแนวของชั้นโลหะนำไฟฟ้า (บริเวณที่คลื่นผิวพลาสมอนเคลื่อนที่จะอยู่ระหว่างชั้นผิวโลหะกับชั้นตัวกลางไดอิเล็กทริก) ทั้งนี้คลื่นผิวพลาสมอนจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของมุมตกกระทบและความยาวคลื่นตกกระทบ เป็นไปตามสมการ

$$k_{\text{plasmon}} = k_x = k_0 n_p \sin\theta \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.2}$$

โดยที่ k_{plasmon} คือ เลขคลื่นของคลื่นผิวพลาสมอน
 n_p คือ ดัชนีหักเหของปริซึม

ภายใต้เงื่อนไขของสมการนี้ พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนที่ตกกระทบจะถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนในชั้นโลหะนำไฟฟ้า และส่งผลให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนขึ้นมา โดยคลื่นนี้จะเป็น Transverse magnetic (TM) waves และส่วนที่เป็น Transverse electric (TE) wave จะถูกสะท้อนกลับออกมา 100% ซึ่งคลื่นที่สะท้อนออกมาหมดนี้จะให้สเปกตรัมของแสงที่สามารถตรวจจับได้ด้วย microscope ที่มุ่มมุ่มหนึ่ง ดังในรูปที่ 2.7 โดยคลื่นที่สะท้อนออกมาหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสของโฟตอนตกกระทบตรงกันกับเฟสของ surface plasmon wave



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกมาจากระบบ Surface Plasmon Resonance [15]

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง และ θ คือ มุมตกกระทบ การสลายตัวของคลื่นผิวพลาสมอน ที่บริเวณรอยต่อของตัวกลาง จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงตกกระทบ หลังจากที่แก้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด ด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ϵ_d และ ϵ_m พบว่าจะเกิดความสัมพันธ์ดังในสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังนี้ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดขึ้น

$$\frac{k_z1}{\epsilon_m} + \frac{k_z2}{\epsilon_d} = 0 \dots\dots\dots\text{สมการที่ 2.3}$$

$$k_x^2 + k_{zi}^2 = \epsilon_i \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \text{ สำหรับ } i = 1 \text{ และ } 2 \dots\dots\dots\text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง

ดังนั้น ความสัมพันธ์แบบ dispersion relationship ที่เป็นที่รู้จักกันสำหรับการแพร่ของคลื่นไปตามพื้นผิว จะเกิดขึ้นจากการแก้สมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังนั้น ความสัมพันธ์การแพร่ของคลื่นผิวพลาสมอนไปตามพื้นผิวรอยต่อระหว่าง metal-dielectric interface จะเป็นไปตามสมการที่ 2.5

$$k_{\text{plasmon}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}$$

หรือ

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \dots\dots\dots\text{สมการที่ 2.5}$$

เมื่อ ω และ k_{sp} คือ ความถี่พลาสมอน และ เวกเตอร์คลื่นพลาสมอน ตามลำดับ คลื่นผิวพลาสมอน จะไม่สามารถถูกกระตุ้นได้โดยตรงที่บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง รอยต่อของชั้นโลหะ (metal) กับ ไดอิเล็กทริก (dielectric) เนื่องจากความสัมพันธ์ตามสมการ dispersion relation

ดังนั้นคลื่นผิวพลาสมอนควรจะถูกระตุ้นให้มีการเพิ่มขึ้นของเวกเตอร์คลื่นของแสงตกกระทบโดยใช้ปริซึม ดังที่แสดงในโครงสร้างแบบ Kretschmann และ โครงสร้างแบบ Otto

เมื่อแสงไปตกกระทบบนที่ปริซึม จะทำให้เกิด evanescent wave และมีเวกเตอร์คลื่นมากขึ้น คลื่นผิวพลาสมอนจะถูกระตุ้นที่บริเวณรอยต่อ โลหะ-อากาศ เพราะเป็นบริเวณที่มีเฟสคลื่นตรงกัน และจะเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ระหว่างเวกเตอร์คลื่นของ ปริซึม-โลหะ บริเวณรอยต่อระหว่าง โลหะ-อากาศ

เวกเตอร์คลื่นสามารถพิจารณาได้จากแสงตกกระทบด้วยมุม θ_i และมีการสะท้อนกลับด้วยมุมสะท้อนเท่ากับ θ_r เช่นกัน ความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับ (R) สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.6 หรือที่เราเรียกว่าสมการของ Fresnel สำหรับแสงตกกระทบชนิด P-polarized บนตัวกลางทั้ง 3 ชนิดด้วยมุมตกกระทบ θ_i โดยค่าคงที่ได้คือเลขทริกของโลหะ สามารถคำนวณได้จากค่าจริงและค่าจินตภาพของ permittivity $\epsilon_2 = \epsilon_{2real} + i\epsilon_{2imag}$ สำหรับค่าการสะท้อนกลับของแสง (R) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 ดังนี้

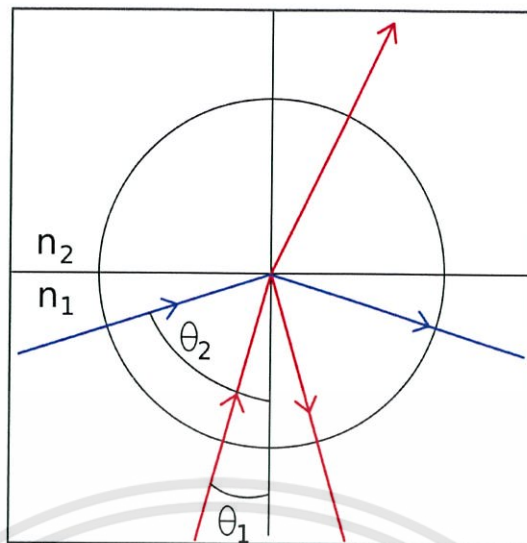
$$R = \frac{|r_{123}|^2}{|1 + r_{12}r_{13} \exp(2ik_2d)|^2} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.6}$$

2.3 Evanescent wave

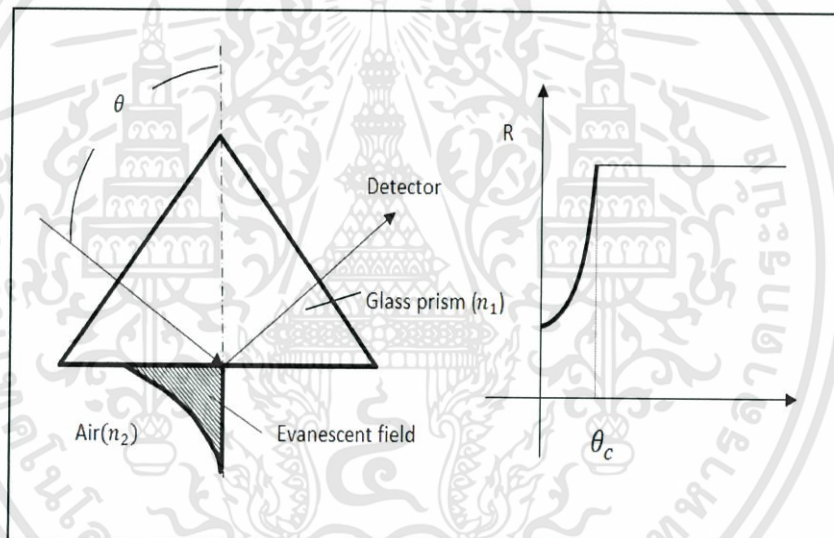
Evanescent wave แนวคิดของการสะท้อนกลับหมดถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรก การสะท้อนทั้งหมดเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางมีค่าดัชนีหักเหสูงไปยังตัวกลางมีค่าดัชนีหักเหต่ำ ตามกฎของสเนล เมื่อแสงผ่าน 2 ตัวกลางคือ 1 และ 2 ดังในรูปที่ 2.8 ดัชนีการหักเหของแสง n_1 และ n_2 โดยที่ $n_1 > n_2$, ที่มุมตกกระทบ θ_c เกิดการสะท้อนกลับหมด ดังในรูปที่ 2.9 การตรวจสอบที่ละเอียดมากขึ้นของการแผ่กระจายของสนามไฟฟ้าในพื้นที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวตัวกลางทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่า เมื่อแสงตกกระทบด้วยมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต ความเข้มชั้นแสงไม่ได้ตกไปยังศูนย์ทันทีในตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แต่จะมีการแทนที่ด้วยคลื่นฮาร์โมนิกที่เดินทางแบบขนานไปยังพื้นผิวหน้าด้วยความกว้างของคลื่นที่น้อยลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลไปยังพื้นผิวหน้า โดยความลึกในการทะลุทะลวงเท่ากับ I ดังสมการ 2.7

$$I = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{(n_1 \sin \theta)^2 - 1} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.7}$$

และพบว่าลำดับของครึ่งความยาวคลื่นของแสง คลื่นนี้จะถูกเรียกว่า evanescent wave การเปลี่ยนคุณสมบัติของตัวกลางไดอิเล็กทริก(เช่น การเปลี่ยนค่าดัชนีหักเห) ในบริเวณที่ติดกับพื้นผิวโลหะจะมีผลต่อสนามนี้ด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงการสะท้อนกลับหมด โดยมุมที่เล็กกว่าคือมุมปกติ (สีแดง) และมุมที่ใหญ่กว่าคือ มุมที่สะท้อนกลับทั้งหมด (สีน้ำเงิน)

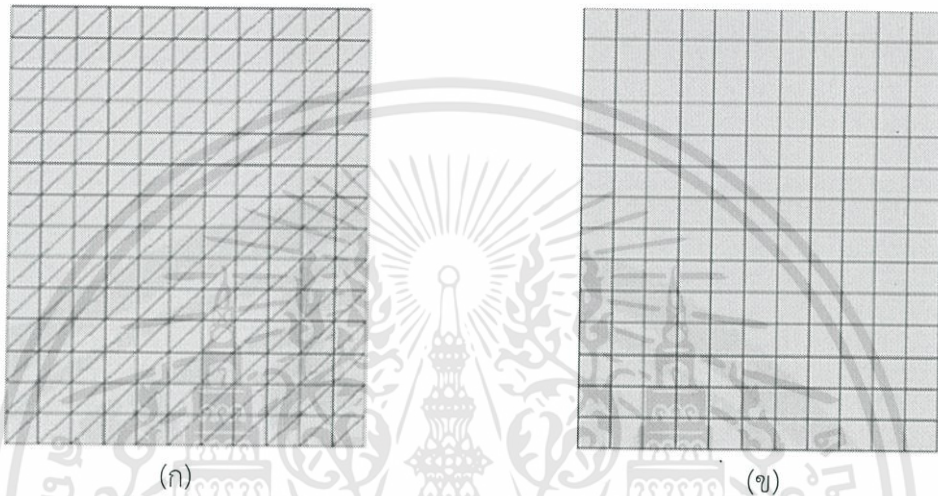


รูปที่ 2.9 การสะท้อนกลับหมดของ plane wave ที่ฐานของปริซึม (ซ้าย), และการสะท้อนแสงเป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบ (ขวา) การสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นที่มุมวิกฤต ซึ่งก็คือการสะท้อนกลับหมด [16]

Evanescent wave sensors เป็นอุปกรณ์ที่ใช้คุณสมบัติการสะท้อนโดยสิ้นเชิงของแสงที่บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสและ evanescent field ของแสง จะปรากฏให้เห็นที่บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสนี้

2.4 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เช่น รูปที่ 2.10 แสดงชิ้นส่วนย่อยเรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบแต่จะวิเคราะห์หาค่าที่ละเอลิเมนต์นำมารวมกันเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ



รูปที่ 2.10 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย (ก) เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม และ (ข) เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม

2.4.1 การแบ่งโครงสร้างเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยจะต้องคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างเดิมคือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู ก็จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ

การแบ่งชิ้นส่วนอาจเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อนแล้วจึงแบ่งออกเป็นสามเหลี่ยมย่อยอีกครั้งหนึ่งตำแหน่งของจุดต่อ (Node)

ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินความจำเป็นก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูงและอาจจะทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้นิยามของเอลิเมนต์นั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างและการกระทำของโหลด รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการคืออาจเลือกใช้เอลิเมนต์มิติเดียว สองมิติ สามมิติ หรือเอลิเมนต์ชนิดแกนสมมาตร [17]

2.5 ทฤษฎี dispersion relation

ทฤษฎี dispersion relation เป็นทฤษฎีอธิบายการกระจายของคลื่นที่เกิดระหว่างรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด และเพื่อหา wave vector ของ surface plasmon (k_{sp}) ที่เกิด surface plasmon wave ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ จากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ในตัวกลางใดๆ

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad ; \quad \bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.8}$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad ; \quad \bar{B} = \mu \bar{H} \quad \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.9}$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad ; \quad \bar{J} = \sigma \bar{E} \quad \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.10}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad ; \quad \bar{B} = \mu \bar{H} \quad \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.11}$$

โดยที่

\bar{D}	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ (Electric displacement)
ρ	คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าอิสระ (charge density)
ϵ	คือ ค่าความขบซึมได้ของสสารไฟฟ้า (permittivity)
\bar{E}	คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field)
\bar{B}	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)
μ	คือ ค่าความขบซึมได้ของสสารแม่เหล็ก (permeability)
\bar{H}	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field)
\bar{J}	คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density)
σ	คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)

ถ้าแสงเดินทางในตัวกลาง Homogeneous (เนื้อเดียวกัน) มีเงื่อนไขดังนี้

- 1) $\rho = 0, \bar{J} = 0$
- 2) ϵ, μ ไม่ขึ้นกับทิศทางการเคลื่อนที่

ถ้านำเงื่อนไขทั้งสองข้อนี้และเงื่อนไขหลังเขมิโคลอนไปแทนในสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ทั้ง 4 สมการ จะได้

$$\nabla \cdot \epsilon \bar{E} = 0 \quad \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.12}$$

$$\nabla \times \bar{B} = \nabla \times \mu \bar{H} = \frac{\mu \partial \epsilon \bar{E}}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \text{สมการที่ 2.13}$$

คลื่นสนามไฟฟ้าและคลื่นสนามแม่เหล็กที่บริเวณตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 มีรูปสมการโดยทั่วไปดังนี้

$$E_1 = (E_{x_1}, 0, E_{z_1}) e^{i(k_x x - \omega t - k_{z_1} z)} \quad \dots \text{สมการที่ 2.14}$$

$$E_2 = (E_{x_2}, 0, E_{z_2}) e^{i(k_x x - \omega t - k_{z_2} z)} \quad \dots \text{สมการที่ 2.15}$$

$$H_1 = (0, H_{y_1}, 0) e^{i(k_x x - \omega t + k_{z_1} z)} \quad \dots \text{สมการที่ 2.16}$$

$$H_2 = (0, H_{y_2}, 0) e^{i(k_x x - \omega t + k_{z_2} z)} \quad \dots \text{สมการที่ 2.17}$$

โดยที่ หมายเลข 1 คือ โลหะ (metal)

หมายเลข 2 คือ อากาศ (air)

แทน (2.14) ลงใน (2.12) จะได้

$$E_{z_1} = -E_{x_1} \left(\frac{k_x}{k_{z_1}} \right) \quad \dots \text{สมการที่ 2.18}$$

แทน (2.15) ลงใน (2.12) จะได้

$$E_{z_2} = -E_{x_2} \left(\frac{k_x}{k_{z_2}} \right) \quad \dots \text{สมการที่ 2.19}$$

แทน (2.16) ลงใน (2.13) จะได้

$$H_{y_1} = \frac{\omega E_{x_1} \epsilon_1 \epsilon_0}{k_{z_1}} \quad \dots \text{สมการที่ 2.20}$$

แทน (2.17) ลงใน (2.13) จะได้

$$H_{y_2} = \frac{\omega E_{x_2} \epsilon_2 \epsilon_0}{k_{z_2}} \quad \dots \text{สมการที่ 2.21}$$

เงื่อนไขขอบเขตที่ boundary condition $z=0$

$$E_{x_1} = E_{x_2} \quad \dots \text{สมการที่ 2.22}$$

$$H_{y_1} = H_{y_2} \quad \dots \text{สมการที่ 2.23}$$

จากสมการ (2.18) - (2.23) เมื่อใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ $z=0$ จะได้ว่า

$$\frac{\epsilon_1}{k_{z_1}} + \frac{\epsilon_2}{k_{z_2}} = 0 \quad \dots \text{สมการที่ 2.24}$$

ที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศมีสมการโดยทั่วไปดังนี้

$$k_{z_1} = \sqrt{\epsilon_1(\omega) \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_x^2} \quad \dots \text{สมการที่ 2.25}$$

$$k_{z_2} = \sqrt{\epsilon_2(\omega) \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_x^2} \quad \dots \text{สมการที่ 2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

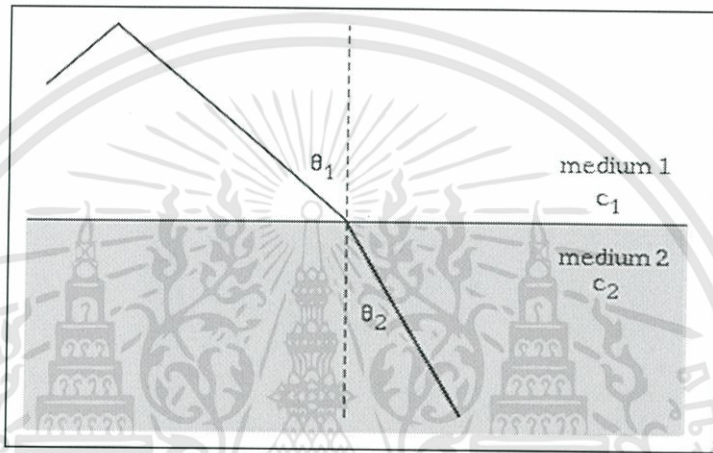
แทนสมการ (2.25) และ (2.26) ลงในสมการ (2.24) จะได้ว่า

$$k_{sp} \equiv k_x = \frac{\omega}{c} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \right] \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.27}$$

เรียกสมการ (2.27) ว่า สมการ dispersion relation

2.6 การหักเหของแสง (Refraction)

เมื่อคลื่นเดินทางไปพบรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังตัวกลางใหม่จะเรียกว่า “คลื่นหักเห” การสะท้อนและการหักเหสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้



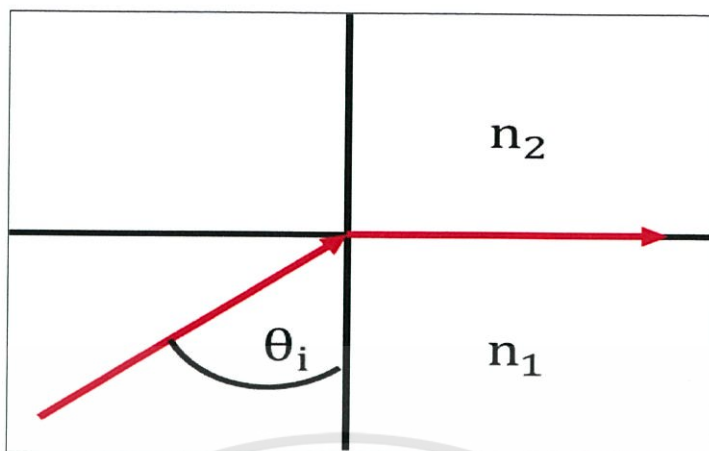
รูปที่ 2.11 การหักเหของแสงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด [18]

การหักเหของคลื่นเกิดจากตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหที่ต่างกัน เมื่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2 จะส่งผลทำให้คลื่นเกิดการหักเหเข้ามายังตัวกลางที่ 2 ดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นการหักเหของคลื่นจะเป็นไปตาม “กฎของสเนล” (Snell’s law) ที่กล่าวไว้ว่า สำหรับตัวกลางคู่หนึ่งใดๆ อัตราส่วนของค่า sine ของมุมในตัวกลางที่ 1 ต่ออัตราส่วนของค่า sine ของตัวกลางที่ 2 จะมีค่าคงที่เสมอ จากกฎของสเนล สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2.28}$$

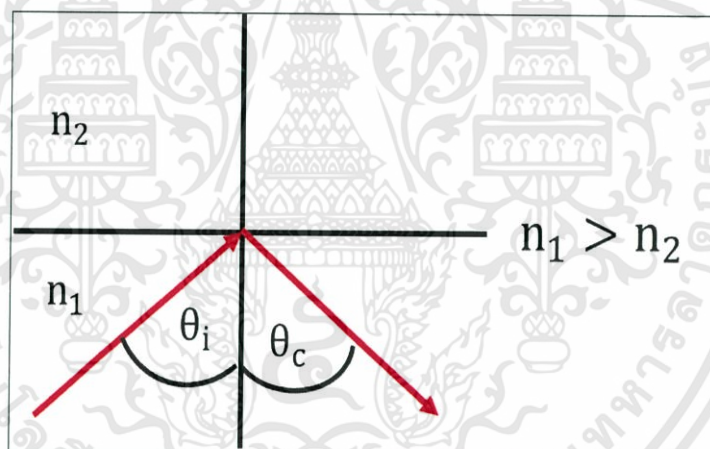
- เมื่อ θ_1 คือ มุมตกกระทบในตัวกลางที่ 1
- θ_2 คือ มุมหักเหในตัวกลางที่ 2
- n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่ 1
- n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหในตัวกลางที่ 2

จากกฎของสเนล จะพบว่าคลื่นที่เดินทางผ่านกลาง 2 ชนิด ที่มีค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แตกต่างกัน พบว่าคลื่นบางส่วนจะหักเหเข้าตัวกลางที่ 2 และคลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับ ในกรณีที่คลื่นตกกระทบที่ทำให้คลื่นสะท้อนทำมุมเท่ากับ 90 องศา เราจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า มุมวิกฤต



รูปที่ 2.12 คลื่นตกกระทบที่ทำให้เกิดมุมวิกฤต

ในกรณีที่คลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่ 1 แล้วถ้าตัวกลางที่ 1 มีค่าดัชนีหักเหมากกว่าตัวกลางที่ 2 และคลื่นตกกระทบทำให้คลื่นสะท้อนทำมุมที่มากกว่ามุมวิกฤต จะทำให้คลื่นเกิดการสะท้อนกลับหมด จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Total Internal Reflection (TIR)”



รูปที่ 2.13 เงื่อนไขการเกิด Total Internal Refraction (TIR)

2.7 แสงประเภท TM mode และแสงประเภท TE mode

2.7.1 ทรานส์เวอร์สอิเล็กทริกเวฟ (Transverse Electric Wave; TE)

หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง ซึ่งสนาม H มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน X และ Z ของสนาม E หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศทางของการแพร่กระจายของคลื่น แต่มีเฉพาะสนามแม่เหล็กในทิศทางนั้น

$$E_z = 0, H_z \neq 0 \quad \dots\dots\dots\text{สมการที่ 2.29}$$

2.7.2 ทรานสเวอร์สแมกเนตริกเวฟ (Transverse Magnetic Wave; TM)

หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามแม่เหล็กวางตามขวาง ซึ่งสนาม E มีส่วนประกอบหรือเวกเตอร์ย่อยอยู่ในแกน X และ Z ของสนาม H หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ไม่มีสนามแม่เหล็กในทิศของการแพร่กระจายของคลื่น แต่มีเฉพาะสนามไฟฟ้าในทิศทางนั้น

$$H_z = 0, E_z \neq 0 \dots\dots\dots\text{สมการที่ 2.30}$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 Surface Plasmons Resonance (S.P.Yushanov,L.T. Gritter, J.S. Crompton* and K.C Koppenhoefer AltaSim Technologies, Columbus, OH)

Surface plasmons เป็นการสั่นของอิเล็กตรอนที่บริเวณผิวสัมผัสของวัสดุ 2 ชนิด ส่วนของ dielectric function ของแต่ละวัสดุ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการ interface ขึ้น surface plasmons resonance จึงสามารถนำไปใช้ในการตรวจจับการดูดกลืนของโมเลกุล ภายหลังปรากฏการณ์นี้ยังเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ยีนส์และการตรวจจับ DNA รวมไปถึงการดูดกลืนและการคายโมเลกุลบนพื้นผิวของวัสดุ นอกจากนี้ยังมีการควบคุมพื้นผิวด้วย electrochemical reaction และอุปกรณ์โฟโตนิกที่ใช้แสงในระดับ nano – scale เทคโนโลยี surface plasmons resonance จะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวในระดับนาโนเมตร ความถี่ของการสั่นแกว่งของ valance electron ที่ถูกกระตุ้นนั้น จะส่งผลทำให้แสงที่สะท้อนกลับมามีความเข้มน้อยลง จึงทำให้เกิด surface plasmons resonance เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานระหว่าง evanescent wave และ surface plasmons โดยเงื่อนไขการเกิด resonance จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณการดูดกลืนบนพื้นผิวของวัสดุ จึงทำให้ characterization ของพื้นผิวเกิดความสัมพันธ์กัน

