

การคำนวณและจำลองโหมดแสงพลาสมอนิก TM_0 เพื่อประยุกต์ที่หน้าแสง เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

Computation and Simulation of TM_0 Surface Plasmonic Mode for Sensor Waveguide Application

ภัทรพงศ์ รักน้อย^{1*}
Pattrapong Racknoi^{1*}

Received 16 July 2021, Accepted 28 December 2021

ABSTRACT

The TM_0 mode power transfer in surface plasmonic slot waveguide computed and simulated in this research for sensor waveguide applications while the gap slot refractive index of two Au thin films was changed from 1.34 to 1.49 in gap slot width of 100 nm, 200 nm 400 nm of waveguide and 1000 nm, 1050 nm, 1150 nm 1300 nm and 1500 nm input wavelength. The result of computation showed that the TM_0 mode power transfer changed when refractive index and input wavelength changed, this showed some significance of ability in sensor application. The 4 μm long and 70 nm gap width of slot waveguide was set as single and two and four slots line simulation model, FDTD method in optiwave software was used for this simulation, refractive index of gap slot changed in simulation. The result of simulation showed that TM_0 mode was depended on gap refractive index also, slope and lose peak of TM_0 mode intensity in graph of simulation result of single slot two slot and 4 slot waveguide showed most significance as sensor application was in 4 slots line. Also in refractive index of cladding change, some external solution layers were added on the top of two Au metal slot thin films of single slot waveguide, this model was simulated in many times with 1 and 1.33 and 1.4 refractive index of the solution layers and input wavelength varied from 1000 nm to 1350 nm, TM_0 mode intensity data corrections in each time were plotted in graphs. The result showed that there were more lose peak wavelength ship in each refractive index of thin solution layers. This showed good significance in sensor applications.

Keywords: Surface plasmon polariton:SPP, SPP slot waveguide, SPP sensors

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโปรแกรมแมทแล็บ เพื่อคำนวณกำลังแสงส่งผ่านในท่อนำแสงเชิงผิวแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มโลหะคู่ โดยการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงยังผลของช่องว่างแผ่นฟิล์มทอง เพื่อตรวจสอบรูปแบบที่เป็นไปได้ในการประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด คำนวณโดยเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่ 1.34 ถึง 1.49 และเปลี่ยนความกว้างช่องว่างระหว่าง 100 nm ถึง 400 nm และใช้ความยาวคลื่นระหว่าง

^{1*} ภาควิชาฟิสิกส์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
Department of Physics, Faculty of Liberal Arts and Science at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen
Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* Corresponding author: E-mail address: faasptr@ku.ac.th

850 ถึง 1500 nm พบว่ากำลังแสงส่งผ่านตามความยาวของช่องว่างที่ตั้งฉากกับแผ่นฟิล์มทองที่เรียกว่า โหมดแสงเชิงผิว TMO เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัดชั้นหักเหแสงและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงค่าไป และแสดงความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งอาจประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้ และได้ออกแบบท่อนำแสงความยาว $4\mu\text{m}$ ความกว้างช่องว่างแผ่นฟิล์มทอง 70 nm แบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยว แบบสองช่องว่างแผ่นฟิล์มทอง และสี่ช่องว่างแผ่นฟิล์มทอง เรียงต่อกัน เพื่อจำลองผลเชิงเลขโดยใช้ระเบียบวิธี FDTD ในโปรแกรมออปติเวฟ ซึ่งเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงของช่องว่างแผ่นฟิล์มทองจาก 1.33 ถึง 1.49 ความยาวคลื่น 950 nm 1050 nm 1150 nm และ 1300 nm และเก็บผลการจำลองสะสมได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง TM_0 กับความยาวคลื่นที่แปรเปลี่ยนไปตามค่าดัชนีหักเหแสงและความยาวคลื่น ที่มีความชันเส้นกราฟ และมีจุดโค้งต่ำสุดกราฟเป็นแบบพืดของแต่ละค่าดัชนีหักเหแสง และแต่ละพืดเลื่อนหล่อมกันตามแกนความยาวคลื่นแสงที่ป้อนเข้าไป โดยที่การเลื่อนหล่อมเกิดขึ้นชัดเจนสุดที่ท่อนำแสงแบบสี่ช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเรียงต่อกัน และเมื่อจำลองผลเชิงตัวเลขโดยการเพิ่มชั้นสารละลายบางบนแผ่นฟิล์มบางของทองทั้งสองของท่อนำแสงแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยว และรันโปรแกรมหลายครั้ง ซึ่งใช้ดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1, 1.3 และ 1.4 แต่ละค่าเปลี่ยนความยาวคลื่นตั้งแต่ 1000 nm ถึง 1350 nm เก็บสะสมผลความเข้มโหมดแสง TM_0 ทุกครั้งและรวบรวมทำกราฟ พบว่าความเข้มโหมดแสง TM_0 เปลี่ยนแปลงเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นสารบนแผ่นฟิล์มทองเปลี่ยนแปลง และเกิดการเลื่อนหล่อมกันของพืดความเข้มโหมดแสง TM_0 ต่ำสุดที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ของแต่ละค่าดัชนีหักเหแสงและเกิดขึ้นหลายตำแหน่งในช่วงความยาวคลื่นที่ป้อนเข้าแสดงถึงนัยสำคัญที่ดีเยี่ยมในการประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงภายนอกท่อนำแสง

คำสำคัญ: แสงพลาสมอนิก ท่อนำแสงพลาสมอนิกแบบสลิต อุปกรณ์ตรวจวัดแบบแสงพลาสมอนิก

คำนำ

แสงพลาสมอนิกที่ผิวโลหะบาง (Surface Plasmon Polariton: SPP) และอนุภาคโลหะนาโนมีความสำคัญมากขึ้นในปัจจุบัน มีการวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์กันในหลายสาขา และเกิดเทคโนโลยีในสาขาต่างๆ ทั้งนี้เพราะฟิล์มบางนาโน และอนุภาคนาโน สามารถทำให้เกิดแสงเชิงผิวในรูปแบบพลาสมอนิกได้ เพราะโครงสร้างบางหรืออนุภาคขนาดเล็กการกระจายประจุที่ผิวจะสามารถตอบสนองต่อคลื่นแสงในรูปแบบสั่นพ้อง (surface plasmonic resonance