สำหรับรูปแบบโดยทั่วไปที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมอนมีด้วยกัน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบแรกจะเป็นวิธีการของ Kretschmann-Raether โดยการใช้แผ่นฟิล์มโลหะบางคั่นกลางระหว่างไดอิเล็กทริกกับอากาศ เมื่อฉายลำแสงไปตกกระทบ SPR ซึ่งเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างไดอิเล็กทริกกับโลหะ รูปแบบที่สองจะเป็นวิธีการที่เรียกว่า Otto ซึ่งจะมีพื้นที่ที่เป็นช่องว่างของอากาศคั่นกลางระหว่างไดอิเล็กทริกกับโลหะ เมื่อฉายลำแสงไปตกกระทบ SPR จะเกิดที่บริเวณส่วนที่เป็นช่องว่างของอากาศ ซึ่งทั้งสองกรณีเป็นวิธีการกระตุ้นให้เกิด surface plasmons

การทำความเข้าใจเกี่ยวกับ surface plasmons resonance (SPR) อย่างลึกซึ้ง จะต้องอาศัยการพิจารณาทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมร่วมกับทฤษฎีชั้นพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับการอธิบายการสะท้อนรวมถึงการดูดกลืนของ surface plasmons อย่างกว้างๆ ในความเป็นจริงการกระตุ้นให้เกิดพลาสมอน จะทำให้เกิดการสูญเสียของคลื่นพลาสมอนที่บริเวณชั้นโลหะเล็กน้อย ส่วนจินตภาพของค่า dielectric ของโลหะจะมีค่าเป็นลบ โดยทั้ง 2 กรณีที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถทำให้เราคำนวณหาค่า SPR ได้ โดยการใช้โปรแกรม COMSOL ในการอธิบายปรากฏการณ์การเกิด SPR บนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ [19]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้เราจะทำการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศ ทั้งกรณีที่มีแสงตกกระทบชนิด TE mode และชนิด TM mode ที่มุมตกกระทบต่างๆซึ่งจะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

1. ในช่วงที่ 1 เราจะสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศ โดยกำหนดค่ามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อให้คงที่ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ ตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 nm ถึง 800 nm
2. ช่วงที่ 2 จะสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มโลหะกับชั้นอากาศ โดยกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ แล้วปรับหาค่ามุมที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อ แล้วนำมาหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ามุมที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง กับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation

3.2 การกำหนดค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในโครงการนี้เราใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics[20] โมดูล RF Module[21] ในการสร้างแบบจำลองการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยจะทำการวิเคราะห์ขนาดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อโลหะ-อากาศในขณะที่เกิดคลื่นผิวพลาสมอนโดยเมื่อเปิดโปรแกรมCOMSOL ขึ้นมาแล้ว เราจะกำหนดค่า Parameters เริ่มต้นโดยกำหนดให้ ชั้นแรกเป็นชั้นของปริซึมซึ่งมีดัชนีหักเห n_a ชั้นที่สองเป็นชั้นของโลหะที่เราศึกษา ซึ่งในโครงการนี้ มี 3 ชนิด คือ ทอง(Au), เงิน(Ag) และทองแดง(Cu) กำหนดให้มีความหนาของชั้นโลหะ 50 nm และชั้นที่สามเป็นชั้นของอากาศ ซึ่งมีดัชนีหักเห n_b โดยทั้ง 3 ชั้นนี้วางตัวอยู่ในระนาบ xy จากนั้นวิเคราะห์การเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศ โดยจำลองให้แสงกระตุ้นมีช่วงความยาวคลื่น (λ) อยู่ในช่วง 400 nm ถึง 800 nm โดยมุมตกกระทบ(resonance angle, θ) ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอน ที่บริเวณรอยต่อโลหะ-อากาศ หาได้จากสูตร Dispersion relation ดังนี้

$$k_0 n_p \sin \theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \dots\dots\dots \text{สมการที่ 3.1}$$

โดยกำหนดให้ k_0 คือ wave number ของแสงตกกระทบ
 n_p คือ ดัชนีหักเหของปริซึม

กำหนดให้ค่า k_0 หาได้จาก

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \dots\dots\dots\text{สมการที่ 3.2}$$

กำหนดให้ค่า k_{ax} หาได้จาก

$$k_{ax} = k_0 \times n_p \times [\sin(\alpha)] \quad \dots\dots\dots\text{สมการที่ 3.3}$$

และกำหนดให้ค่า k_{az} หาได้จาก

$$k_{az} = k_0 \times n_p \times [\cos(\alpha)] \quad \dots\dots\dots\text{สมการที่ 3.4}$$

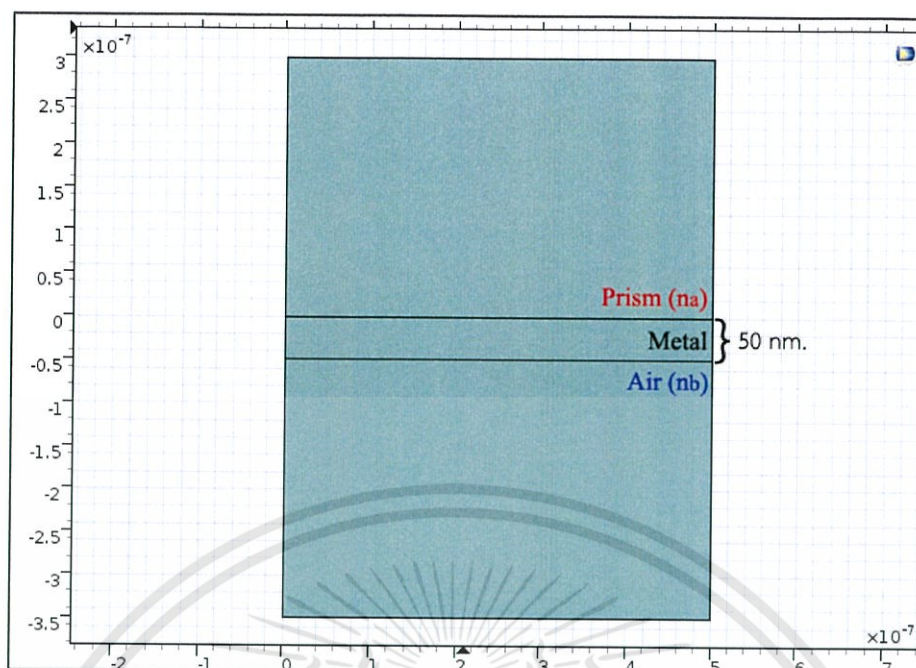
โดยในที่นี้ โปรแกรม COMSOL จะกำหนดตัวแปร “alpha” แทนค่ามุมตกกระทบ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างตารางค่า Parameters เริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ของโลหะประเภท ทองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm.

Name	Expression	Value	Description
na	1.5136	1.5136	Refractive index, prism
nb	1.0002760	1.0002760	Refractive index, air
lamda0	680[nm]	6.8E-7m	Incident wavelength
f0	c_const/lamda0	4.4087E14 1/s	Incident Frequency
alpha	31.00615929[degree]	0.56278 rad	Angle of incidence
k0	2*pi/lamda0	9.24E6 1/m	Incident Wave number
kax	k0*na*sin(alpha)	7.4619E6 1/m	Wave number in X axis
kaz	k0*na*cos(alpha)	1.1829E7 1/m	Wave number in Z axis

3.3 การสร้างและออกแบบการจำลอง

ในการสร้างแบบจำลอง เราจะสร้างโดยอิงโครงสร้างของ Kretschmann โดยจะมีทั้งหมด 3 ชั้น คือ ชั้นปริซึม ชั้นโลหะ และชั้นอากาศ ในแบบจำลองนี้เรากำหนดให้ความหนาของชั้นโลหะมีขนาด 50 nm โดยโมเดลแบบจำลอง 2D จะแสดงให้เห็นข้างล่างนี้



รูปที่ 3.1 โมเดลการกระตุ้นพลาสมอนชนิดปริซึมคัปปลิง แบบ 2D

3.4 ขั้นตอนการกำหนดค่า Material

ในการกำหนดค่า Material เราจะกำหนดตามตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ ของโลหะประเภท ทองแดง ที่ความยาวคลื่น 680 nm

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Prism ของโลหะประเภท ทองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm

Property	Name	Value	Unit	Property group
Refractive index	n	na	1	Refractive index

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Air ของโลหะประเภท ทองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm

Property	Name	Value	Unit	Property group
Refractive index	n	nb	1	Refractive index

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างตารางค่า Material ของ Metal ของโลหะประเภท ทองแดง ที่ความยาวคลื่น 680nm

Property	Name	Value	Unit	Property group
Refractive index	n	0.21544	1	Refractive index
Relative permittivity (imaginary part)	epsilonBis	1.7044	1	Dielectric losses
Relative permittivity (real part)	epsilonPrim	-15.601	1	Dielectric losses

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การกำหนดข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์

ในการกำหนด ขั้นตอนแรกเราจะต้องกำหนดว่าจะให้แสงที่มาตกกระทบเป็นแสงชนิด TE mode หรือ TM mode ซึ่งทำได้โดยเข้าไปกำหนดชนิดของแสงในตัวเลือก Electromagnetic Wave โดยในกรณีที่ต้องการให้เป็น TE mode ให้เลือก Electric field input เป็นชนิด out-of-plane vector และในกรณีที่ ต้องการให้เป็น TM mode ให้เลือก Electric field input เป็นชนิด In-plane vector เมื่อเลือกชนิดแสงที่ตกกระทบได้แล้ว ต่อไปเราก็จะมากำหนดมุมตกกระทบ โดยใช้ Port สามารถทำได้ดังนี้

3.5.1 กรณีกำหนด Port เป็นประเภท Periodic

เมื่อเปิดหน้าต่าง setting ของ port ขึ้นมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเราจะทำการเลือก boundary ของ port นั้นๆ โดยขอบเขตของ port 1 จะกำหนดอยู่ที่ขอบบนสุดของชั้นปริซึม และเลือกพอร์ตให้เป็นประเภท periodic port หลังจากนั้นเราก็เลือก On ที่ ช่อง Wave excitation at this port เพื่อเป็นการบอกโปรแกรมว่าจะให้แสงมาตกกระทบที่ port นี้ หลังจากนั้นก็กำหนดโหมดของแสงที่จะเข้ามาตกกระทบ ซึ่งถ้าในตอนต้น เราเลือกแสงที่มาตกกระทบเป็น out-of-plane vector หรือ TE mode การกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบ จะต้องกำหนดให้มีขนาด (E_x, E_y, E_z) เป็น $(0, 0, 1)$ ตามลำดับ และถ้าเป็น In-plane vector หรือ TM mode ก็จะต้องกำหนด (E_x, E_y, E_z) เป็น $(1, 1, 0)$ ตามลำดับแทน การกำหนดค่าต่างๆในพอร์ต 1 จะรวมไปถึงการกำหนดมุมตกกระทบ (α) ว่ามีค่าเท่าไร? ค่าดัชนีหักเห (n) ใน port นี้มีค่าเท่าไร? และ ค่าความถี่ (f_{max}) ที่ใช้เราต้องการให้ใช้เท่าไร? โดยเราจะใส่ค่าข้อมูลเป็นตัวแปรที่เราได้กำหนดไว้ใน Parameters ดังตารางที่ 1.1 โดย

- มุมตกกระทบ (α) ใส่ค่าเป็น “alpha”
- ค่าดัชนีหักเห (n) ก็เป็น “na”
- ค่าความถี่ (f_{max}) ก็เป็น “f0”

จากนั้นกำหนดค่าของ port 2 ซึ่ง port 2 จะเป็นเหมือนการกำหนดมุมหักเหของแสงในตัวกลางที่สอง โดยขอบเขตของ port 2 จะกำหนดอยู่ที่ขอบล่างสุดของชั้นอากาศ ดังรูปที่ 3.2 ในการกำหนด port 2 ขั้นตอนอื่นๆก็จะคล้ายๆกับการกำหนด port 1 ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะเปลี่ยนแค่ ใน port 2 เราต้องเลือก “Off” ในช่อง Wave excitation at this port แทน และกำหนดมุมหักเหในตัวกลางที่สอง เป็นมุม “-beta” ใน port 2 เราจะกำหนดค่าดัชนีหักเหเป็น nb

การกำหนดพอร์ตจะต้องกำหนด periodic condition ของพอร์ตนั้นด้วย โดยเราจะกำหนด periodic condition ให้เป็นประเภท Floquet periodicity และกำหนด k-vector ของ Floquet periodicity ให้เป็นตัวเลือกประเภท “From periodic port”. จากนั้นเมื่อกำหนดข้อมูลที่วิเคราะห์ครบทุกขั้นตอนแล้ว เราก็กด compute ที่หน้าต่าง Home เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลออกมา

3.5.2 กรณีกำหนด Port เป็นประเภท User defined

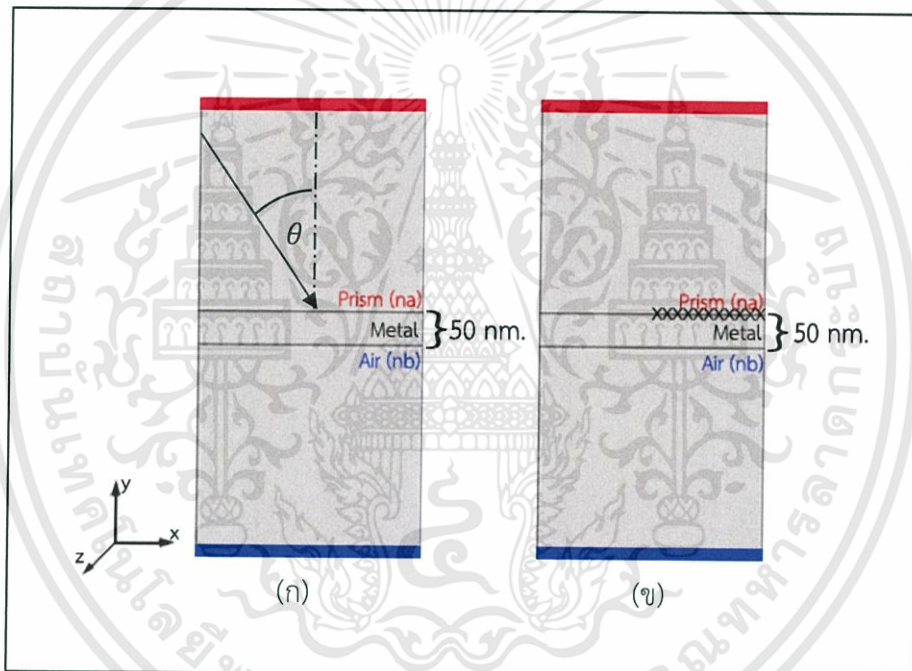
ในกรณีนี้เราจะระบุชนิดของ Port โดยใช้ตัวเลือกประเภท User defined แทนตัวเลือกประเภท periodic เนื่องจากเราจะกำหนดค่าของเลขคลื่น (k-vector) ในแนวแกน x และ เลขคลื่น (k-vector) ในแนวแกน z ตามเงื่อนไขของ dispersion relation กับการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าเริ่มต้น ดังนี้

$$\text{กำหนดค่า } k_{ax} \text{ โดย } k_{ax} = k_0 \times n_p \times [\sin(\alpha)]$$

$$\text{กำหนดค่า } k_{az} \text{ โดย } k_{az} = k_0 \times n_p \times [\cos(\alpha)]$$

และ α คือตัวแปรที่หมายถึงค่ามุมตกกระทบปริซึม

การกำหนดพอร์ต (port) จะต้องกำหนด periodic condition ของพอร์ต (port) ด้วย โดยเราจะกำหนด periodic condition ให้เป็นประเภท Floquet periodicity เช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.2 (ก) เมื่อแสงตกกระทบเป็นชนิด TM mode; แสงตกกระทบมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน (x,y,0) ขณะตกกระทบปริซึม
(ข) เมื่อแสงตกกระทบเป็นชนิด TE mode; แสงตกกระทบมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน (0,0,z) ขณะตกกระทบปริซึม

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศ

เมื่อกำหนดให้แสงตกกระทบปริซึมมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm โดยโลหะมี 3 ชนิด ได้แก่ ทอง เงิน และ ทองแดง และ กำหนดให้มุมตกกระทบของแสงที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศมีค่าดังนี้ ทองมีค่ามุมเท่ากับ 35.11 องศา เงินมีค่ามุมเท่ากับ 35.84 องศา และ ทองแดงมีค่ามุมเท่ากับ 31.01 องศา

4.1.1 กรณีใช้แสงตกกระทบชนิด TM mode และสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบปริซึมมีองค์ประกอบของสนามในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1

4.1.1.1 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท ทอง ที่มุม 35.11 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททอง

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	32388.62
405	32003.00
410	27527.75
415	30264.00
420	21739.87
430	25552.75
435	18285.63
440	16188.42
445	17085.13
450	37666.11
455	46760.00
460	51993.40
465	42205.27
470	30651.63
475	24546.33
480	20626.75

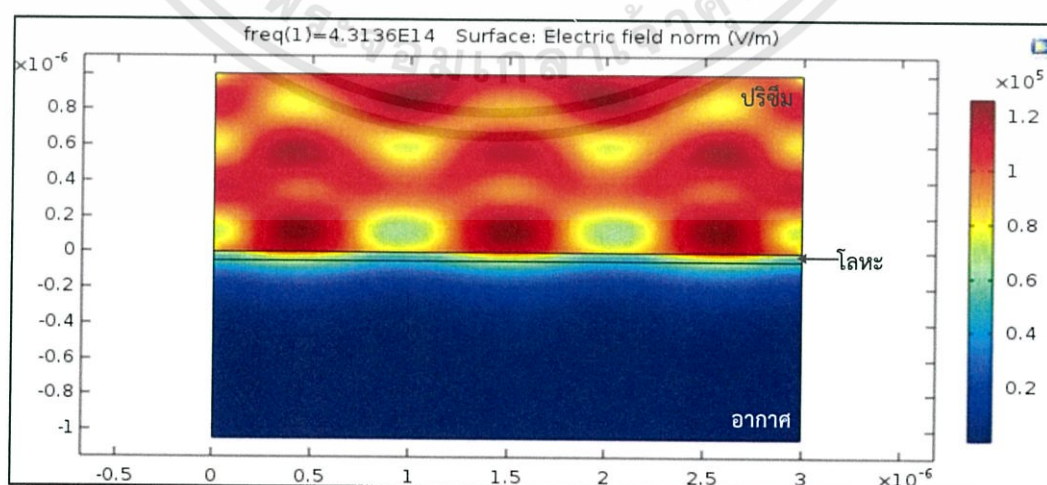
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
485	23075.63
490	20125.40
495	17899.40
500	14105.67
505	14483.00
510	17925.00
525	8298.756
530	11442.44
535	8445.429
540	13246.50
545	12030.20
550	12831.89
560	24338.00
565	17967.00
570	21401.00
575	23808.00
580	26467.00
585	31634.00
590	33589.00
605	32643.00
610	23905.20
615	27567.40
625	18237.22
630	17605.88
635	15829.14
640	16481.29
645	16267.83
650	15209.00
655	15126.43
665	17345.67
670	17523.33
675	18841.67
680	19890.33
685	23685.67
690	33309.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
695	69116.67
705	46354.11
710	30932.75
715	24067.75
720	21182.90
725	19454.13
730	22210.00
745	27274.50
750	23160.50
755	20981.50
760	20585.00
765	19442.50
770	18720.50
775	19221.00
780	18359.00
785	17600.00
790	15221.67
795	15715.00
800	15463.33

จากตารางที่ 4.1 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุด ที่ความยาวคลื่น 695nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 69116.67 v/m แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท เงิน ที่มุม 35.84 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบนผิวความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมตกกระทบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภทเงิน

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	18678.50
405	10934.80
410	13665.00
415	10772.50
420	9921.40
425	11625.70
435	7831.30
440	8576.50
445	9426.20
450	9858.60
455	11763.00
470	20655.00
475	18668.30
480	20214.80
485	16677.50
490	18085.00
495	14079.30
500	13668.00
505	17181.00
510	17720.80
520	15310.30
525	11357.70
530	10456.50
535	7295.90
540	7596.00
550	13769.30
555	10044.90
560	12564.00
570	22518.50

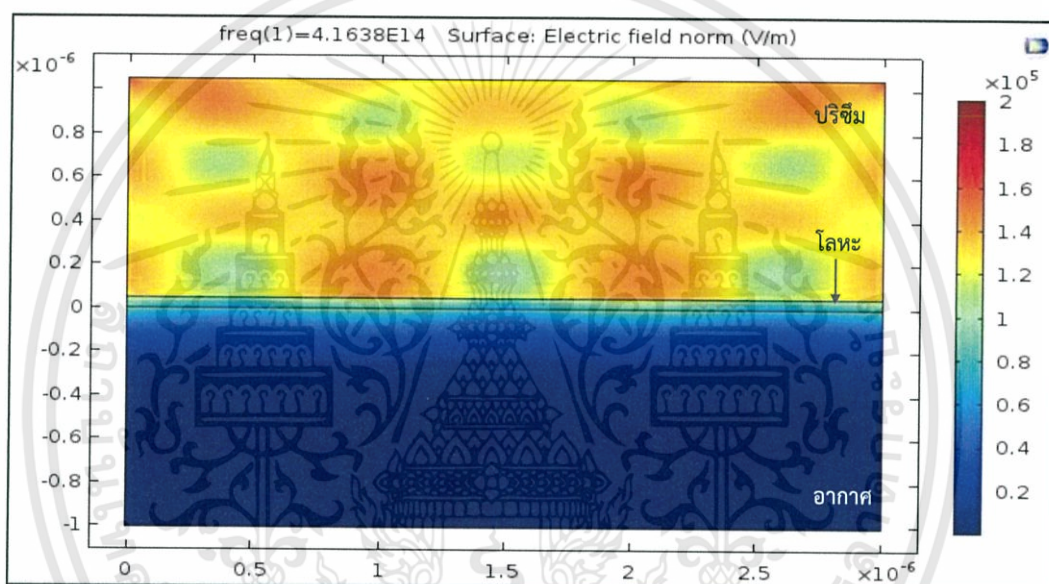
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
575	18420.00
580	19963.50
585	21347.00
590	24431.00
595	28248.50
605	36642.00
620	35516.00
625	30338.00
635	20994.00
640	18708.00
645	19309.00
650	18692.00
655	17325.00
665	15193.00
670	15801.00
675	16863.30
680	16413.30
685	16121.30
690	16955.70
695	19268.00
700	22389.30
705	28881.00
710	48481.70
720	67906.00
725	45130.00
730	34303.00
735	26850.50
740	24641.50
745	30176.80
755	36371.50
760	27852.00
765	24956.00
770	22252.00
775	22624.50
780	20777.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (แวลีเย) (v/m)
785	20581.50
790	20416.50
795	19655.00
800	19367.50

จากตารางที่ 4.2 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุด ที่ความยาวคลื่น 720nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าแวลีเยสูงสุด 67906.00 v/m แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท ทองแดง ที่มุม 31.01 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภท ทองแดง

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	-
405	-
410	-
415	10655.99
420	16959.57
425	-
430	-
435	-
440	12720.00
445	11452.57
450	-
455	-
460	18121.40
465	17235.60
470	22836.80
475	30826.71
480	-
485	-
490	-
495	-
500	-
505	-
510	-
515	-
520	173519.70
525	34313.50
530	-
535	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

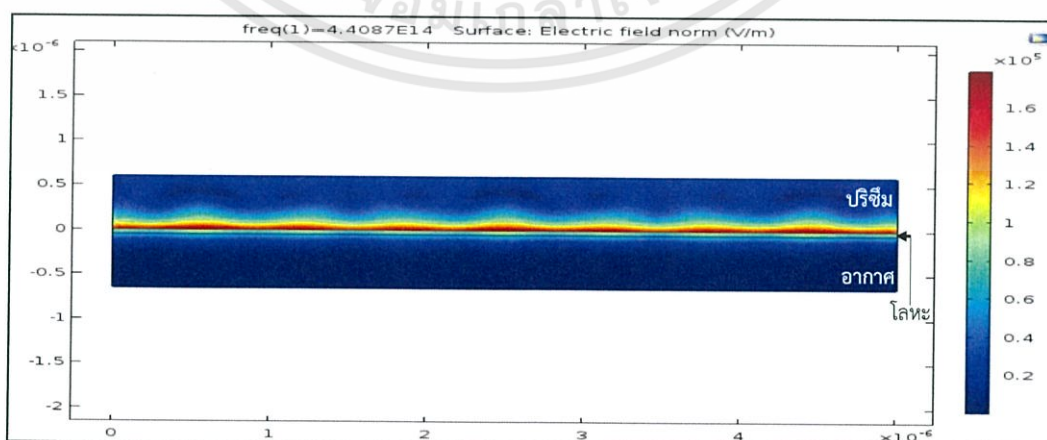
ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
540	-
545	-
550	-
555	-
560	-
565	-
570	-
575	-
580	15507.83
585	12189.83
590	11304.00
595	10922.67
600	10859.17
605	10701.00
610	11061.00
615	13864.50
620	14491.14
625	7898.44
630	-
635	-
640	-
645	-
650	-
655	-
660	-
665	29203.50
670	12071.29
675	13172.00
680	59421.43
685	14977.50
690	12432.33
695	12274.60
700	12859.40
705	15093.80
710	15251.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (แวลีเย) (v/m)
715	18737.60
720	-
725	-
730	-
735	-
740	-
745	-
750	-
755	-
760	-
765	-
770	-
775	-
780	-
785	14854.50
790	15671.25
795	21278.00
800	33016.50

*หมายเหตุ: เครื่องหมาย “-” แสดงถึงบริเวณที่ไม่เกิดคลื่นผิวพลาสมอนระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ

จากตารางที่ 4.3 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุด อยู่ที่ความยาวคลื่น 680nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าแวลีเยสูงสุด 59421.43 v/m แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 กรณีใช้แสงตกกระทบบนชนิด TM mode และสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบบริซิมมี องค์ประกอบของสนามในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0

4.1.2.1 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท ทอง ที่มุม 35.11 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบบริซิมมีมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททอง

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	23552.50
405	26387.43
410	26652.09
415	29837.18
420	25179.67
425	36334.75
430	28621.54
435	21239.38
440	19773.42
445	19783.89
450	36518.05
455	46045.00
460	44583.20
465	26246.89
470	21070.14
475	17540.38
480	14103.90
485	14906.13
490	16721.76
495	16076.67
500	14327.67
505	14982.77
510	19157.75
525	109520.00
530	11568.80
535	11796.88
545	15178.33

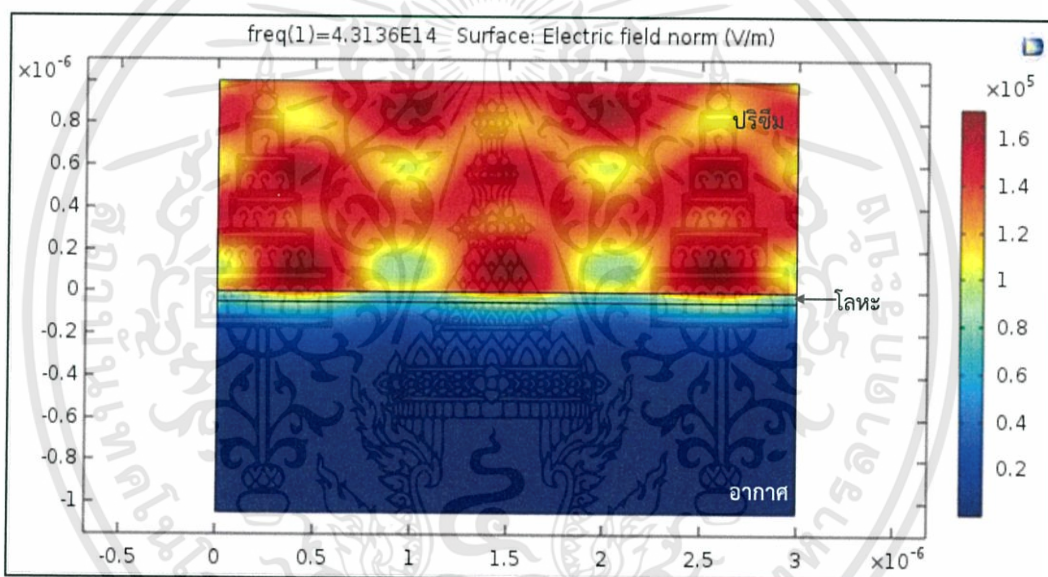
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
555	15190.78
560	21572.80
565	19722.00
570	17836.29
575	20098.50
580	18602.44
585	21190.75
590	25276.00
595	30376.00
605	25835.00
610	18881.40
615	17685.78
620	20433.88
625	12840.10
630	11525.38
635	11840.88
640	11955.00
645	12025.89
650	12254.11
655	12069.63
665	13416.67
670	15105.33
675	16728.67
680	19361.67
685	24620.67
690	33625.67
695	94090.00
705	49089.56
710	36364.00
720	35567.00
730	33797.20
750	31862.00
755	29218.00
760	28888.50
765	27826.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
770	23928.00
775	22852.00
785	21728.67
790	19186.73
795	19361.39
800	18347.00

จากตารางที่ 4.4 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุด ที่ความยาวคลื่น 695nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 94090.00 v/m แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท เงิน ที่มุม 35.84 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภทเงิน

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	18846.00
410	17707.30
415	14156.70
420	13734.70
425	15654.00
430	27166.60
435	9430.00
440	9273.00
445	9694.70
450	10076.40
455	9745.50
460	17965.60
465	19757.00
470	14750.00
475	13382.70
485	13630.00
495	13924.00
500	14392.00
505	20133.30
510	22874.30
520	20362.30
525	15660.30
530	14497.50
535	10852.00
540	11408.00
545	12617.00
555	13935.70
560	16738.00
570	30012.50

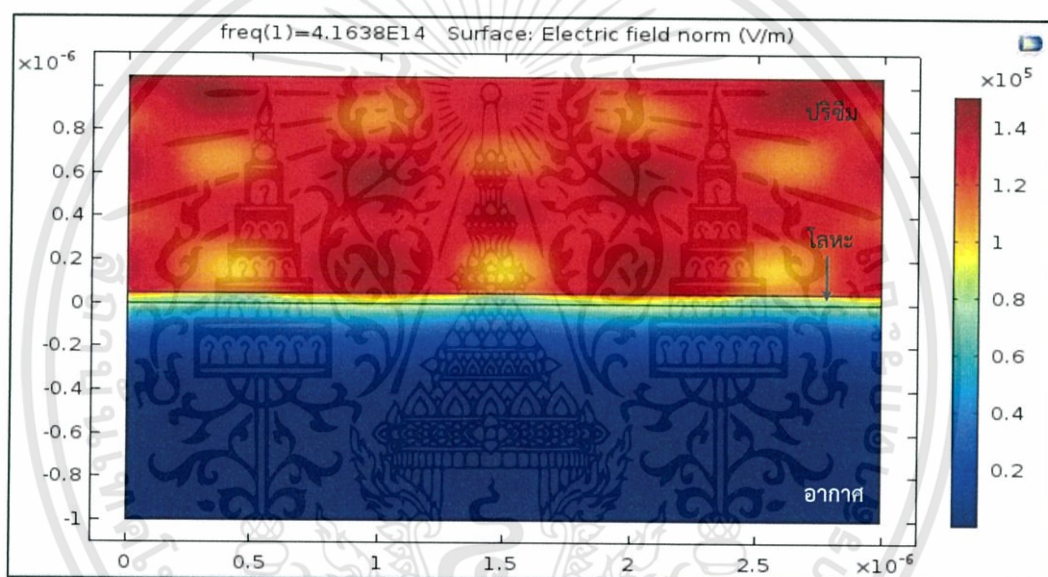
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
575	24560.00
580	23436.50
585	23931.00
590	25414.00
595	27449.50
600	37174.00
605	34788.00
620	26596.00
625	24743.00
635	14241.00
640	13164.00
645	13148.00
650	13070.00
655	12524.00
660	12933.00
665	12400.00
670	13522.00
675	15608.00
680	15933.00
685	15685.30
690	18495.00
695	21337.00
705	34723.70
710	63382.30
720	74611.00
725	49145.00
730	40144.00
735	32987.00
740	31050.50
745	39908.30
755	43383.00
760	37013.00
765	32597.00
770	31548.00
775	29619.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (แวลีเย) (v/m)
780	28647.00
785	27859.50
790	26576.00
795	26395.00
800	25438.00

จากตารางที่ 4.5 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุด ที่ความยาวคลื่น 720nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าแวลีเยสูงสุด 74611.00 v/m แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภทเงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท ทองแดง ที่มุม 31.01 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมตกกระทบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภท ทองแดง

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	-
405	-
410	-
415	15818.75
420	26862.25
425	-
430	-
435	-
440	18722.33
445	16812.25
450	-
455	-
460	23417.25
465	21573.75
470	22395.25
475	37193.25
480	-
485	-
490	-
495	-
500	-
505	-
510	-
515	-
520	134530.00
525	26626.50
530	-
535	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

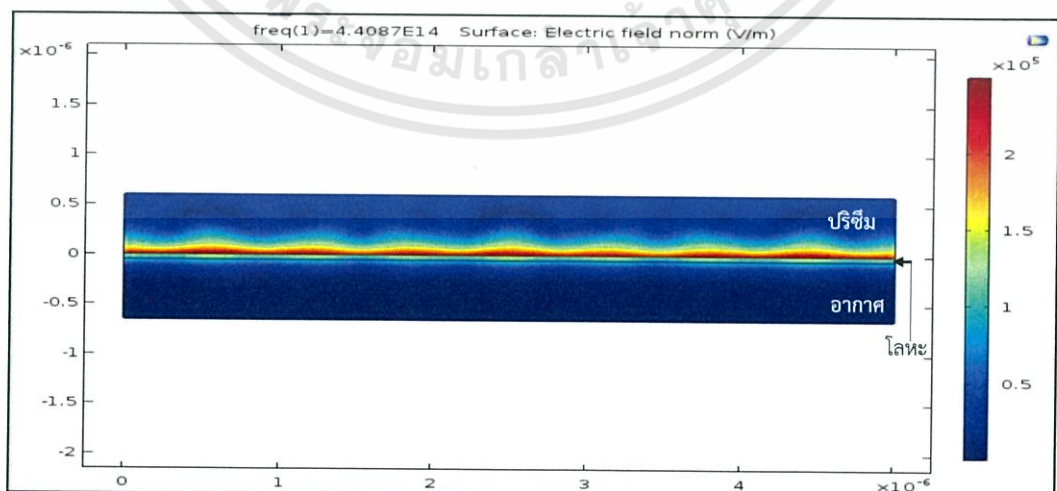
ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
540	-
545	-
550	-
555	-
560	-
565	-
570	-
575	-
580	14490.25
585	12478.50
590	12104.75
595	12022.50
600	12467.00
605	10956.00
610	13348.75
615	17465.75
620	18393.50
625	10956.60
630	-
635	-
640	-
645	-
650	-
655	-
660	-
665	30181.75
670	16751.75
675	18843.00
680	69224.57
685	21204.00
690	17051.25
695	17786.75
700	18267.50
705	20894.75
715	26286.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (แวลี่ย) (v/m)
720	-
725	-
730	-
735	-
740	-
745	-
750	-
755	-
760	-
765	-
770	-
775	-
780	-
785	20542.75
790	21205.75
795	27777.50
800	42397.25

*หมายเหตุ: เครื่องหมาย “-” แสดงถึงบริเวณที่ไม่เกิดคลื่นผิวพลาสมอนระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ

จากตารางที่ 4.6 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุดในที่ความยาวคลื่น 680nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าแวลี่ยสูงสุด 69224.57 v/m แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 กรณีใช้แสงตกกระทบชนิด TE mode ซึ่งกำหนดสนาม x,y,z เท่ากับ $0,0,1$

4.1.3.1 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท ทอง ที่มุม 35.11 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมตกกระทบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ $0,0,1$ และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททอง

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	-
405	-
410	-
415	-
420	-
425	-
430	-
435	-
440	-
445	-
450	-
455	-
460	-
465	-
470	-
475	-
480	-
485	27922.85
490	-
495	-
500	-
505	-
510	-
515	-
520	-
525	-
530	-
535	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

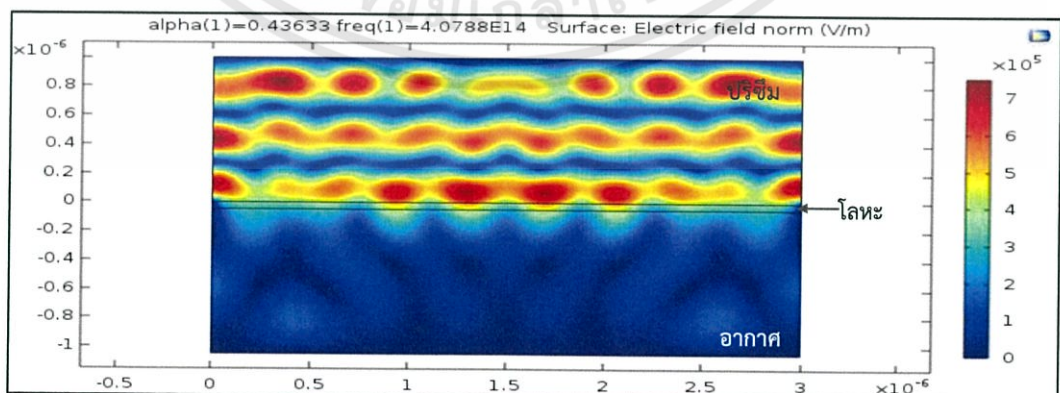
ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
540	-
545	254742.5
550	-
555	-
560	-
565	-
570	-
575	-
580	245637.5
585	-
590	-
595	-
600	-
605	-
610	-
615	-
620	25677.55
625	-
630	-
635	-
640	-
645	20866.5
650	22381.29
655	-
660	147448
665	132059.1
670	-
675	24461.8
680	-
685	-
690	-
695	-
700	-
705	-
710	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
715	-
720	-
725	-
730	-
735	292788.8
740	361985
745	-
750	-
755	20454.29
760	18803.71
765	18344.43
770	-
775	-
780	-
785	-
790	24356.25
795	-
800	-

*หมายเหตุ: เครื่องหมาย “-” แสดงถึงบริเวณที่ไม่เกิดคลื่นผิวพลาสมอนระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ

จากตารางที่ 4.7 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุดในที่ความยาวคลื่น 735nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 292788.8 v/m แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท เงิน ที่มุม 35.84 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 0,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภทเงิน

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	-
405	31511.00
410	26527.00
415	28929.00
420	23177.00
425	-
430	20749.00
435	34257.00
440	-
445	-
450	-
455	35157.00
460	-
465	-
470	70445.00
475	110789.00
480	-
485	37622.00
490	93421.00
495	-
500	-
505	-
510	-
515	-
520	-
525	-
530	-
535	40454.00
540	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

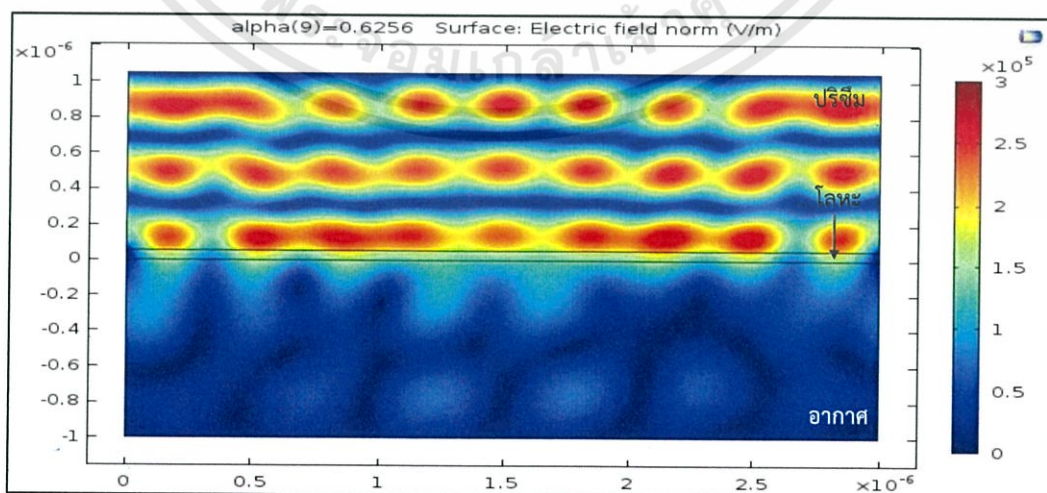
ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
545	30516.00
550	-
555	-
560	-
565	26382.00
570	66622.00
575	27971.00
580	122301.00
585	121638.00
590	-
595	-
600	-
605	-
610	-
615	-
620	27191.00
625	40208.00
630	-
635	-
640	-
645	-
650	-
655	-
660	-
665	-
670	-
675	29021.00
680	37178.00
685	32951.00
690	30501.00
695	-
700	-
705	38482.00
710	27871.00
715	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
720	-
725	-
730	31589.00
735	-
740	-
745	32856.00
750	136539.00
755	-
760	-
765	-
770	-
775	-
780	38950.00
785	26765.00
790	-
795	-
800	-

*หมายเหตุ: เครื่องหมาย “-” แสดงถึงบริเวณที่ไม่เกิดคลื่นผิวพลาสมอนระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ

จากตารางที่ 4.8 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุดในที่ความยาวคลื่น 750nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 136539.00 v/m แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 ผล Simulation หาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดของโลหะประเภท ทองแดง ที่มุม 31.01 องศา ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เกิดจากการ Simulate เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมตกกระทบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 0,0,1 และกำหนดให้โลหะเป็นประเภททองแดง

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	-
405	-
410	-
415	-
420	-
425	28009.53
430	49482.23
435	-
440	33610.00
445	27702.50
450	-
455	-
460	-
465	-
470	-
475	-
480	-
485	-
490	-
495	-
500	-
505	-
510	-
515	-
520	-
525	-
530	-
535	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

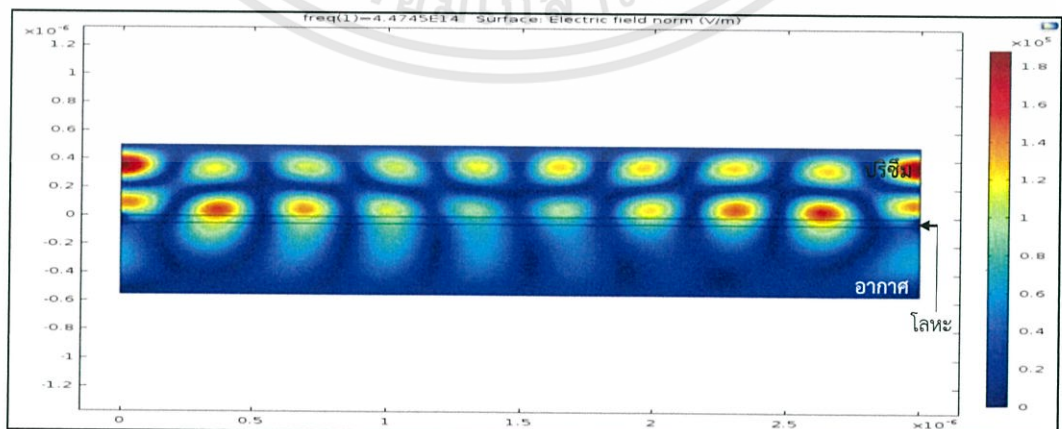
ความยาวคลื่น (nm)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
540	-
545	-
550	-
555	-
560	-
565	-
570	-
575	-
580	26790.40
585	-
590	-
595	-
600	-
605	-
610	-
615	-
620	-
625	-
630	-
635	-
640	-
645	-
650	-
655	-
660	-
665	-
670	77020.40
675	31399.88
680	56247.56
685	-
690	-
695	-
700	-
705	-
710	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
715	-
720	-
725	-
730	-
735	-
740	29240.00
745	29173.71
750	22116.29
755	21331.14
760	20949.86
765	20964.43
770	20795.00
775	20785.00
780	-
785	-
790	-
795	-
800	-

*หมายเหตุ: เครื่องหมาย “-” แสดงถึงบริเวณที่ไม่เกิดคลื่นผิวพลาสมอนระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ

จากตารางที่ 4.9 ผล Simulation ที่ทำให้เกิดคลื่นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุดในที่ความยาวคลื่น 670nm โดยมีค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 77020.40 v/m แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงการเกิดคลื่นสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผล Simulation ของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศ และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมที่คำนวณได้จากทฤษฎี dispersion relation กับมุมที่ได้จากการ Simulate

4.2.1 กรณีใช้แสงตกกระทบชนิด TM mode เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มุมองค์ประกอบของสนามในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1

4.2.1.1 ผล Simulation ของโลหะประเภท ทอง ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม Simulation และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ของโลหะประเภททอง

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุม Simulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
435	77.30	78.30	1.29	44688.00
440	64.89	64.50	0.60	117225.00
445	56.24	54.90	2.39	223690.00
450	49.58	49.80	0.44	233950.00
455	44.42	45.00	1.30	39327.00
460	40.42	39.30	2.78	674565.00
465	37.33	37.00	0.89	119718.00
470	34.95	36.00	3.01	57176.00
475	33.10	33.70	1.81	26320.00
480	31.67	32.00	1.03	15290.00
485	30.56	30.90	1.11	17790.00
490	29.70	30.50	2.68	66901.00
495	29.03	28.30	2.51	204956.00
500	28.51	27.40	3.91	29027.00
505	28.13	29.50	4.89	499110.00
510	27.84	29.50	5.97	165866.00
515	27.63	27.20	1.56	22031.00
520	26.70	27.50	2.99	22141.00
525	27.40	27.00	1.46	46440.00
530	27.36	27.30	0.21	72568.00
535	27.35	27.60	0.91	160870.00
540	27.38	27.90	1.91	37117.00

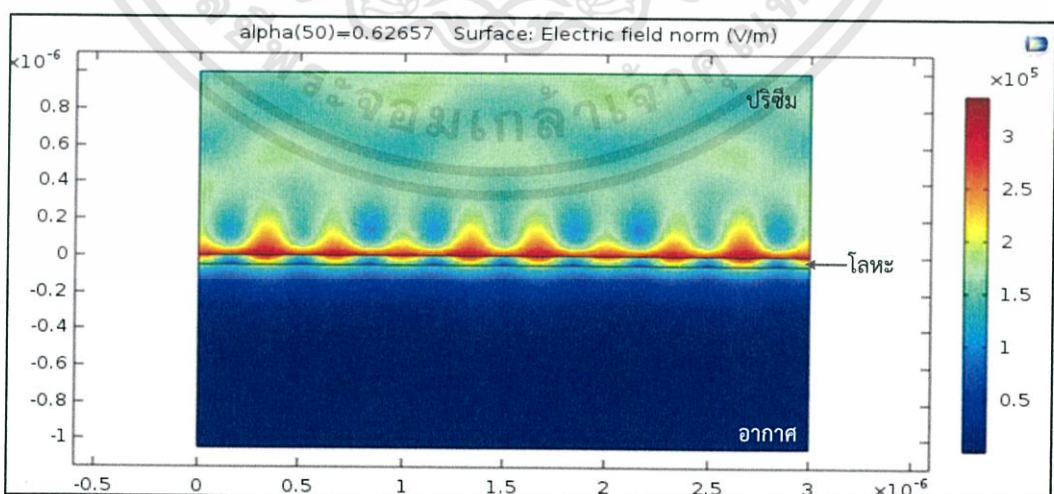
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของ มุม (%)	E_{max} (แวลีย์) (v/m)
545	27.43	28.10	2.46	69868.00
550	27.50	28.40	3.27	80988.00
555	27.59	28.60	3.66	55442.00
560	27.70	28.90	4.33	91807.00
565	27.82	29.10	4.59	85439.00
570	27.96	29.40	5.16	63854.00
575	28.11	29.50	4.96	23808.00
580	28.26	29.80	5.44	71038.00
585	28.43	30.00	5.54	47157.00
590	28.60	30.20	5.60	38500.00
595	28.78	30.40	5.64	46964.00
600	28.96	30.80	6.35	98740.00
605	29.15	30.90	6.00	48710.00
610	29.35	31.10	5.98	60532.00
615	29.55	31.50	6.61	82210.00
620	29.75	31.70	6.55	148137.00
625	29.96	29.50	1.52	140573.00
630	30.17	29.80	1.22	50230.00
635	30.38	32.40	6.64	92745.00
640	30.60	32.60	6.54	138793.00
645	30.82	32.80	6.43	216577.00
650	31.04	32.90	5.99	77526.00
655	31.26	33.10	5.87	72420.00
660	31.49	33.30	5.74	66079.00
665	31.72	33.70	6.25	149253.00
670	31.95	33.90	6.10	202437.00
675	32.18	34.30	6.58	165450.00
680	32.32	34.30	6.12	384567.00
685	32.66	34.60	5.95	107593.00
690	32.90	34.60	5.18	89247.00
695	33.13	35.00	5.63	154223.00
700	33.38	34.40	3.07	210673.00
705	33.62	35.50	5.59	89359.00
710	33.86	35.70	5.42	100030.00
715	34.11	35.90	5.25	180747.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของ มุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
720	34.36	36.00	4.77	2128100.00
725	34.61	36.10	4.31	141745.00
730	34.86	36.20	3.85	78570.00
735	35.11	36.50	3.96	113105.00
740	35.36	36.90	4.35	223240.00
745	35.62	36.90	3.60	153680.00
750	35.88	36.90	2.86	100218.00
755	36.13	36.90	2.13	93533.00
760	36.39	36.70	0.85	36139.00
765	36.65	37.70	2.86	108065.00
770	36.91	36.90	0.03	136448.00
775	37.17	38.20	2.76	177360.00
780	37.44	38.40	2.57	182257.00
785	37.70	38.50	2.11	143113.00
790	37.97	38.70	1.92	112050.00
795	38.24	40.20	5.12	215250.00
800	38.51	38.40	0.28	145167.00

จากตารางที่ 4.10 มุม 35.90 องศา ที่ได้จากการ Simulate ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 180747 v/m เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 34.11 องศา ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี dispersion relation มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.25 % แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 ในการ Simulate เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสม ผลปรากฏว่ารูปที่ 4.10 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศค่อนข้างชัดเจนที่สุด

เนื่องจากการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนจะเป็นไปตามทฤษฎี dispersion relation โดย surface plasmon waves จะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขของมุมตกกระทบและความยาวคลื่นตกกระทบ เป็นไปตามสมการดังนี้

$$k_{sp} = k_x = k_0 n_p \sin\theta \quad \dots\dots\dots \text{สมการที่ 4.1}$$

โดยที่ k_{sp} คือ เลขคลื่นของ surface plasmon wave

n_p คือ ดัชนีหักเหของปริซึม

ภายใต้เงื่อนไขของสมการนี้ พลังงานและโมเมนตัมของโฟตอนที่ตกกระทบจะถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนในชั้นโลหะนำไฟฟ้า และส่งผลให้เกิด surface plasmon wave ขึ้นมา

4.2.1.2 ผล Simulation ของโลหะประเภทเงิน กรณีใช้แสงตกกระทบชนิด TM mode เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม Simulation และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ของโลหะประเภทเงิน

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุม Simulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	20.91	21.10	0.92	7423.30
405	20.96	21.46	2.39	9251.40
410	21.04	21.84	3.80	8478.80
415	21.14	22.04	4.26	7925.90
420	21.26	22.06	3.76	8505.90
425	21.39	22.40	4.75	8650.90
430	21.52	22.52	4.65	7961.50
435	21.67	22.57	4.15	6778.60
440	21.83	22.83	4.58	7517.20
445	21.99	23.09	5.00	8284.40
450	22.16	23.36	5.41	7650.70
455	22.34	23.64	5.82	8603.90
460	22.52	23.92	6.22	8463.90

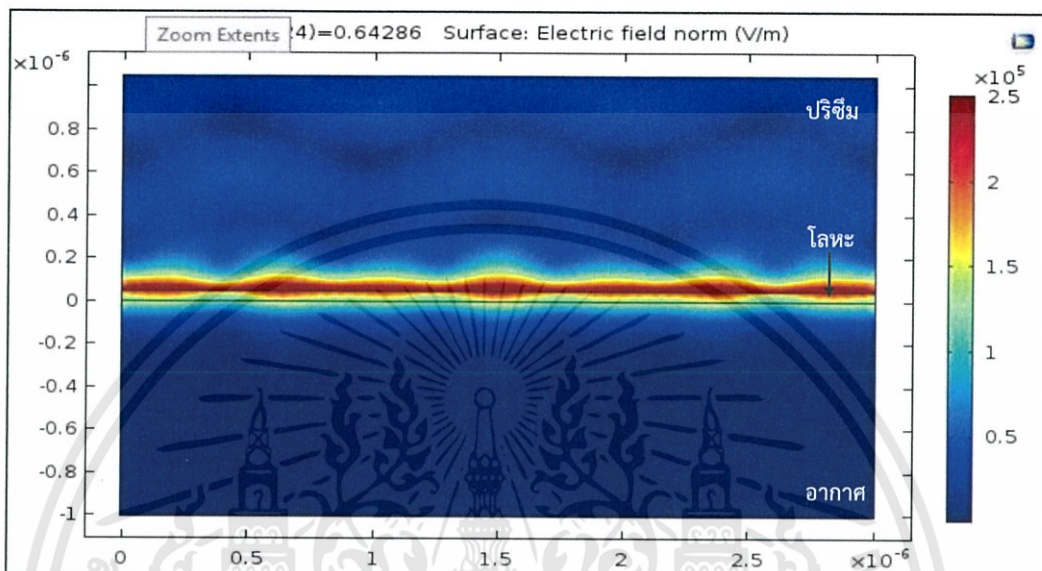
ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
465	22.71	24.11	6.17	6917.60
470	22.89	24.59	7.43	9167.90
475	23.09	24.64	6.73	9644.30
480	23.28	25.08	7.73	9653.80
485	23.48	25.38	8.09	9927.30
490	23.68	25.48	7.60	10662.50
495	23.89	25.79	7.95	9961.30
500	24.10	26.10	8.30	9828.20
505	24.30	26.40	8.64	11979.70
510	24.51	26.61	8.57	10058.10
515	24.73	27.03	9.30	12882.70
520	24.94	27.24	9.22	11986.00
525	25.16	27.39	8.85	10798.00
530	25.38	27.18	7.09	10374.80
535	25.60	27.50	7.42	10653.00
540	25.82	28.00	8.13	12579.50
545	26.04	28.14	8.06	13632.00
550	26.27	28.27	7.61	12575.50
555	26.49	28.49	7.55	13971.00
560	26.72	28.62	7.11	12745.50
565	26.94	28.84	7.03	13296.80
570	27.17	29.17	7.36	15165.00
575	27.41	29.91	9.12	14869.00
580	27.64	30.34	9.79	15148.30
585	27.87	30.47	9.33	13993.00
590	28.10	30.70	9.25	14834.30
595	28.34	30.94	9.17	15024.00
600	28.57	31.17	9.10	15077.30
605	28.81	31.41	9.03	15808.30
610	29.05	31.65	8.95	16229.00
615	29.29	31.89	8.88	16599.00
620	29.53	32.13	8.80	16544.00
625	29.77	32.37	8.73	17523.00
630	30.01	32.61	8.66	16795.00
635	30.25	32.85	8.59	17078.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
640	30.50	33.20	8.85	17299.00
645	30.74	33.42	8.73	16643.30
650	31.00	33.69	8.71	17509.70
655	31.23	33.93	8.64	17196.30
660	31.48	34.18	8.58	18233.70
665	31.73	34.43	8.51	17605.30
670	31.98	34.68	8.44	18007.30
675	32.23	35.13	9.00	17961.30
680	32.48	35.28	8.62	17019.70
685	32.74	35.54	8.55	17609.70
690	32.99	35.79	8.49	18348.70
695	33.24	36.04	8.42	17388.30
700	33.50	36.30	8.36	18357.00
705	33.76	36.56	8.29	17746.30
710	34.01	36.71	7.94	18733.30
715	34.27	35.87	4.67	125030.00
720	34.53	37.33	8.11	19207.70
725	34.79	37.59	8.05	19335.70
730	35.05	37.85	7.99	19447.00
735	35.32	37.91	7.35	20388.70
740	35.58	37.88	6.47	22346.30
745	35.84	38.74	8.09	19231.60
750	36.11	38.61	6.92	20891.00
755	36.38	38.88	6.87	20383.00
760	36.65	39.35	7.37	20567.00
765	36.92	39.32	6.50	21337.30
770	37.19	39.89	7.26	21309.00
775	37.46	40.16	7.21	20261.70
780	37.73	39.93	5.83	22573.70
785	38.00	40.00	5.26	24270.30
790	38.28	40.98	7.05	20856.70
795	38.55	40.95	6.23	22416.30
800	38.83	41.33	6.44	22437.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 มุม 35.87 องศาที่ได้จากการ Simulate ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 125030 v/m เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 34.27 องศา ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี dispersion relation มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.67 % แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

จากรูปที่ 4.11 ในการ Simulate เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสม ผลปรากฏว่ารูปที่ 4.11 มีความชัดเจนในการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สดุ

4.2.1.3 ผล Simulation ของโลหะทองแดง กรณีใช้แสงตกกระทบชนิด TM mode เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,0,1 ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุมSimulationและค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ของโลหะประเภททองแดง

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	21.46	19.30	10.05	99269.50
405	21.42	19.70	8.05	37293.83

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
410	21.43	20.09	6.24	22496.83
415	21.46	20.43	4.80	11699.33
420	21.53	20.70	3.84	13840.17
425	21.61	20.81	3.70	11693.75
430	21.70	21.03	3.11	12739.50
435	21.85	21.34	2.35	30117.00
440	22.01	21.44	2.59	98845.17
445	22.17	21.55	2.81	39511.67
450	22.34	22.08	1.16	42202.50
455	22.51	22.15	1.59	161370.00
460	22.71	22.77	0.26	18177.33
465	22.90	22.76	0.62	29455.25
470	23.09	23.09	0.02	19071.60
475	23.29	23.37	0.35	20102.33
480	23.49	23.45	0.15	89238.50
485	23.68	23.67	0.05	125220.00
490	23.88	23.88	0.02	297126.00
495	24.08	24.10	0.06	99358.50
500	24.31	24.35	0.18	148355.00
505	24.53	24.61	0.32	129320.00
510	24.76	25.41	2.62	63638.67
515	24.98	25.12	0.55	63328.83
520	25.21	25.37	0.63	55095.60
525	25.45	25.60	0.58	104619.67
530	25.70	25.93	0.91	38874.67
535	25.94	26.06	0.45	47436.67
540	26.19	26.57	1.45	126552.50
545	26.44	26.36	0.29	54382.25
550	26.66	27.51	3.19	55128.50
555	26.83	26.73	0.35	63115.25
560	27.00	27.21	0.78	66996.25
565	27.18	27.66	1.78	152054.00
570	27.36	28.08	2.63	68084.00
575	27.55	28.47	3.33	133770.00
580	27.75	28.84	3.93	73221.00

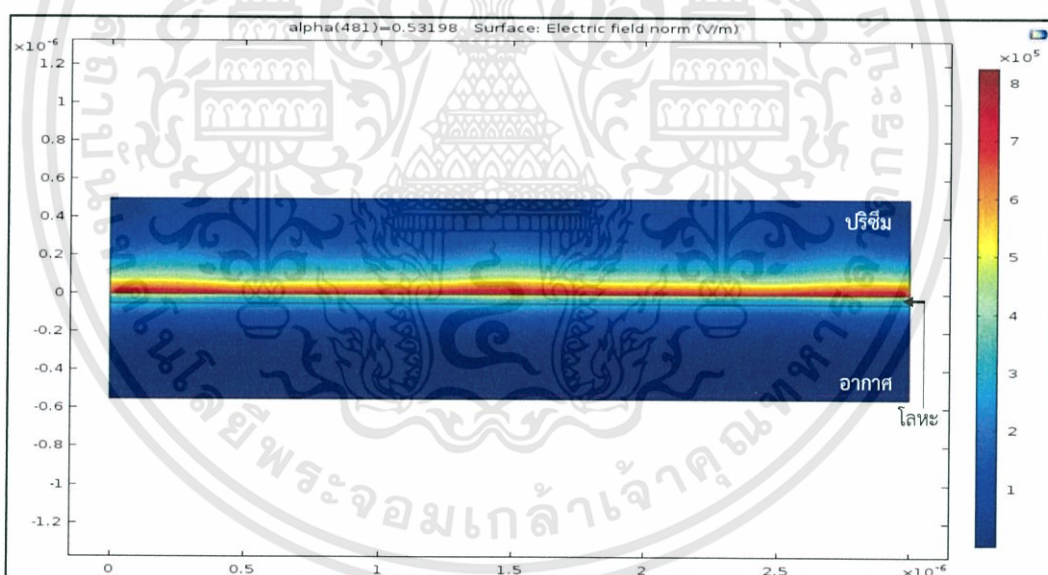
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
585	27.88	27.21	2.42	73958.00
590	27.99	27.62	1.32	64753.00
595	28.11	28.00	0.41	63753.00
600	28.25	28.28	0.10	47331.67
605	28.40	28.57	0.59	38125.67
610	28.56	28.85	1.00	55172.33
615	28.73	29.07	1.18	41483.67
620	28.92	28.77	0.51	49800.00
625	29.11	29.24	0.45	43135.67
630	29.31	29.31	0.01	62476.67
635	29.51	29.37	0.47	82189.00
640	29.71	29.47	0.82	58940.50
645	29.92	29.48	1.47	99959.67
650	30.13	29.53	1.99	92946.00
655	30.34	30.00	1.12	98718.00
660	30.55	30.16	1.29	56388.67
665	30.78	30.32	1.49	88982.00
670	31.01	30.48	1.70	308996.67
675	31.23	33.04	5.79	46054.00
680	31.46	33.18	5.45	125556.67
685	31.69	30.92	2.44	69549.00
690	31.93	31.07	2.69	95384.33
695	32.16	33.55	4.32	28129.75
700	32.39	33.68	3.97	82067.00
705	32.63	31.49	3.50	158870.00
710	32.87	31.62	3.81	99559.50
715	33.11	34.02	2.74	62333.50
720	33.36	34.36	3.01	38150.33
725	33.60	34.23	1.88	42178.60
730	33.84	34.37	1.55	127470.00
735	34.09	34.38	0.85	42612.33
740	34.34	34.53	0.56	45858.67
745	34.58	34.63	0.13	45846.67
750	34.84	32.60	6.42	72767.25
755	35.09	34.81	0.78	274430.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
760	35.34	34.90	1.24	67689.33
765	35.59	34.99	1.69	40258.67
770	35.85	34.44	3.92	213770.00
775	36.10	35.16	2.61	118693.33
780	36.36	36.74	1.04	136686.67
785	36.62	35.32	3.55	172230.00
790	36.88	36.94	0.16	28344.67
795	37.14	37.05	0.25	37016.33
800	37.40	37.06	0.91	47520.00

จากตารางที่ 4.12 มุม 31.01 องศาที่ได้จากการ Simulate ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 308996.67 v/m เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 30.48 องศา ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี dispersion relation มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.70 % แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

จากรูปที่ 4.12 ในการ Simulate เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสม ผลปรากฏว่ารูปที่ 4.12 มีความชัดเจนในการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศดีที่สุดใน

4.2.2 กรณีใช้แสงตกกระทบบนชนิด TM mode เมื่อแสงตกกระทบบนมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 435nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0
 4.2.2.1 ผล Simulation ของโลหะประเภท ทอง ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.13 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม_{Simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ของโลหะประเภททอง

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุม _{Simulation} (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
435	77.30	78.20	1.16	40971.33
440	64.89	64.50	0.60	143903.33
445	56.24	54.90	2.39	227063.33
450	49.58	49.80	0.44	201875.00
455	44.42	45.40	2.20	41136.33
460	40.42	40.20	0.55	193285.00
465	37.33	38.70	3.66	205220.00
470	34.95	36.00	3.01	46968.00
475	33.10	33.20	0.30	25467.33
480	31.67	32.00	1.04	20419.00
485	30.56	30.80	0.78	29763.00
490	29.70	29.87	0.56	81138.75
495	29.03	28.30	2.51	232415.00
500	28.51	27.40	3.91	20716.33
505	28.13	26.44	5.98	352110.00
510	27.84	26.44	5.01	163235.00
515	27.63	26.43	4.36	137170.00
520	26.70	26.90	0.74	148505.00
525	27.40	27.00	1.46	45386.50
530	27.36	27.30	0.21	75023.00
535	27.35	27.60	0.91	181315.00
540	27.38	27.90	1.91	39273.67
545	27.43	28.10	2.46	66751.50
550	27.50	28.40	3.27	89342.00
555	27.59	28.60	3.66	54265.00
560	27.70	28.90	4.33	102720.00
565	27.82	29.10	4.59	79238.50
570	27.96	29.40	5.16	70545.00

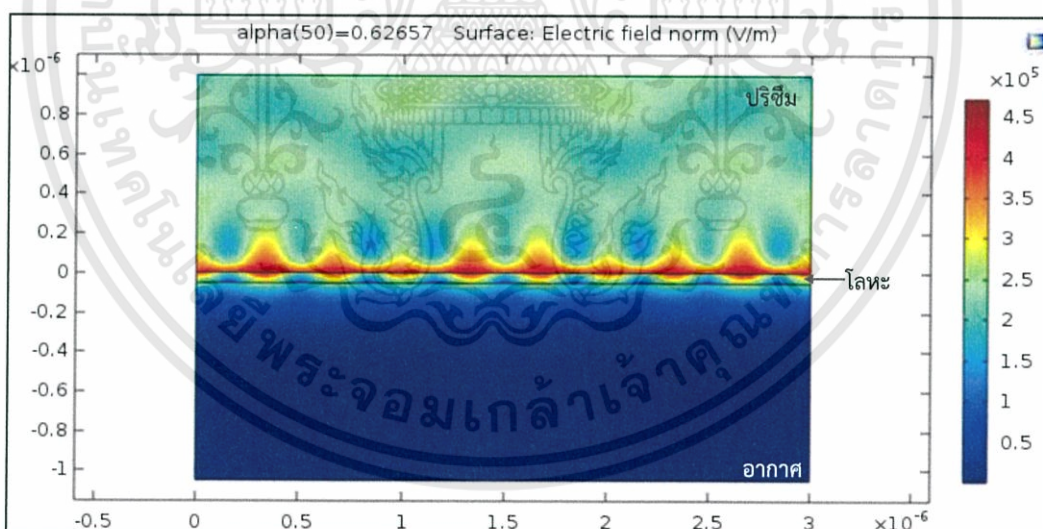
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{\max} (เฉลี่ย) (v/m)
575	28.11	29.50	4.96	33410.50
580	28.26	29.80	5.44	68100.50
585	28.43	30.00	5.54	47565.50
590	28.60	30.20	5.60	40166.00
595	28.78	30.60	6.34	61513.00
600	28.96	30.80	6.35	126053.33
605	29.15	30.90	6.00	59707.33
610	29.35	31.30	6.66	65569.33
615	29.55	31.50	6.61	103256.67
620	29.75	31.70	6.55	201600.00
625	29.96	29.50	1.52	127724.00
630	30.17	29.80	1.22	66400.33
635	30.38	32.40	6.64	123290.00
640	30.60	32.60	6.54	195180.00
645	30.82	32.80	6.43	281013.33
650	31.04	32.90	5.99	77216.50
655	31.26	33.30	6.51	121243.33
660	31.49	33.50	6.38	162236.67
665	31.72	33.70	6.25	210850.00
670	31.95	33.90	6.10	250950.00
675	32.18	34.20	6.26	204185.00
680	32.32	34.30	6.12	292876.67
685	32.66	34.60	5.95	23685.67
690	32.90	34.80	5.79	181140.00
695	33.13	35.00	5.63	201196.67
700	33.38	34.40	3.07	263820.00
705	33.62	35.40	5.29	208966.67
710	33.86	35.60	5.13	197220.00
715	34.11	35.90	5.25	253590.00
720	34.36	36.00	4.77	1473466.67
725	34.61	36.10	4.31	130537.50
730	34.86	36.50	4.71	183290.00
735	35.11	36.70	4.53	187950.00
740	35.36	36.90	4.35	239096.67
745	35.62	36.90	3.60	144023.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
750	35.87	36.90	2.86	116590.00
755	36.13	36.90	2.13	116210.00
760	36.39	37.70	3.60	178130.00
765	36.65	38.00	3.68	165046.67
770	36.91	36.90	0.03	161775.00
775	37.17	38.20	2.76	133696.67
780	37.44	38.50	2.84	216860.00
785	37.70	38.80	2.91	157643.33
790	37.97	39.00	2.71	158976.67
795	38.24	40.20	5.12	257457.50
800	38.51	39.50	2.58	133503.33

จากตารางที่ 4.13 มุม 35.90 องศาที่ได้จากการ Simulate ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 253590 v/m เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 34.11 องศา ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี dispersion relation มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.25 % แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทอง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

ในการ Simulate เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎี dispersion relation จึงได้รูปที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.13

4.2.2.2 ผล Simulation ของโลหะประเภทเงิน กรณีใช้แสงตกกระทบชนิดTM mode เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,0 ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม_{Simulation} และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ของโลหะประเภทเงิน

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุม _{Simulation} (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	20.91	21.11	0.96	6505.40
405	20.96	21.46	2.39	6801.60
410	21.04	21.84	3.80	7695.40
415	21.14	22.14	4.73	9024.30
420	21.26	22.06	3.76	7729.80
425	21.39	22.38	4.67	7874.90
430	21.52	22.35	3.85	7424.50
435	21.67	22.56	4.08	6527.70
440	21.83	22.83	4.58	7006.90
445	21.99	23.09	5.00	7374.60
450	22.16	23.36	5.41	7824.90
455	22.34	23.64	5.82	8177.70
460	22.52	23.92	6.22	8557.50
465	22.71	24.11	6.17	8038.90
470	22.89	23.49	2.62	7034.70
475	23.09	24.69	6.93	8963.50
480	23.28	25.08	7.73	7879.70
485	23.48	25.38	8.09	10241.90
490	23.68	25.48	7.60	9906.20
495	23.89	25.89	8.37	9933.00
500	24.10	24.90	3.32	8798.30
505	24.30	26.40	8.64	11138.70
510	24.51	25.51	4.08	9673.50
515	24.73	27.13	9.70	10566.30
520	24.94	27.24	9.22	10487.30
525	25.16	27.39	8.85	9903.60
530	25.38	27.18	7.12	10684.30
535	25.60	27.50	7.42	11453.80

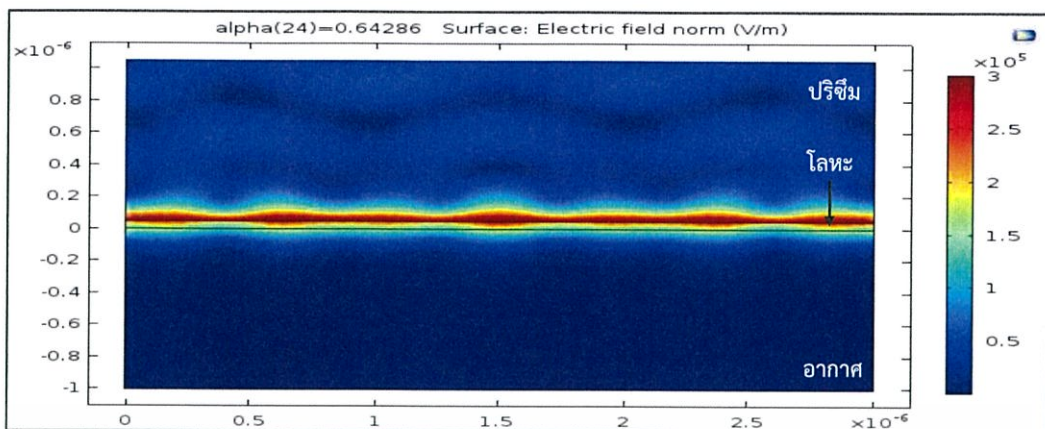
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
540	25.82	27.40	6.14	12454.30
545	26.04	28.14	8.06	13699.00
550	26.27	28.27	7.61	13092.00
555	26.49	28.49	7.55	13701.00
560	26.72	28.62	7.11	14230.80
565	26.94	28.84	7.05	14388.80
570	27.17	28.97	6.62	14068.00
575	27.41	29.91	9.12	14944.30
580	27.64	30.14	9.05	15632.30
585	27.87	30.47	9.33	13428.00
590	28.10	30.70	9.25	14342.30
595	28.34	30.94	9.17	14309.00
600	28.57	31.17	9.10	15436.70
605	28.81	31.41	9.03	15315.00
610	29.05	31.65	8.95	16819.00
615	29.29	31.89	8.88	16604.30
620	29.53	32.13	8.81	17021.30
625	29.77	32.37	8.73	18152.00
630	30.01	32.61	8.66	18805.30
635	30.253	32.85	8.59	18500.30
640	30.50	33.20	8.85	17194.70
645	30.74	33.44	8.78	18139.00
650	31.00	33.69	8.71	17781.30
655	31.23	33.93	8.64	17546.30
660	31.48	34.18	8.58	19112.00
665	31.73	34.43	8.51	18148.00
670	31.98	34.68	8.44	18310.00
675	32.23	35.13	9.00	18058.30
680	32.48	35.28	8.62	18596.30
685	32.74	35.54	8.55	18389.00
690	32.99	35.79	8.49	18904.70
695	33.24	36.04	8.42	18115.70
700	33.50	36.30	8.36	18532.00
705	33.76	36.56	8.29	19014.30
710	34.01	36.71	7.94	20499.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (แวลีย์) (v/m)
715	34.27	37.17	8.46	19018.30
720	34.53	36.34	5.22	144270.00
725	34.79	37.34	7.31	20640.30
730	35.05	37.85	7.99	21070.30
735	35.32	37.92	7.36	22246.00
740	35.58	38.18	7.31	23367.70
745	35.84	38.74	8.09	20547.70
750	36.11	38.71	7.20	22991.70
755	36.38	38.88	6.87	22912.70
760	36.65	40.95	11.75	25054.30
765	36.92	39.15	6.04	23642.30
770	37.19	39.32	5.73	23394.70
775	37.46	39.49	5.42	25029.30
780	37.73	40.16	6.43	22688.00
785	38.00	40.23	5.86	22979.70
790	38.28	40.00	4.51	29323.00
795	38.55	40.98	6.29	23208.00
800	38.83	41.03	5.67	26481.00

จากตารางที่ 4.14 มุม 34.53 องศาที่ได้จากการ Simulate ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 144270 v/m เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 36.34 องศาที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี dispersion relation มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.22 % แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท เงิน ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

ในการ Simulate เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎี dispersion relation จึงได้รูปที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.14

4.2.2.3 ผล Simulation ของโลหะทองแดง กรณีใช้แสงตกกระทบชนิด TM mode เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400nm ถึง 800nm มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแกน x,y,z เท่ากับ 1,1,1 ผลเป็นไปดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงผลของค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ค่ามุม Simulation และค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่เกิดจากการ Simulate เทียบกับค่ามุมที่คิดได้จากทฤษฎี dispersion relation ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ของโลหะประเภททองแดง

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
400	21.46	19.30	10.05	136396.67
405	21.42	19.70	8.05	57479.67
410	21.43	20.09	6.24	38094.67
415	21.46	20.43	4.80	14900.17
420	21.53	20.70	3.84	19265.00
425	21.61	20.81	3.70	15616.75
430	21.70	21.03	3.11	18741.75
435	21.85	21.34	2.35	41952.83
440	22.01	21.44	2.59	133670.00
445	22.17	21.55	2.81	54402.33
450	22.34	22.08	1.16	54402.33
455	22.51	22.15	1.59	198290.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

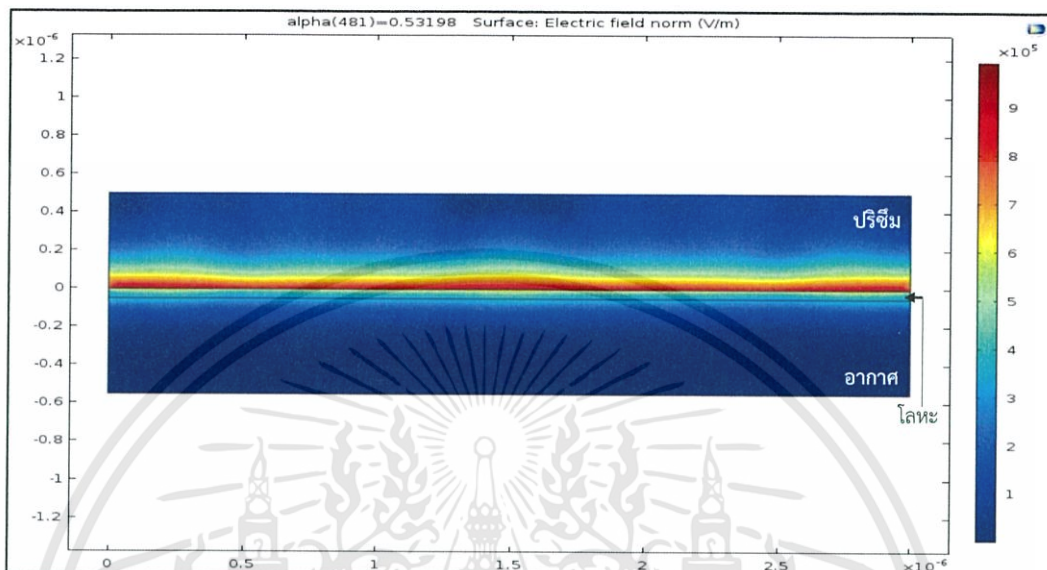
ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E_{max} (เฉลี่ย) (v/m)
460	22.71	22.77	0.26	29086.67
465	22.90	22.76	0.62	39085.00
470	23.09	23.09	0.02	24879.33
475	23.29	23.37	0.35	30775.83
480	23.49	23.45	0.15	124188.00
485	23.68	23.67	0.05	202218.00
490	23.88	23.88	0.02	262010.00
495	24.08	24.10	0.06	135661.67
500	24.31	24.35	0.18	229865.00
505	24.53	24.61	0.32	188836.67
510	24.76	25.41	2.62	90628.40
515	24.98	25.12	0.55	84429.33
520	25.21	25.37	0.63	67203.33
525	25.45	25.60	0.58	137616.67
530	25.70	25.93	0.91	56883.33
535	25.94	26.06	0.45	63056.00
540	26.19	26.57	1.45	165485.00
545	26.44	26.36	0.29	72952.00
550	26.66	27.51	3.19	67803.33
555	26.83	26.73	0.35	91514.67
560	27.00	27.21	0.78	87490.33
565	27.18	27.66	1.78	206926.67
570	27.36	28.08	2.63	101053.33
575	27.55	28.47	3.33	162415.00
580	27.75	28.84	3.93	101753.50
585	27.88	27.21	2.42	64869.25
590	27.99	27.62	1.32	79308.50
595	28.11	28.00	0.41	71082.50
600	28.25	28.28	0.10	62104.67
605	28.40	28.57	0.59	52675.00
610	28.56	28.85	1.00	70948.00
615	28.73	29.07	1.18	54230.00
620	28.92	28.77	0.51	58201.67
625	29.11	29.24	0.45	58628.33
630	29.31	29.31	0.01	84836.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	มุมทฤษฎี (องศา)	มุมSimulation (องศา)	ค่าคลาดเคลื่อนของมุม (%)	E _{max} (เฉลี่ย) (v/m)
635	29.51	29.37	0.47	92410.67
640	29.71	29.47	0.82	66290.33
645	29.92	29.48	1.47	117043.33
650	30.13	29.53	1.99	106593.33
655	30.34	30.00	1.12	114803.33
660	30.55	30.16	1.29	66989.67
665	30.78	30.32	1.49	99653.00
670	31.01	30.48	1.70	367390.00
675	31.23	33.04	5.79	64419.67
680	31.46	33.18	5.45	167580.00
685	31.69	30.92	2.44	75583.00
690	31.93	31.07	2.69	90699.33
695	32.16	33.55	4.32	36551.33
700	32.39	33.68	3.97	107162.33
705	32.63	31.49	3.50	222050.00
710	32.87	31.62	3.81	142050.00
715	33.11	34.02	2.74	81692.33
720	33.36	34.36	3.01	48924.67
725	33.60	34.23	1.88	63599.33
730	33.84	34.37	1.55	175876.67
735	34.09	34.38	0.85	54022.00
740	34.34	34.53	0.56	61414.67
745	34.58	34.63	0.13	62995.00
750	34.84	32.60	6.42	87179.00
755	35.09	34.81	0.78	327626.67
760	35.34	34.90	1.24	274430.00
765	35.59	34.99	1.69	53767.67
770	35.85	34.44	3.92	263793.33
775	36.10	35.16	2.61	154160.00
780	36.36	36.74	1.04	177080.00
785	36.62	35.32	3.55	162026.67
790	36.88	36.94	0.16	38982.33
795	37.14	37.05	0.25	51855.33
800	37.40	37.06	0.91	53276.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.15 มุม 30.48 องศาที่ได้จากการ Simulate ทำให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด 367390.00 v/m เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 31.01 องศา ที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี dispersion relation มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.70 % แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นโลหะกับชั้นอากาศของโลหะประเภท ทองแดง ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

ในการ Simulate เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณระหว่างรอยต่อโลหะกับอากาศ ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎี dispersion relation จึงได้รูปที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.15

4.3 กราฟที่ได้จากตารางบันทึกผลการทดลอง

4.3.1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบ แล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

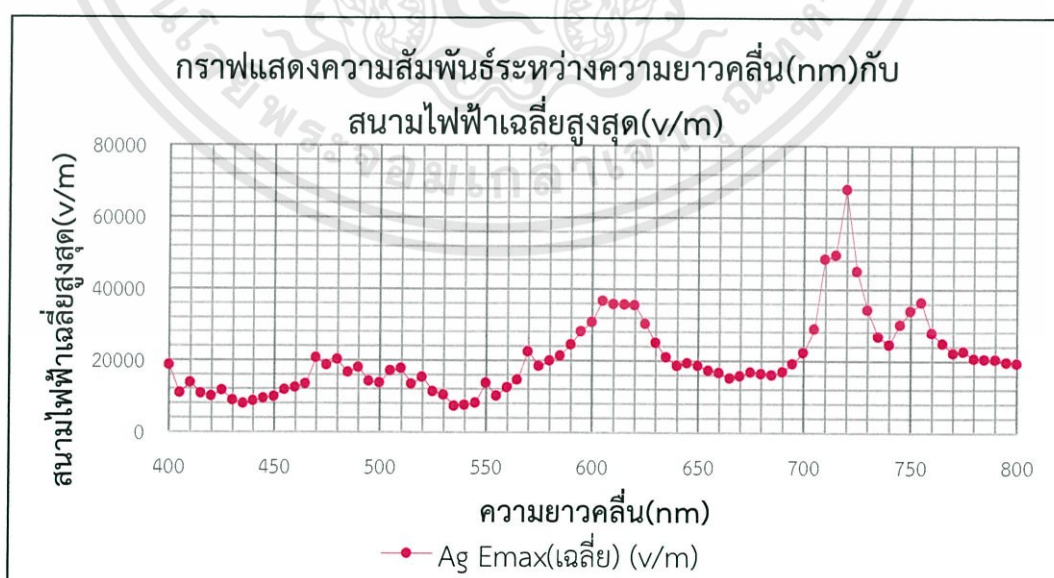
ในส่วนนี้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการ Simulate กับความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm ในกรณีที่แสงตกกระทบเป็นชนิด TM mode ซึ่งกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า x,y,z เป็น $1,0,1$ ของโลหะประเภททอง เงิน และทองแดงตามลำดับ

4.3.1.1 โลหะประเภท ทอง



รูปที่ 4.16 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.1 ของโลหะประเภท ทอง

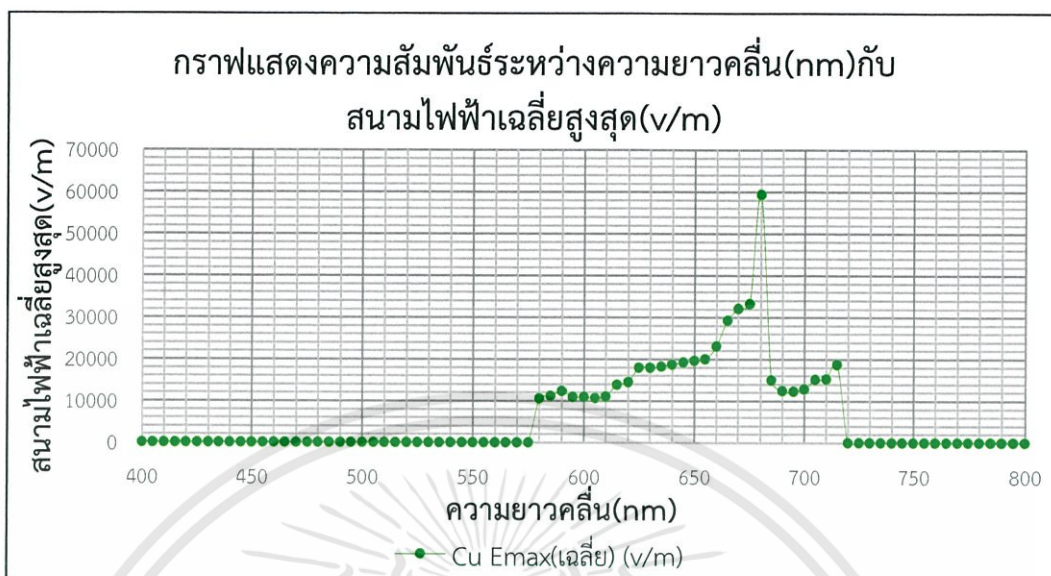
4.3.1.2 โลหะประเภท เงิน



รูปที่ 4.17 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.2 ของโลหะประเภท เงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

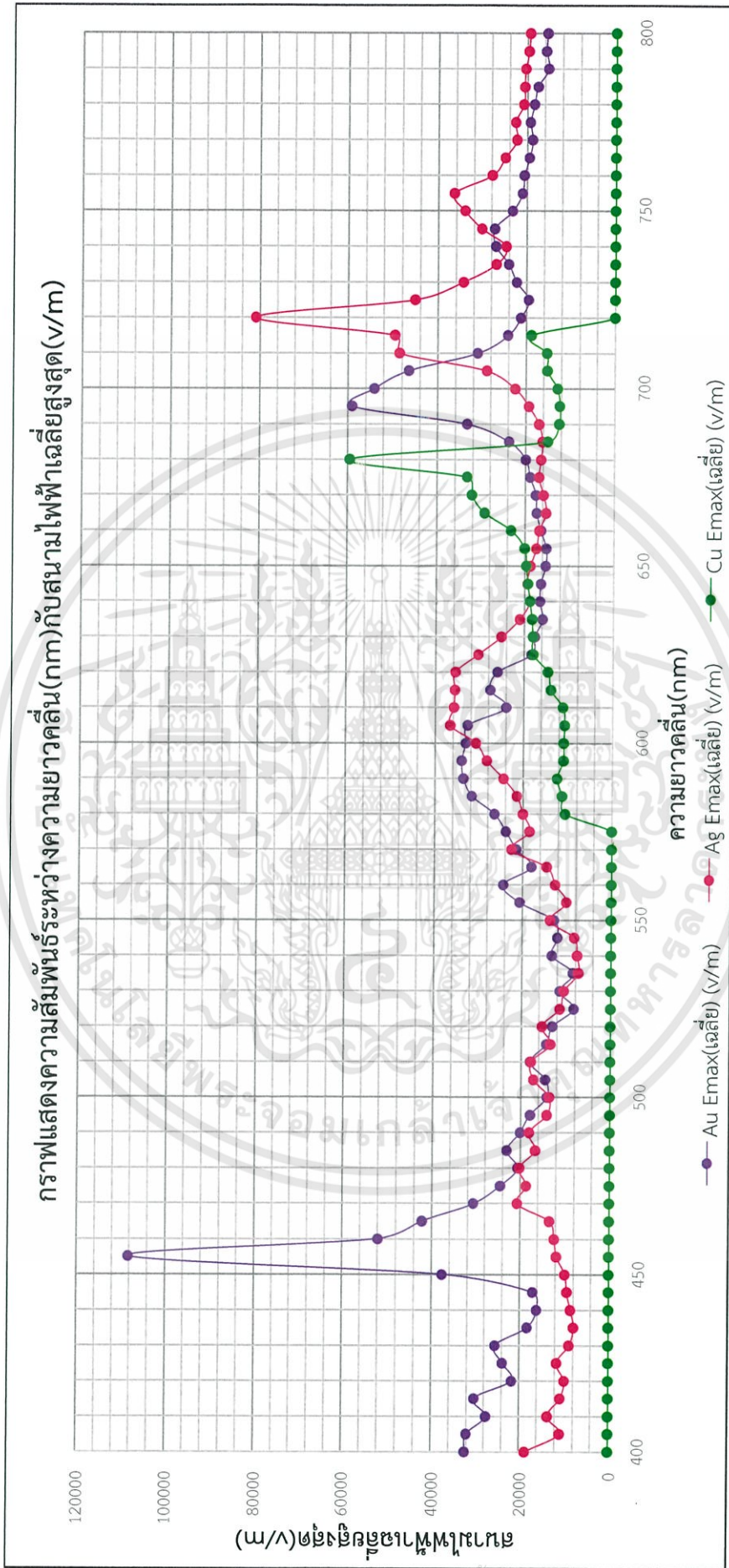
4.3.1.3 โลหะประเภท ทองแดง



รูปที่ 4.18 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.3 ของโลหะประเภท ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 โลหะ 3 ชนิด

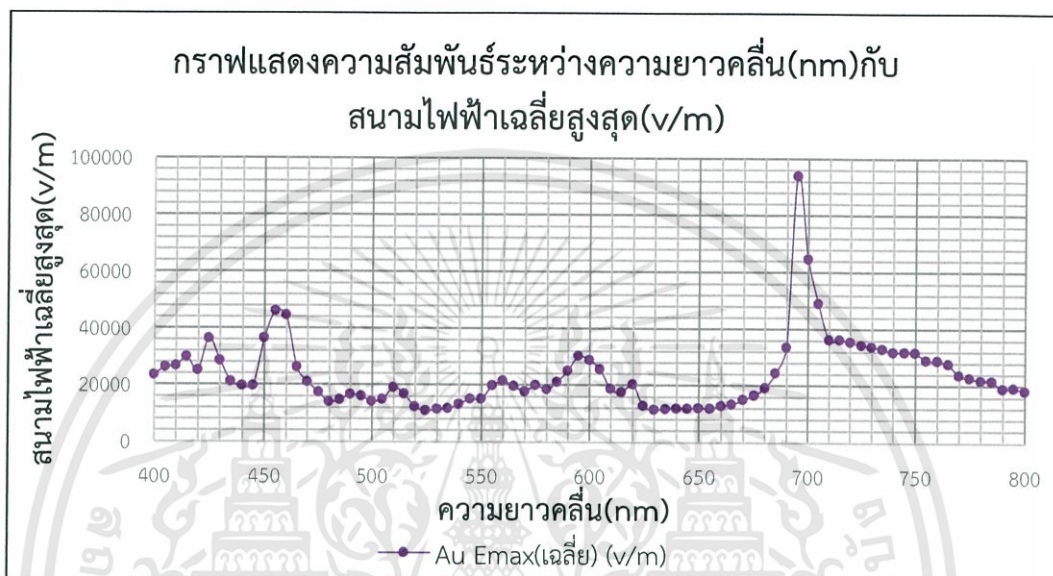


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm)กับค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด(v/m) ของโลหะ 3 ชนิด ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

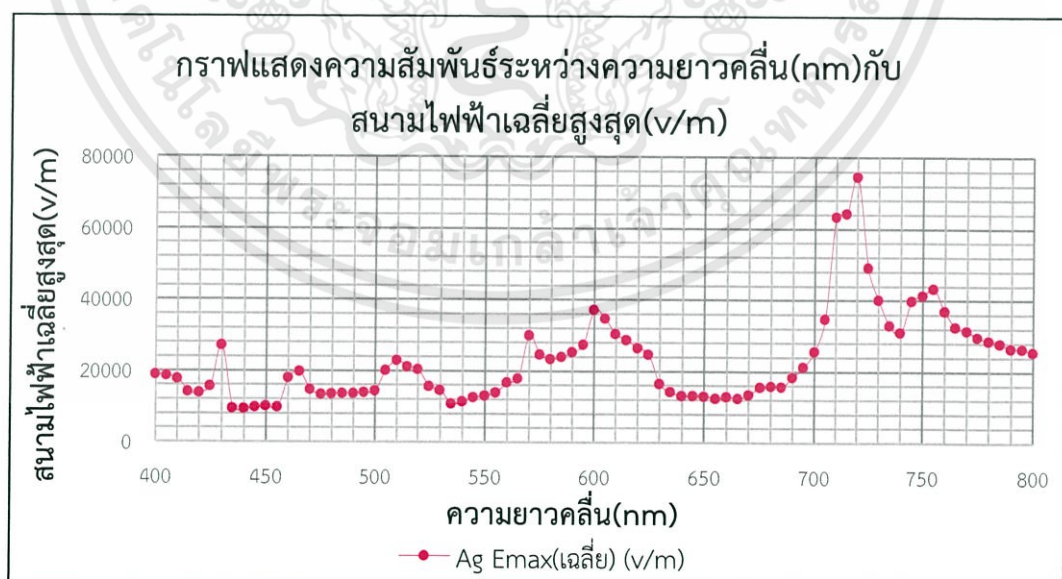
ในส่วนนี้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการ Simulate กับความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm ในกรณีนี้ที่แสงตกกระทบเป็นชนิด TM mode ซึ่งกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า x,y,z เป็น $1,1,0$ ของโลหะประเภททอง เงิน และทองแดง ตามลำดับ

4.3.1.5 โลหะประเภท ทอง



รูปที่ 4.20 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.4 ของโลหะประเภท ทอง

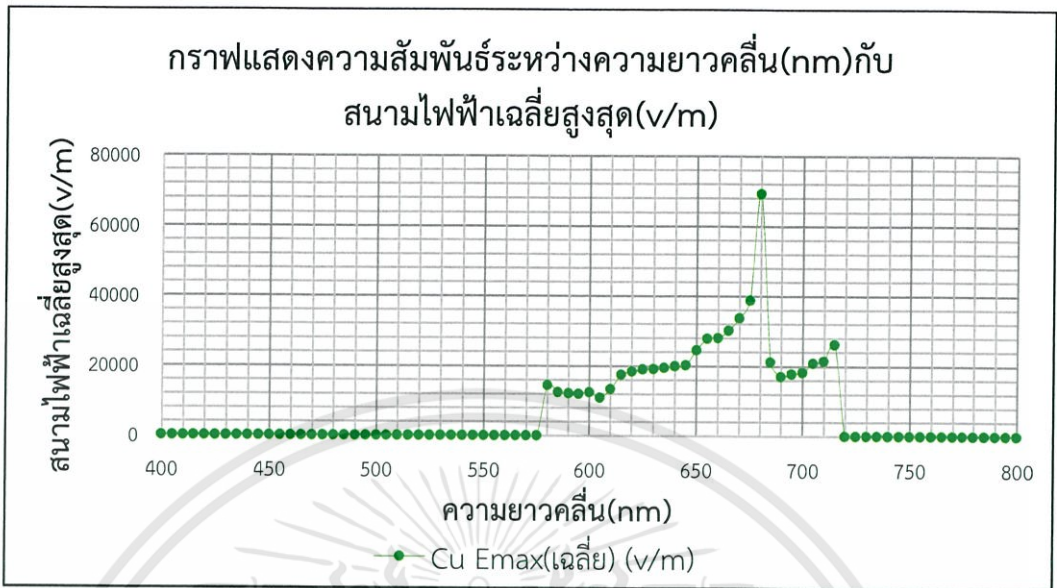
4.3.1.6 โลหะประเภท เงิน



รูปที่ 4.21 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.5 ของโลหะประเภท เงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

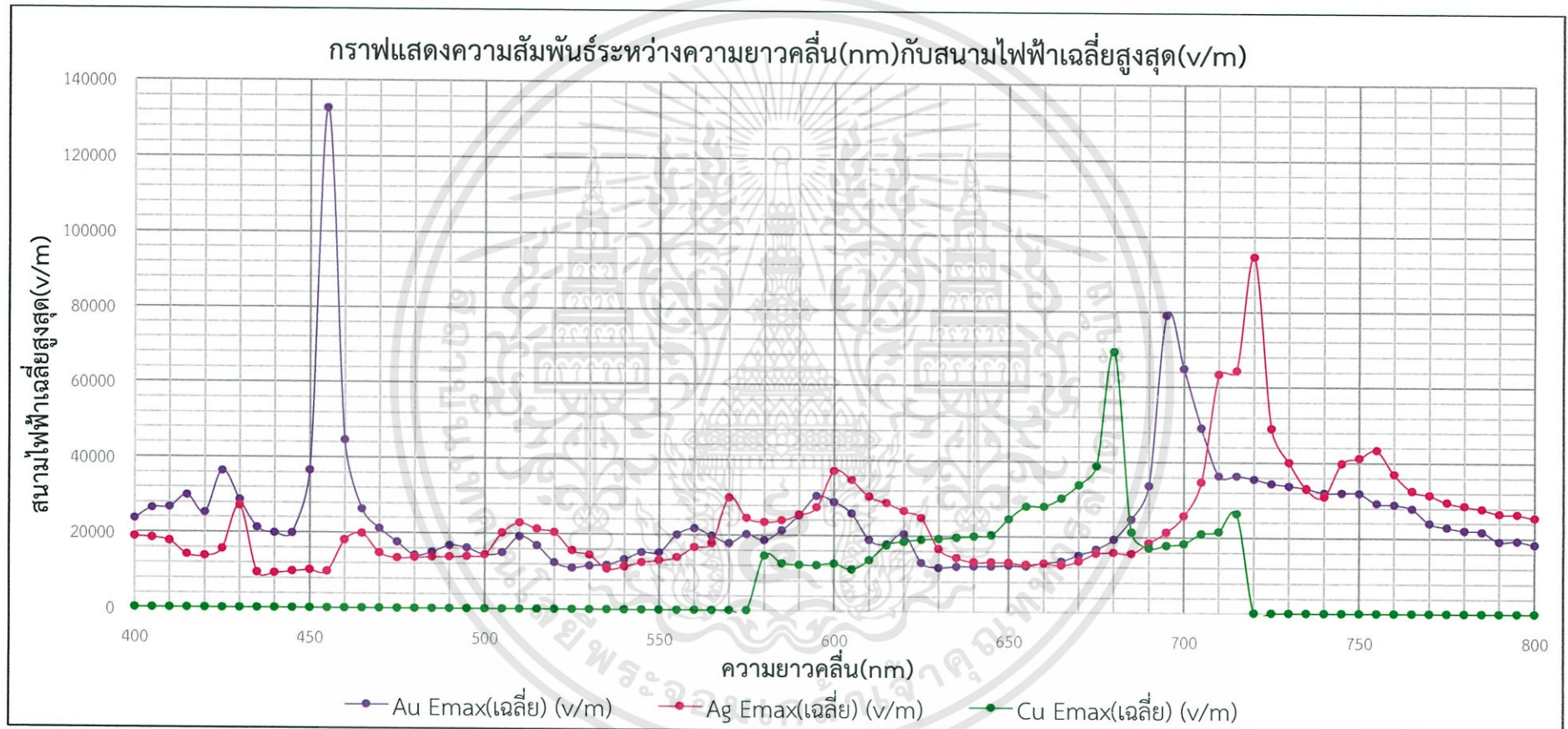
4.3.1.7 โลหะประเภท ทองแดง



รูปที่ 4.22 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.6 ของโลหะประเภท ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

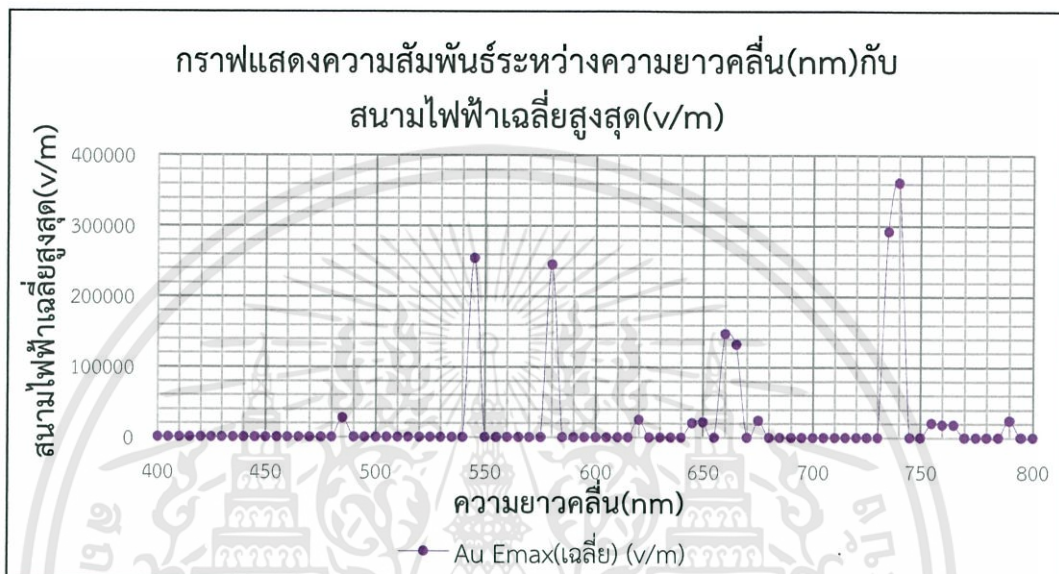
4.3.1.8 โลหะ 3 ชนิด



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm)กับค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด(v/m) ของโลหะ 3 ชนิด ที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

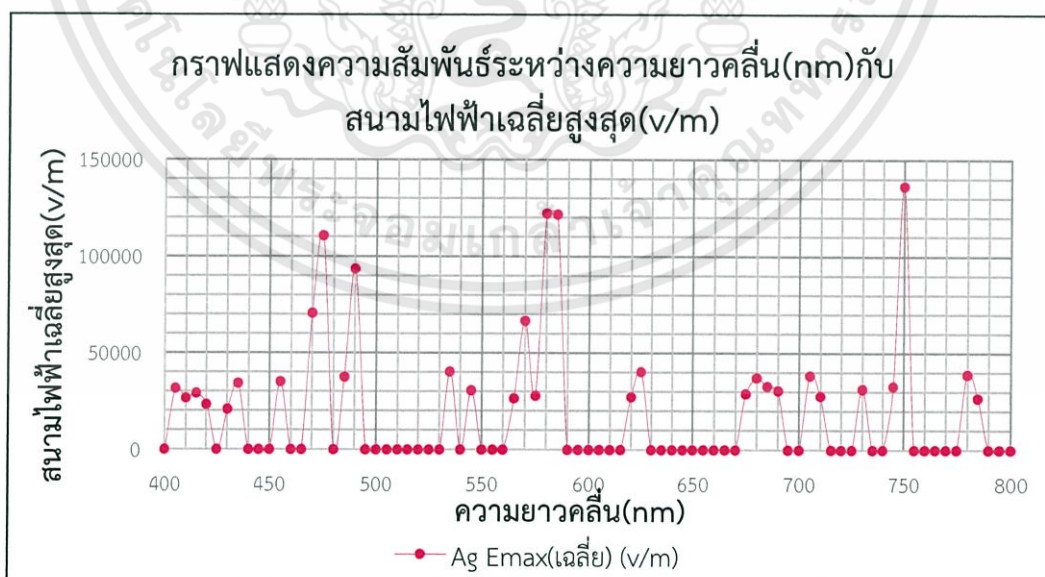
ในส่วนนี้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการ Simulate กับความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm ในกรณีที่แสงตกกระทบเป็นชนิด TE mode ซึ่งกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า x,y,z เป็น 0,0,1 ของโลหะประเภททอง เงิน และทองแดงตามลำดับ

4.3.1.9 โลหะประเภท ทอง



รูปที่ 4.24 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.7 ของโลหะประเภท ทอง

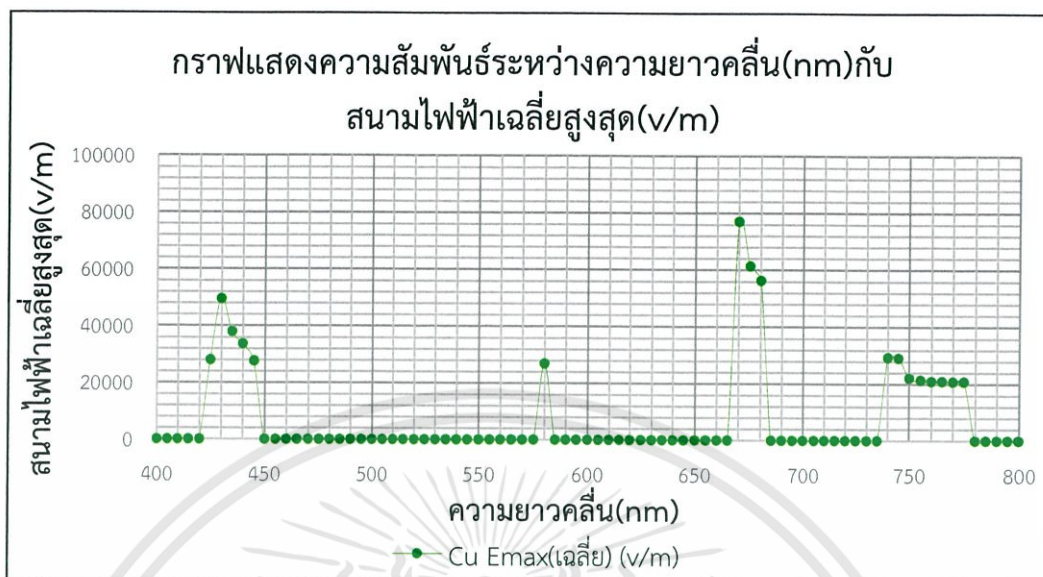
4.3.1.10 โลหะประเภท เงิน



รูปที่ 4.25 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.8 ของโลหะประเภท เงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

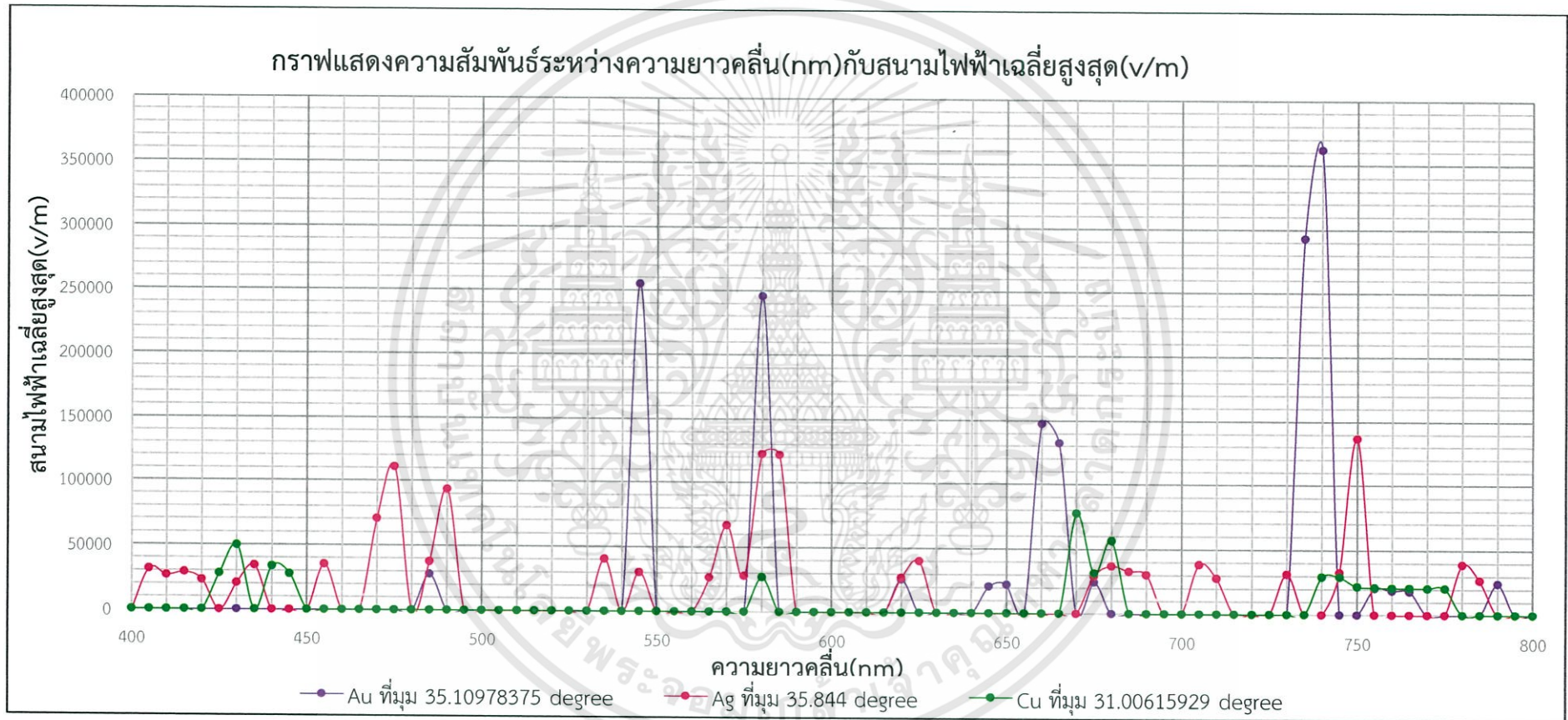
4.3.1.11 โลหะประเภท ทองแดง



รูปที่ 4.26 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.9 ของโลหะประเภท ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.12 โลหะ 3 ชนิด

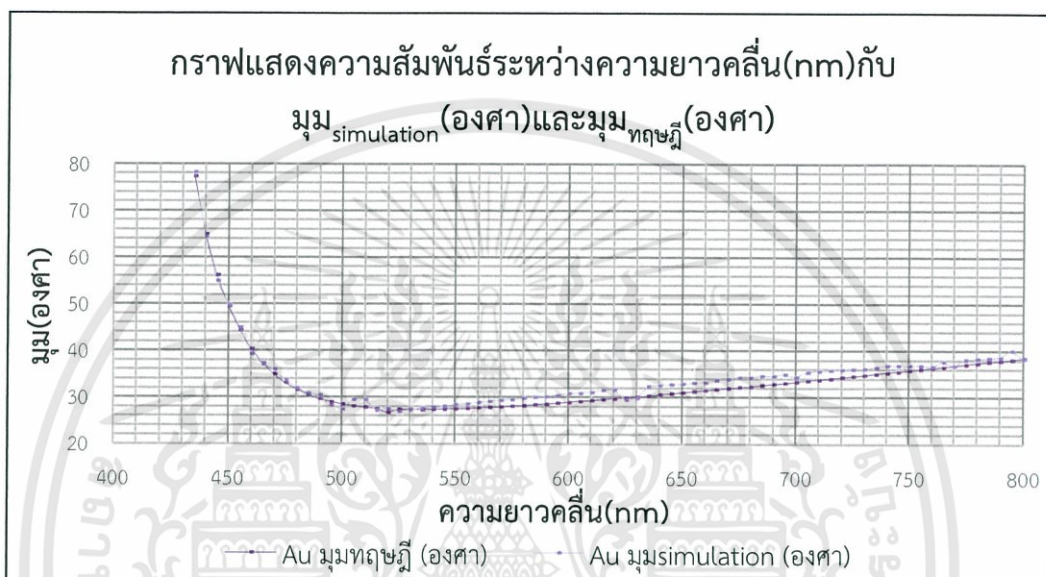


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm)กับค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด(v/m) ของโลหะ 3 ชนิด ที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 0,0,1 ในกรณีกำหนดค่ามุมตกกระทบแล้วเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น

4.3.2 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่น แล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ

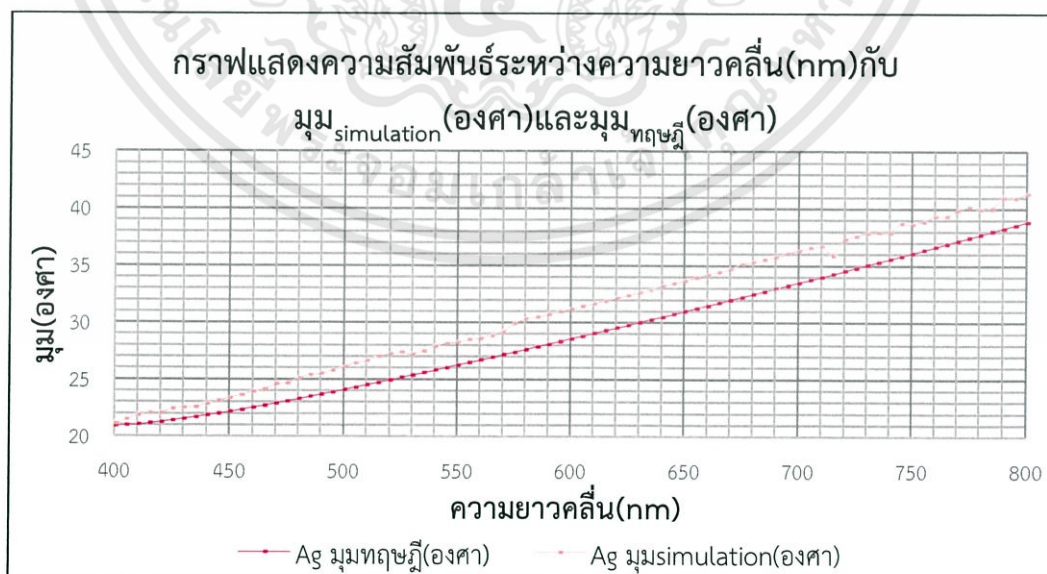
ในส่วนนี้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการ Simulate กับความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm ในกรณีที่แสงตกกระทบเป็นชนิด TM mode ซึ่งกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า x,y,z เป็น 1,0,1 ของโลหะประเภททอง เงิน และทองแดง ตามลำดับ

4.3.2.1 โลหะประเภท ทอง



รูปที่ 4.28 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.10 ของโลหะประเภท ทอง

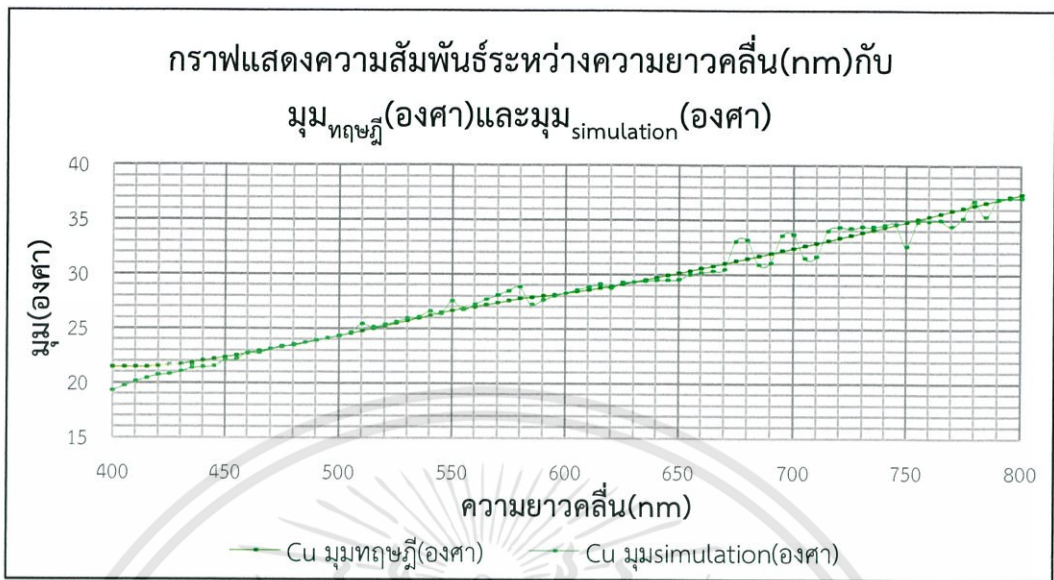
4.3.2.2 โลหะประเภท เงิน



รูปที่ 4.29 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.11 ของโลหะประเภท เงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

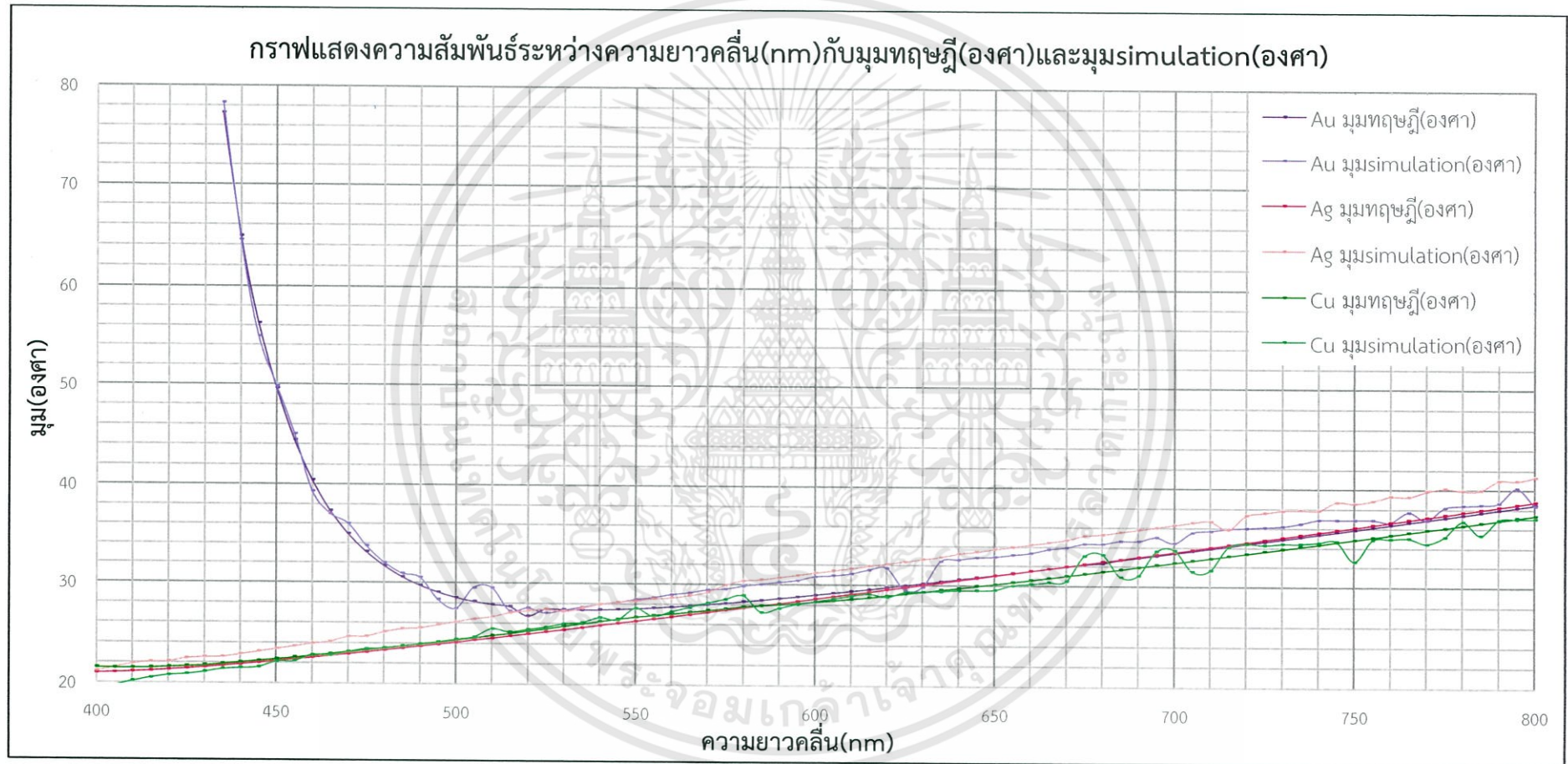
4.3.2.3 โลหะประเภท ทองแดง



รูปที่ 4.30 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.12 ของโลหะประเภท ทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

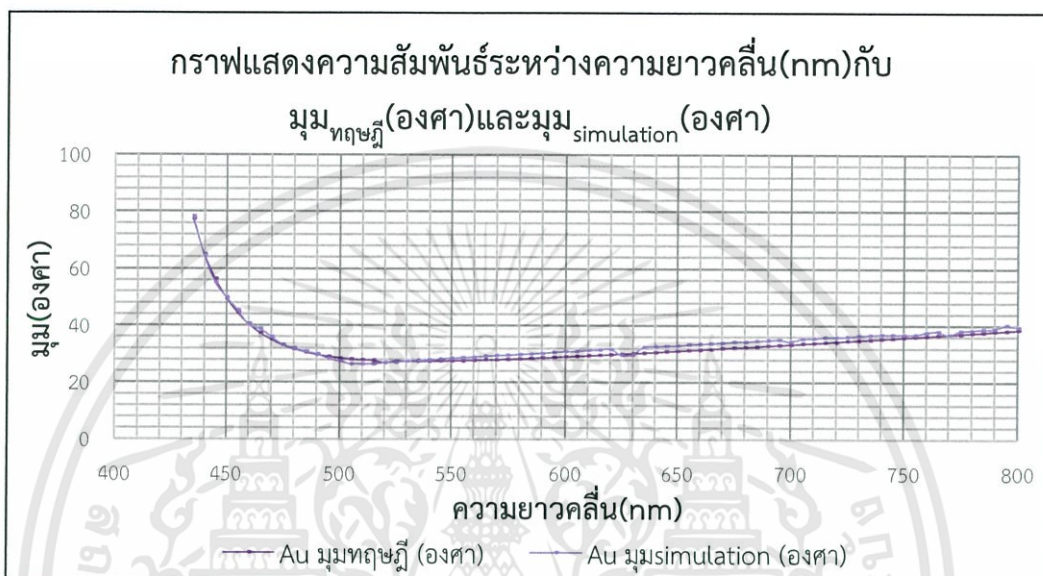
4.3.2.4 โลหะ 3 ชนิด



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm)กับค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด(v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1 ในกรณี กำหนดค่าความยาวคลื่นแล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ

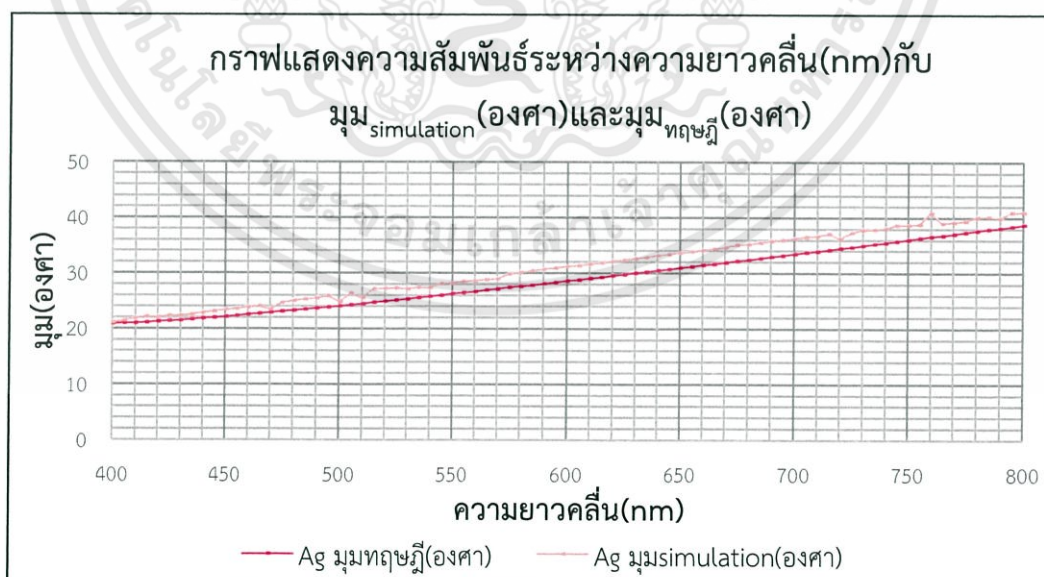
ในส่วนนี้เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ได้จากการ Simulate กับความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm ในกรณีที่แสงตกกระทบบนเป็นชนิด TM mode ซึ่งกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า x,y,z เป็น 1,1,0 ของโลหะประเภททอง เงิน และทองแดงตามลำดับ

4.3.2.5 โลหะประเภท ทอง



รูปที่ 4.32 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.13 ของโลหะประเภท ทอง

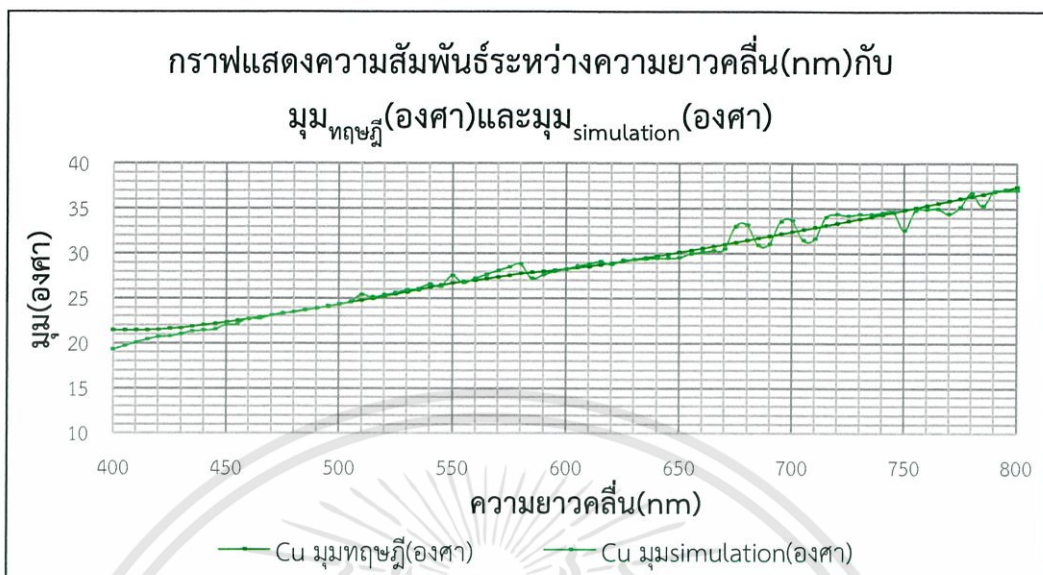
4.3.2.6 โลหะประเภท เงิน



รูปที่ 4.33 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.14 ของโลหะประเภท เงิน

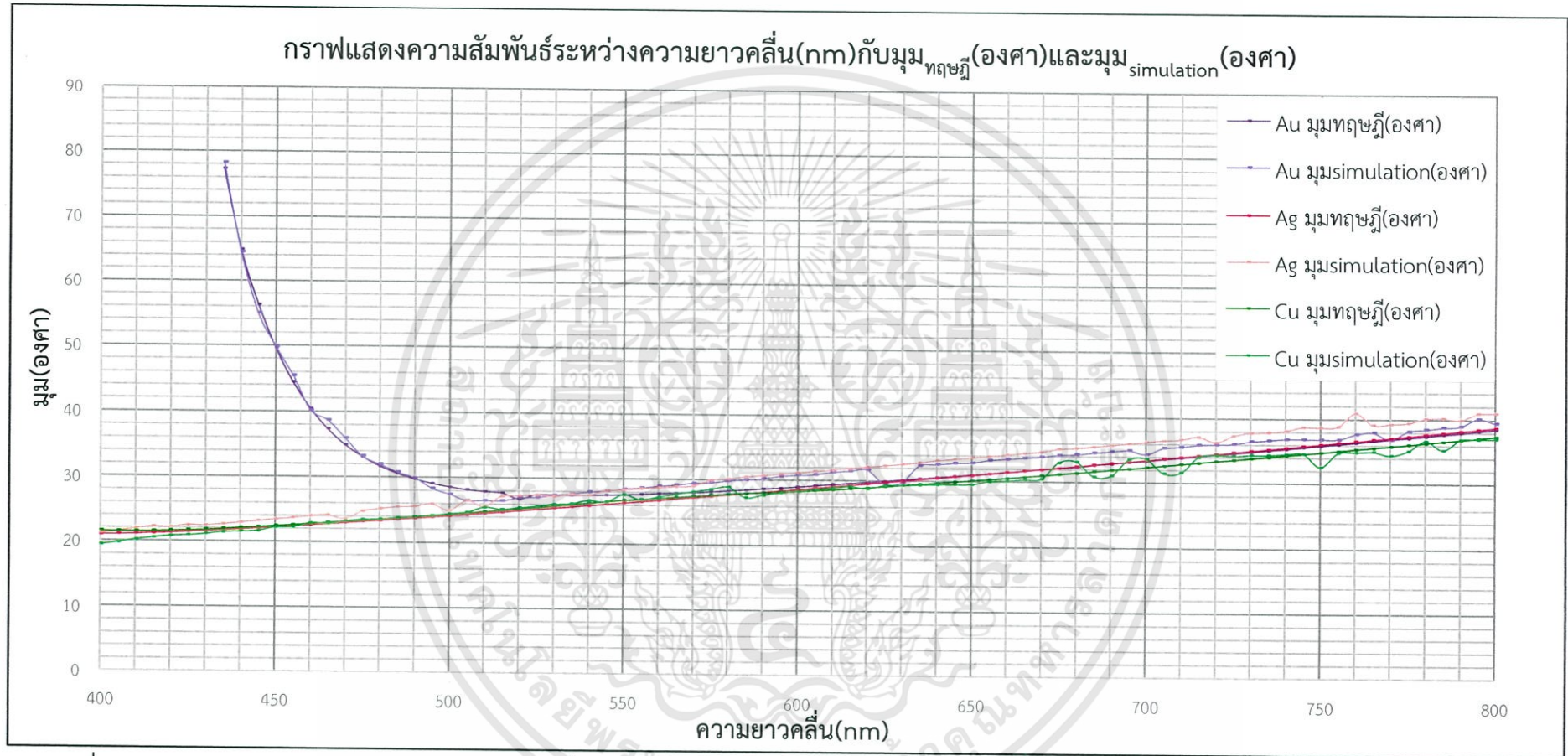
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.7 โลหะประเภท ทองแดง



รูปที่ 4.34 กราฟจากตารางบันทึกผลการ Simulate ที่ 4.15 ของโลหะประเภท ทองแดง

4.3.2.8 โลหะ 3 ชนิด



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm)กับค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด(v/m) ของโลหะ 3 ชนิดที่องค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 ในกรณีกำหนดค่าความยาวคลื่นแล้วเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบ

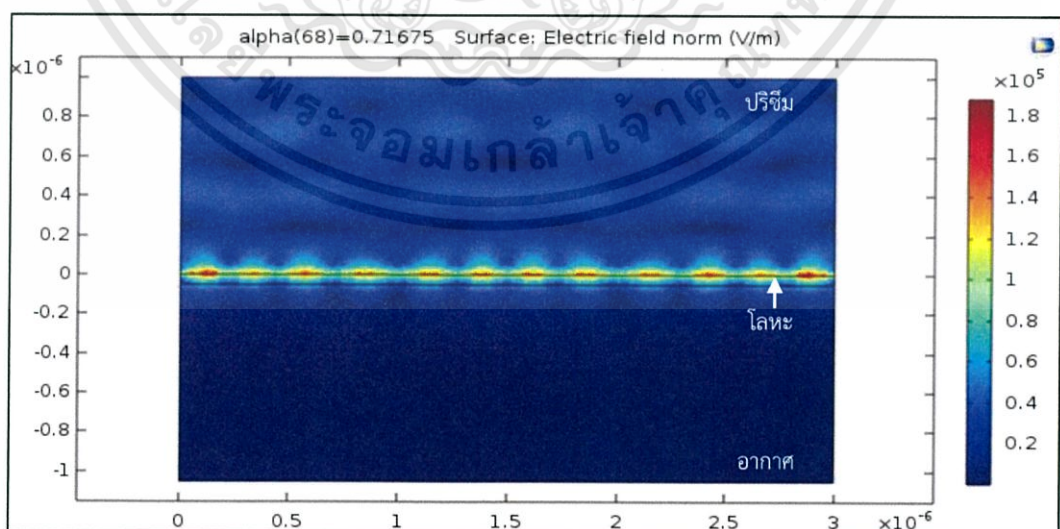
4.4 เปรียบเทียบผลจาก Simulation กับผลจากงานวิจัยที่อ้างอิง

เรานำโมเดลการจำลองของเรามาจำลองใหม่ เพื่อเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยที่เรานำมาอ้างอิง ซึ่งวิจัยที่เรานำมาอ้างอิง ก็คือ Spectral and angular responses of surface plasmon resonance based on the kretschmann prism configuration (Hyuk Rok Gwon and Seong Hyuk lee) ในงานวิจัยนี้ได้บอกว่า เขาได้มุมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ ของความยาวคลื่น 632.5 nm ที่มุม 42.6 องศา โดยใช้ความหนาของชั้นฟิล์มโลหะบางอยู่ที่ 52 nm

เราจำลองโดยใช้วิธีกำหนดค่าความยาวคลื่น (λ) ของแสงตกกระทบให้คงที่ แล้วปรับหาค่า มุมที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ ซึ่งกำหนดค่าตัวแปรทุกอย่างให้เหมือนกับงานวิจัยที่เรานำมาอ้างอิง ดังนี้

$$\begin{aligned} n_{\text{Au}} &= 0.19603 \\ n_{\text{p}} &= 1.5151 \\ n_{\text{air}} &= 1.0002756 \\ \epsilon_1 &= -10.544 \\ \epsilon_2 &= 1.2754 \\ \lambda &= 632.5 \text{ nm} \\ \text{จากความสัมพันธ์ } n &= \sqrt{\epsilon} \\ \epsilon_{\text{air}} &= 1.000553076 \end{aligned}$$

จากนั้นกำหนดให้ชั้นโลหะมีความหนาเหมือนในงานวิจัย คือ 52 nm เมื่อประมวลผลเสร็จ เราก็ทำการเลื่อนหามุมที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ โดยมุมตกกระทบเหมาะสมที่เราได้จากการ Simulate แสดงดังรูปที่ 4.39 อยู่ที่มุม 41.10 องศา เมื่อนำมุมจากการ Simulate มาเปรียบเทียบกับมุม 42.60 องศา ที่มาจากงานวิจัยที่นำมาอ้างอิง มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.52 %



รูปที่ 4.36 แสดงการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศของโลหะประเภท ทอง โดยกำหนดความหนาของโลหะเท่ากับ 52 nm ให้แสงตกกระทบที่มีความยาวคลื่น 632.5 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานโครงการพิเศษซึ่งได้ทำการ simulate เพื่อวิเคราะห์ผลการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ จากการสร้างแบบจำลองทำให้เราทราบค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศนั้น เมื่อเราทำการเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบและเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นแสงตกกระทบจนได้ค่าที่เหมาะสม จะสังเกตเห็นผลของการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อทั้งสอง โดยในการกำหนดค่าต่างๆนั้น เราจะกำหนดให้แสงตกกระทบปริซึมเป็นชนิด TM mode เนื่องจากนิยามของ TM mode กล่าวว่าสนามไฟฟ้าจะกวัดแกว่งในแนวตั้งฉากกับ surface ซึ่งรูปแบบโมเดลที่ออกแบบเพื่อทำการ simulate นั้นกำหนดให้พื้นผิววางอยู่ในองค์ประกอบสนามไฟฟ้า xz และสูงชันตามแกน y ดังนั้นองค์ประกอบสนามไฟฟ้า x,y,z ที่เป็นไปได้ในการ simulate แล้วทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ จึงกำหนดโดยให้สนามไฟฟ้าที่ตกกระทบปริซึมมีองค์ประกอบของสนามในแนวแกน x,y,z เป็น 1,0,1 และ 1,1,0 ตามลำดับ สำหรับในกรณีของแสงตกกระทบปริซึมเป็นชนิด TE mode จะมีสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวขนานกับพื้นผิวรอยต่อจึงพิจารณาว่าองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวแกน z จึงกำหนดองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบปริซึมมีองค์ประกอบของสนามในแนวแกน x,y,z เป็น 0,0,1 ซึ่งจะ simulate กับโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ ทอง, เงิน และทองแดง จากนั้นทำการเปรียบเทียบกัน

กรณีแรกคือกำหนดมุมตกกระทบปริซึมที่คำนวณได้จากทฤษฎี dispersion relation โดยกำหนดให้ โลหะทองมีมุมเท่ากับ 35.11 องศา, โลหะเงินมีมุมเท่ากับ 35.84 องศา และโลหะทองแดงมีมุมเท่ากับ 31.01 องศา จากนั้นนำมาทำการ simulate โดยกำหนดให้แสงตกกระทบปริซึมมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm และวิเคราะห์ผลการจำลองการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศและหาค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด พบว่าโลหะประเภททองมีค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมากกว่าโลหะประเภทอื่นๆ ถัดมาเป็นโลหะประเภทเงินและทองแดงตามลำดับ สำหรับแสงตกกระทบประเภท TM mode กำหนดองค์ประกอบสนามไฟฟ้า x,y,z เป็น 1,0,1 และ 1,1,0 เมื่อนำผลการ simulate ของทั้งสององค์ประกอบสนามไฟฟ้า มาเปรียบเทียบกันพบว่าองค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,1,0 เกิดคลื่นผิวพลาสมอนชัดเจนกว่าและให้ค่าสนามไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมากกว่าองค์ประกอบสนามไฟฟ้า 1,0,1

กรณีสองคือกำหนดค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 800 nm และทำการ simulate หาค่ามุมตกกระทบที่เหมาะสมของแต่ละความยาวคลื่นที่ทำให้เกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศได้ชัดเจนที่สุด พบว่ากรณีของแสงตกกระทบชนิด TM mode จะสามารถกระตุ้นเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อโลหะกับอากาศได้ ส่วนกรณีของแสงตกกระทบ ชนิด TE mode ไม่พบการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนที่บริเวณรอยต่อโลหะกับอากาศ และมุมตกกระทบที่ทำการ simulate ได้นั้นจะแปรผันตรงกับค่าความยาวคลื่น กล่าวคือเมื่อค่าความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นมุมตกกระทบก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

และเมื่อสร้างแบบจำลองเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่นำมาอ้างอิง ผลที่ได้ปรากฏว่าแบบจำลองในโครงการพิเศษนี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลของงานวิจัยอื่น

จากผลการ simulate ที่กล่าวมานั้น เทคนิคการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับงานด้านการตรวจวัดทางชีวภาพ เช่น การพัฒนาเซนเซอร์ของระบบภูมิคุ้มกัน, การพัฒนาทางยารักษาโรค, เซนเซอร์DNA และยังเป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาอันตรกิริยาของสารชีวโมเลกุล

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในผลการวิจัยศึกษาการเกิดคลื่นผิวพลาสมอนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับอากาศ ยังคงเป็นเพียงการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ซึ่งแนวคิดที่จะต่อยอดนำไปสร้างชุดทดลองและพัฒนาให้เป็นประโยชน์ทางการแพทย์ ดังต่อไปนี้

1. นำไปพัฒนาให้เป็นเซนเซอร์ตรวจจับเชื้อโรคในเซลล์ร่างกายของมนุษย์
2. นำไปพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของสารชีวโมเลกุล



เอกสารอ้างอิง

- [1] Reather H. Surface Plasmons on Smooth and Rough Surface and on Grating, Springer Tracts Modern Physics 111 (Springer, Berlin, Heidelberg 1988).
- [2] Kretchmann, E. Opt. Commun. 6, 185-187 (1972)
- [3] Otto A.Z. phys. 216,398-410 (1968)
- [4] Biacore Available :<http://www.biacore.com>
- [5] Rahn, J.R.; Hallock, R.B. Langmuir 11, 650-654 (1995).
- [6] Brynda, E.; Homola, J.; Houska, M.; Pfeifer, P.; Skvor, J. Sens. Actuators B 54, 132-136 (1999).
- [7] Nilsson, P.; Persson, B.; Uhlen, M.; Nygren, P.A. Anal. Biochem. 224, 400-408 (1995).
- [8] Bates, P.J.; Dosanjh, H.S.; Kumar, S.; Jenkins, T.C.; Laughton, C.A.; Neidle, S. Nuclie Acid Res. 23, 3627-3632 (1995).
- [9] Peterlinz, K.A.; Georagiadis, R.M.; Herne, T.M.; Talov, MJ. J. Am. Chem Soc. 119, 3401-3402 (1997).
- [10] Babic, I.; Andrew, S.E.; Jirik, F.R. Mutat. Res. 372, 87-96 (1996).
- [11] Bondeson, K.; Frostell-Karlsson, A.; Fagerstam, L.; Magnusson, G. Anal. Biochem. 214, 245-251 (1993).
- [12] Fisher, R.J.; Fovash, M.; Casas-Finet, J.; Bladen, S.; McNitt, K.L. Methods Companion Methods Enzymol. 6, 121-133 (1994).
- [13] Gotoh, M.; Hasebe, M.; Ohira, T.; Hasegawa, Y.; Shinohara, Y. Genet. Anal. Biomol. Eng. 14,47-50 (1997).
- [14] Jory, M.J.; Bradberry, G.W.; Chann, P.S.; Sambles, J.R. Sens. And Actuators B 36, 197-201 (1996)
- [15] Peterlinz, K. A.; Georagiadis, R.M.; Herne, T.M.; Tarlov, M.J.J. Am. 1997. Observation of Hybridization and Dehybridization of Thiol-Tethered DNA Using Two-Color Surface Plasmon Resonance Spectroscopy. 119,3401-3402 (1997).
- [16] Gotoh, M.; Hasebe, M.; Ohira, T.; Hasegawa, Y.; Sota, H.; Nakao, J.; Tosu, M. 1997. Rapid method for detection of point mutations using mismatch binding protein (MutS) and an optical biosensor. 14, 47-50 (1997).
- [17] สุตตะนนท์ โสวนิตย์. 2553. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ,มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [18] วิทยุญ ปิยจันทร์. 2560. การหักเห (Refraction).
[Online]. Available: http://www.sa.ac.th/winyoo/mechanicswave/wave_geometric/refract/refraction.htm
- [19] S.P. Yushmanov, L.T. Gritter, J.S. Crompton* and K.C. Koppenhoefer AltaSim Technologies, Columbus, OH. Surface Plasmons Resonance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] Hyuk Rok Gwon and Seong Hyuk Lee.2010. Spectral and Angular Responses of Surface Plasmon Resonance Based on the Krestchmann Prism Configuration. [Online].Available:http://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/51/6/51_M2010003/_article
- [21] COMSOL Multiphysics Available: <http://www.comsol.com>
- [22] RF Module-COMSOL Available: <http://www.comsol.com/rf-module>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spectral and Angular Responses of Surface Plasmon Resonance Based on the Kretschmann Prism Configuration

Hyuk Rok Gwon*¹ and Seong Hyuk Lee*²

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, 221 Heuksuk-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-756, Korea

The present study investigates the optical characteristics and the spectral and angular responses of a Kretschmann surface plasmon resonance (SPR) sensor configuration that is widely used in biological and chemical sensing applications. In order to examine the influence of wave interference and optical properties of thin films on angular variation of reflectance at different incident angles, the Kretschmann SPR configurations made of gold films with 30, 52, and 70 nm thicknesses were fabricated and the reflectance was detected using a 633 nm He-Ne laser, θ - 2θ rotation stages, and a silicon pin photo-detector. In particular, this study involved the numerical analysis of angular and spectral variation of reflectance estimated using the characteristic transmission matrix (CTM) method. It was found that the SPR sensitivity became highly dependent on the gold film thickness, indicating that in the thinner gold film case, the reflectance was recovered slowly after the SPR angle, whereas as the gold film thickness increased, the magnitude difference between the maximum and the minimum reflectance measured near the SPR angle was smaller than in other cases. From the numerical analysis, it was shown that the phase shift is the most sensitive physical parameter for SPR sensor by comparing estimated FWHM values of reflectance, phase shift, and enhancement of magnetic field intensity. Therefore, it was concluded that an appropriate metal thickness of around 50 nm was found for higher sensitivity.
[doi:10.2320/matertrans.M2010003]

(Received January 6, 2010; Accepted March 12, 2010; Published April 28, 2010)

Keywords: Kretschmann surface plasmon resonance (SPR) sensor, characteristic transmission matrix (CTM) method, full width at half maximum (FWHM), phase shift, enhancement of magnetic field intensity

1. Introduction

Surface plasmon resonance (SPR) has been an essential technique in chemical and bio-sensing for many years.¹⁾ Originally, the SPR sensor was developed to measure CO₂ and O₂ concentration and it was used to determine refractive indices of materials and to investigate the absorption and transmission characteristics of analyte, etc.²⁻⁶⁾ SPR sensing has many advantages such as high sensitivity, and can be possible *in situ* label free measurement. There are three methods for the excitation of surface plasmons (SPs): prism coupling, grating coupling, and waveguide coupling. SPs are collective oscillations of free electrons in metallic films such as gold, silver, and aluminum. In the late 1970s, SPs were first employed for the characterization of thin films and the study of processes at metal boundaries.⁷⁾ Most researchers utilized gold for the metal layer because of high chemical stability and high sensing resolution. Despite the highest resolution and sensitivity in sensing, silver cannot be used for SPR sensor because of the chemical instability of the surface.⁸⁾ Because the sensing sensitivity of an SPR sensor also depends on the metal thickness, many researchers studied on the influence of metal film thickness for SPR sensors^{9,10)} in order to find the optimum thickness for achieving highest sensitivity. Instead of measuring reflectance, attempts have been made to use phase shift in measuring SPR angle and SPR wavelength.¹¹⁻¹³⁾ Other possibilities to measure the magnitude of magnetic field on SPR sensors include magneto-resistive magnetometers, Hall devices, and magneto-optic imagers.¹⁴⁻¹⁷⁾

Thus, the present study investigates experimentally the optical characteristics of the Kretschmann configuration to

analyze the SPR sensitivity which substantially depends on film thickness, and it also conducts numerical simulation for practical six-layer SPR sensors with different gold thicknesses with the use of the characteristic transmission matrix (CTM) method. For Kretschmann geometry with a single gold film of 30, 52, and 70 nm thickness, scattering intensities were measured to determine the optimum film thickness. In particular, this article examined the influence of incident angle on a wavelength modulation SPR sensor, and compared the full-width at half-maximum (FWHM) values of the reflectance, the phase shift and the enhancement of magnetic field intensity while acquiring the most sensitive sensing value for the SPR sensor.

2. Theoretical Background

2.1 Surface plasmon resonance and Kretschmann configuration

The SPR phenomenon is the excitation by totally reflected TM (transverse magnetic) light at a metal-coated interface of Kretschmann configuration when the wave vector of the incident light in the plane of the surface (k_x) matches the wave vector of the surface plasmon wave (SPW) in metallic films (k_{sp}), as derived from Maxwell's equation. Figure 1 illustrates the Kretschmann SPR configuration used in our numerical simulation and experiment. The wave vectors of the incident light and the SPW in the metallic films are expressed as¹⁾

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} n_p \sin(\theta) \quad (1)$$

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (2)$$

where ϵ_d , ϵ_m , and n_p represent a complex dielectric constant of dielectrics, a complex dielectric constant of metal, and a

*¹Graduate Student, Chung-Ang University

*²Corresponding author, E-mail: shlee89@cau.ac.kr

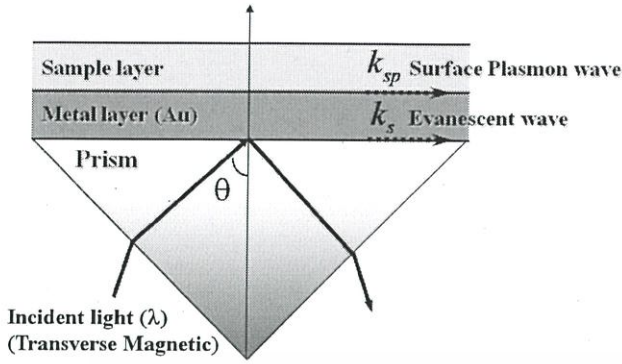


Fig. 1 A schematic of the Kretschmann SPR configuration.

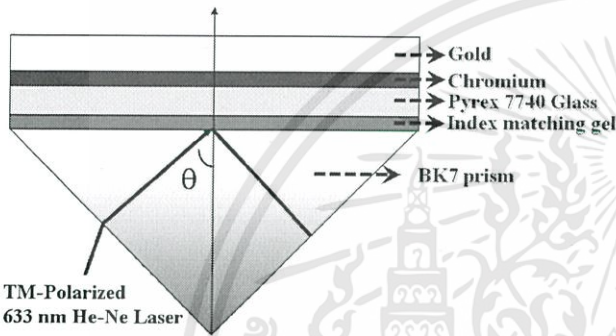


Fig. 2 A schematic of the practical Kretschmann SPR sensor configuration.

refractive index of the prism, respectively, and λ denotes the wavelength of incident light. The matching relationship, including the complex dielectric constant of metal ϵ_m and the resonant angle θ_{sp} , can be expressed as follows:

$$k_x = k_{sp}, \quad \theta_{sp} = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_p(\epsilon_m + \epsilon_d)}} \quad (3)$$

In resonant mode, the reflectance and the phase shift of incident light change significantly. These changes are closely associated with film thickness and the optical constant of the metal layer, such as the reflective index n and the extinction coefficient k of an SPR configuration, as shown in Fig. 1. Therefore, it is meaningful to study the influence of the type of metal and thickness on the accuracy and resolution analysis of an SPR sensor.

2.2 Characteristic transmission matrix (CTM) method

For the multilayers, as in the Kretschmann configuration, there are three ways to derive an expression for radiative properties such as reflectance and transmittance of thin films: the field tracing method, the resultant wave method, and the transfer matrix method. The field tracing method is intuitive but cumbersome, whereas the transfer matrix method can be easily extended to multilayers. Thus, we used the transfer matrix method to investigate the optical characteristics of multilayers with gold film thickness comparable to the wavelength of incident light, thereby resulting in wave interference. Figure 2 shows the six-layer Kretschmann SPR sensor configuration. As noted previously, the transfer matrix

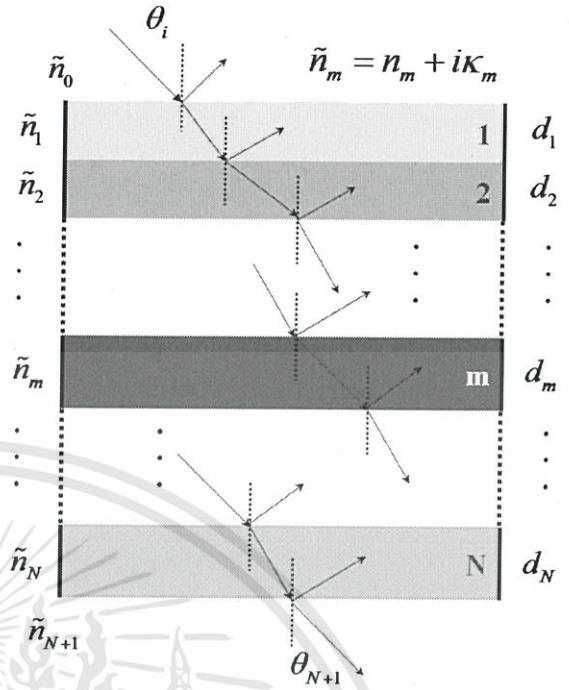


Fig. 3 A schematic of multi-layer thin film structure.

method was used in our simulation.¹⁷⁾ Figure 3 shows a schematic of a multi-layer structure where the m -th layer of thickness d_m has a complex refractive index, $\tilde{n}_m = n_m - ik_m$, and the interference matrix of the m -th layer can be expressed by

$$\mathbf{M}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_m & -\frac{i}{q_m} \sin \beta_m \\ -iq_m \sin \beta_m & \cos \beta_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{M} = \prod_{m=1}^N \mathbf{M}_m \quad (5)$$

where β_m and q_m are defined as $(2\pi/\lambda)\tilde{n}_m d_m \cos \theta_m$ and $\tilde{n}_m \cos \theta_m$, respectively. In addition, \tilde{n}_m means the complex refractive index of the m -th layer. The power of the matrix method can best be appreciated when dealing with multiple layers of thin films. We related the electric and magnetic fields inside the m -th layer at both interfaces to the interference matrix \mathbf{M}_m for that layer. Since the transverse components of the electric and magnetic fields are continuous at each interface that is free of net charge and current, the total interference matrix of the whole multilayer structure was obtained using eq. (5). From the preceding matrix, we obtained the reflection and transmittance coefficients r and t through the films as follows:

$$r = \frac{[\mathbf{M}(1, 1) + \mathbf{M}(1, 2)\tilde{n}_m]\tilde{n}_a - [\mathbf{M}(2, 1) + \mathbf{M}(2, 2)\tilde{n}_m]}{[\mathbf{M}(1, 1) + \mathbf{M}(1, 2)\tilde{n}_m]\tilde{n}_a + [\mathbf{M}(2, 1) + \mathbf{M}(2, 2)\tilde{n}_m]} \quad (6)$$

$$t = \frac{2\tilde{n}_a}{[\mathbf{M}(1, 1) + \mathbf{M}(1, 2)\tilde{n}_m]\tilde{n}_a + [\mathbf{M}(2, 1) + \mathbf{M}(2, 2)\tilde{n}_m]} \quad (7)$$

where \tilde{n}_a indicates the complex refractive index of air (incident layer). Then, the total reflectance R , transmittance T , phase Φ , and the enhancement of magnetic field intensity can be obtained as:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

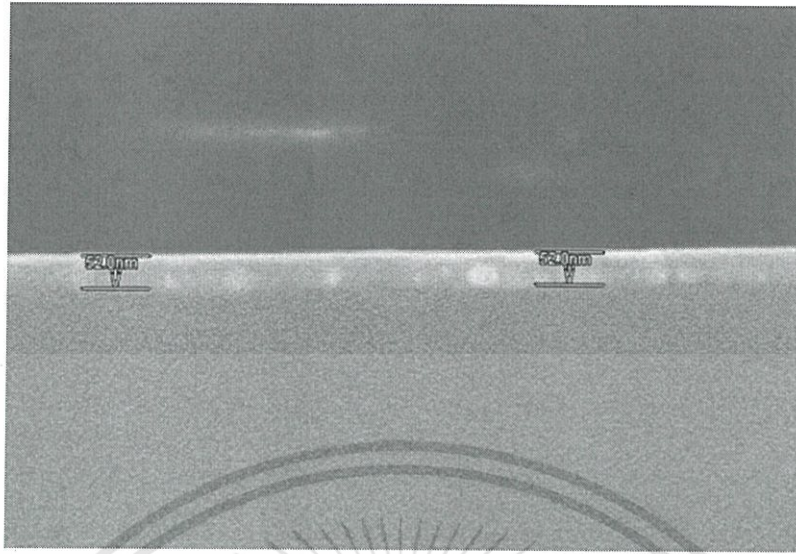


Fig. 4 Cross sectional SEM image of SPR sensor chip (52 nm gold on glass).

Table 1 Optical properties of materials at 633 nm wavelength of light.^{18,19)}

Material	Refractive index (<i>n</i>)	Extinction coefficient (<i>k</i>)	Thickness
BK 7 Prism	1.517	0	25 mm
Index Matching Gel	1.456	0	1 mm
Pyrex 7740 Glass	1.474	0	0.5 mm
Chromium	3.719	4.362	5 nm
Gold	0.130	3.162	30 nm–70 nm
Air	1.0	0	∞

$$R = |r|^2 \tag{8}$$

$$T = \frac{n_m}{n_a} |t|^2 \tag{9}$$

$$\Phi = \arg |r| \tag{10}$$

$$\left| \frac{H_y(n/n - 1)}{H_y(1/2)} \right| = |t_{12 \dots m}|^2 \tag{11}$$

The optical properties of a BK-7 glass prism, chromium film, index matching gel, gold film, and air are listed in Table 1.^{18,19)} We applied the 633 nm wavelength incident light to an angular modulation SPR. The thickness of the prism was fixed at 25 mm. The optical properties of materials used in the present simulation are listed in Table 1 and the present study calculated the optical properties of several materials in the wavelength range from 200 nm to 1,500 nm by using the Akima spline interpolation method.²⁰⁾

3. Experimental Configuration and Measurement Technique

For manufacturing conventional Kretschmann multilayer structures, 5-nm-chromium film was first sputtered on the surface of Pyrex 7740 glass to resolve the adhesion problem of gold film to the glass substrate and then gold films with different thicknesses were metalized in a sputtering system (MHS-1500A). Figure 4 shows an SEM image of a SPR

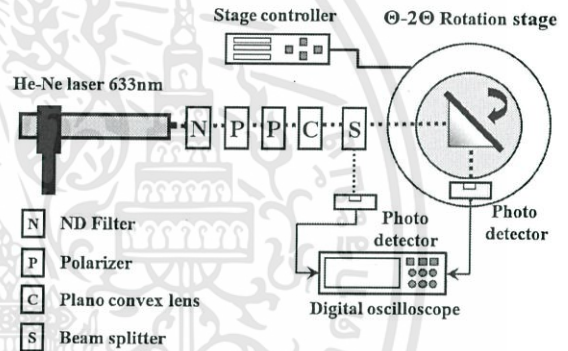


Fig. 5 An experimental setup of Kretschmann angular modulation SPR sensing system.

chip with gold sputtered on glass to a thickness of 52 nm. Finally, BK 7 prism and metal-coated Pyrex 7740 glass were connected using index matching gel.

Figure 5 illustrates the experimental apparatus for a SPR sensor. Incident light of 633 nm from 15 mW He-Ne lasers (Melles Griot) was TM polarized while passing the p-polarizer, and then excited the surface plasmons by approaching the gold film surface of the SPR sensor. To vary the incidence angle, we used a θ -2 θ motorized rotation stage (Sigma Koki) and a two-axis stepping motor drive controller with 0.25° at each step. In addition, we used several filters and lenses to achieve greater sensitivity. A neutral density (ND) filter was used to reduce the power of the incident light because very high intensity light cannot be detected by the photo detector. A plano-convex lens was used to collimate light to a spot on the SPR surface. The intensity of reflected light after the SPR sensor was measured with a silicon pin photodetector (Electro-Optics Technology) Using a beam splitter, we measured the reflectance of incident light. For comparison with numerical results, SPR signals were acquired for three SPR sensor chips with different gold film thicknesses of 30, 52, and 70 nm.

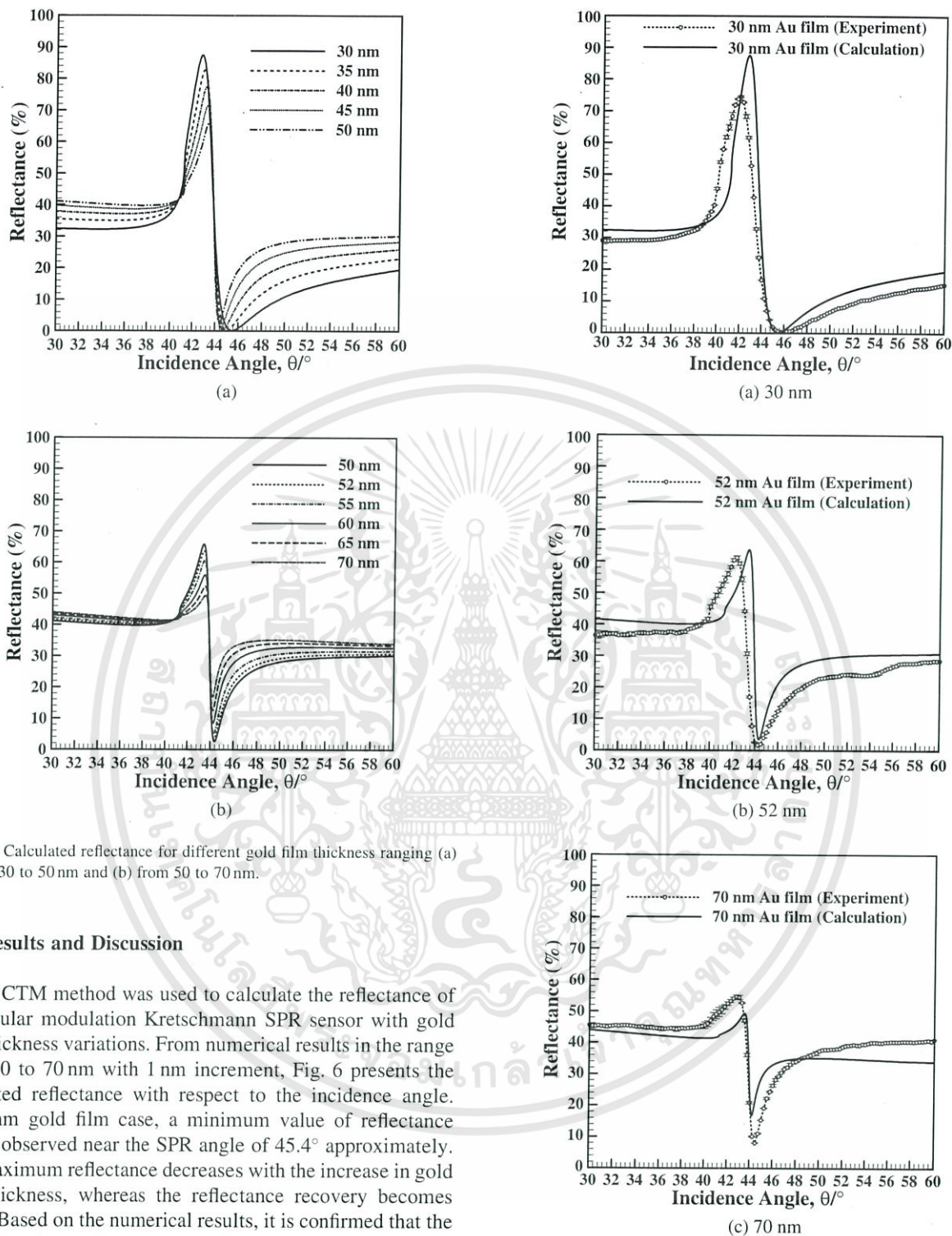


Fig. 6 Calculated reflectance for different gold film thickness ranging (a) from 30 to 50 nm and (b) from 50 to 70 nm.

4. Results and Discussion

The CTM method was used to calculate the reflectance of an angular modulation Kretschmann SPR sensor with gold film thickness variations. From numerical results in the range from 30 to 70 nm with 1 nm increment, Fig. 6 presents the estimated reflectance with respect to the incidence angle. In 30 nm gold film case, a minimum value of reflectance can be observed near the SPR angle of 45.4° approximately. The maximum reflectance decreases with the increase in gold film thickness, whereas the reflectance recovery becomes faster. Based on the numerical results, it is confirmed that the gold film thickness is a critical parameter for achieving high sensitivity of the SPR sensor, and the angular sharpness of reflectance should be considered to find the appropriate gold film thickness because a sharper curve indicates that the sensitivity is increasing.

With the practical Kretschmann SPR configuration shown in Fig. 5, we conducted the experiments for three SPR sensor cases with gold film thicknesses of 30, 52, and 70 nm. In each case, the experiment was repeated three times. Figure 7 gives the experimental results for reflectance and a comparison of the numerical results for each case. Consequently, we

Fig. 7 Comparison of measurement and prediction for reflectance at different gold film thickness.

obtained good agreement between numerical and experimental data, and concluded that the gold film thickness of around 50 nm would be advisable for SPR sensor. In our experiments, we used a 52-nm-gild film thickness for measurement and simulation.

As mentioned previously, a SPW is excited by the incident light, and the interaction of a light wave with a SPW can alter

Table 2 FWHM of reflectance, phase shift and enhancement of magnetic field intensity of angular modulation single gold Film SPR structure.

Configuration (metal)	Value of full width half maximum		
	Reflectance	Enhancement of magnetic field intensity	Phase shift
Gold film	1.05	0.82	0.58

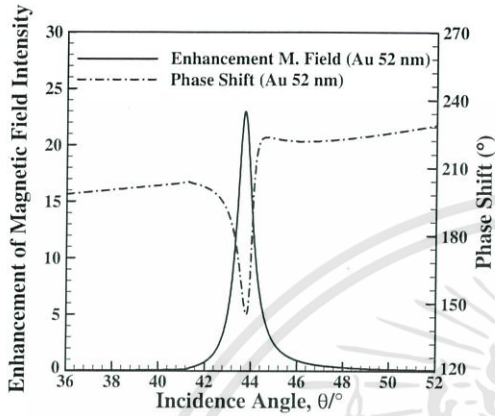


Fig. 8 Enhancement of magnetic field intensity and phase shift at different incidence angles for 52 nm Au film structure.

optical characteristics such as reflectance, phase shift, and electromagnetic (EM) field. In SPR mode, the reflectance of incident light decreased. The phase of incident light is defined the argument of real part of reflectance. Accordingly, the changing of reflectance directly affects the phase of incident light. Moreover, the evanescent wave propagates parallel to a metal surface in resonant mode. The EM field changes significantly due to the interaction between light and a SPW.

We compared the sensitivity of reflectance, phase shift, and enhancement of magnetic field intensity by evaluating the FWHM values of practical Kretschmann SPR configuration. The FWHM is an expression of the extent of a function, given by the difference by the difference between two extreme values of independent variables at which the dependent variable is equal to half of its maximum value, and it has been commonly used to describe the width and the sharpness of functions or acquired data. In the SPR sensor, higher sensitivity can be attained with sharper shapes, suggesting faster recovery. The FWHM of reflectance in the SPR curves is 1.05, and the other values are summarized in Table 2. As a result, the FWHM of reflectance is greater than that of the enhancement of magnetic field intensity and phase shift. The small FWHM value means high sensitivity of the SPR sensor. In Fig. 8, the enhancement of magnetic field intensity and the phase shift of the angular modulation SPR sensor were presented and a drastic change of phase shift near a SPR angle was observed. Thus, it was thought that one might characterize the SPR sensor sensitivity through the measurement of a phase shift.

The effect of gold metal film thickness on wavelength modulation SPR was examined. Figure 9 shows the reflectance of a wavelength modulation Kretschmann SPR sensor with gold film thickness variation at an incidence angle of

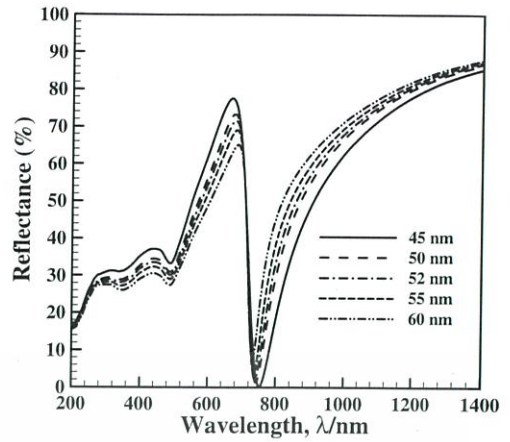


Fig. 9 Calculated spectral effects of gold film thickness on reflectance for the case of 43° incidence angle.

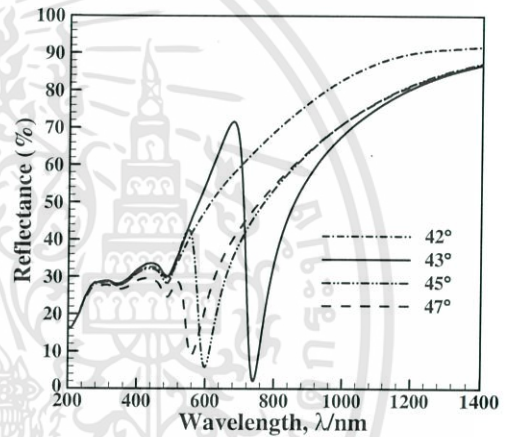


Fig. 10 Calculated spectral effects of incidence angle on reflectance for the case of 52 nm film thickness.

43°. The SPR wavelength decreased slightly when the metal film thickness increased. It was concluded that the SPR wavelength was independent of the metal film thickness.

In the wavelength modulation SPR method, many researchers generally set the incidence angle to an arbitrary value because SPR occurs when the incidence angle is just above the critical angle θ_c to achieve total internal reflection (TIR). For more sensitive SPR sensing, it is important to examine the effect of incidence angle on wavelength-dependent SPR signals. Therefore, the incidence angle was varied from 40° ($\theta_c \approx 42^\circ$) to 90° by 0.1° increments for the practical Kretschmann SPR sensor configuration shown in Fig. 2. Figure 10 shows the reflectance of the SPR sensor for incidence angles of 42°, 43°, 45°, and 47°. For the 43° incidence angle case, the reflectance was sharper than in other cases. We can suggest the best incidence angle for maximum SPR sensing sensitivity with the minimum reflectance for each case. Figure 11 represents the minimum reflectance of each incidence angle to the wavelength modulation SPR sensor. We determined that 42.6° is the best incidence angle for a sensitive practical Kretschmann wavelength modulation SPR sensor.

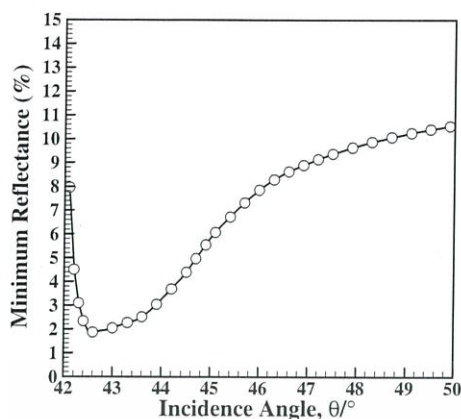


Fig. 11 Calculated minimum reflectance of wavelength modulation SPR sensor in several incidence angles (42°–50° with 0.1° increment for 52 nm film thickness).

5. Conclusions

We investigated the angular and spectral responses of SPR sensing characteristics using numerical and experimental approaches. For the six-layer practical Kretschmann SPR sensors with different gold film thicknesses (from 30 to 70 nm), numerical simulation was first conducted by using the CTM model, and the angular response of reflectance was measured. The predicted and measured data were in good agreement, and considering the sharpness and the recovery rate of reflectance near a SPR angle, a thickness of around 50 nm gave relatively high sensitivity for the angular practical Kretschmann SPR sensor. By comparing the predicted FWHM values of reflectance, phase shift, and enhancement of magnetic field intensity, we also found that the phase shift was the most sensitive physical parameter for the SPR sensor, indicating that one can characterize the SPR sensor sensitivity through the measurement of a phase shift. Moreover, we simulated the wavelength modulation for SPR sensors and determined that 42.6° is the best incidence angle for the most sensitive practical Kretschmann wavelength

modulation SPR sensor. However, the resonance wavelength differed significantly for each incidence angle, and we need more considerations to suitable incidence angle for SPR sensor working wavelength of SPR sensor.

Acknowledgement

This research was supported by research grants from Chung-Ang University in 2008.

REFERENCES

- 1) J. Homola, S. S. Yee and G. Gauglitz: *Sensor. Actuator. B* **54** (1999) 3–15.
- 2) O. S. Wolfbeis: *Anal. Chem.* **80** (2008) 4269–4283.
- 3) A. Brecht and G. Gauglitz: *Biosens. Bioelectron.* **10** (1995) 923–936.
- 4) G. Gauglitz: *Sensor. Update* **1** (2001) 1–48.
- 5) G. Boisdé and A. Harmer: *Chemical and Biochemical Sensing with Optical Fibers and Waveguides*, (Artech House Publishers, 1996).
- 6) B. Liedberg, C. Nylander and I. Lunström: *Sensor. Actuator. B* **4** (1983) 299–304.
- 7) I. Pockrand, J. D. Swallen, J. G. Gordon and M. R. Philpott: *Surf. Sci.* **74** (1978) 237–244.
- 8) J. Homola: *Anal. Bioanal. Chem.* **377** (2003) 528–539.
- 9) J. Homola, J. Čtyroký, M. Skalský, J. Hradilová and P. Kolářová: *Sensor. Actuator. B* **39** (1997) 286–290.
- 10) J. Homola: *Surface Plasmon Resonance Biosensor*, (Springer, 2006).
- 11) H. P. Ho, W. Yuan, C. L. Wong, S. Y. Wu, Y. K. Suen, S. K. Kong and C. Lin: *Opt. Commun.* **275** (2007) 491–496.
- 12) J. Y. Lee, H. C. Shih, C. T. Hong and T. K. Chou: *Opt. Commun.* **276** (2007) 283–287.
- 13) K. H. Chen, S. L. Yang and K. C. Chang: *Opt. Laser. Eng.* **45** (2007) 1071–1077.
- 14) M. Göktepe: *Sensor. Actuator. B* **91** (2001) 70–72.
- 15) G. Y. Tian, A. Sophian, D. Taylor and J. Rudlin: *IEEE Sens. J.* **5** (2005) 90–96.
- 16) P. Y. Joubert and J. Pinassaud: *Sens. Actuator. B* **129** (2009) 126–130.
- 17) Z. Cui, X. Wang, Y. Li and G. Y. Tian: *Sensor. Actuator. A* **138** (2007) 145–150.
- 18) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, (Cambridge University Press, 1999).
- 19) J. Marvin and J. Weber: *Handbook of Optical Materials*, (CRC Press, 2003).
- 20) H. Akima: *J. Assoc. Comput. Mach.* **17** (1970) 589–602.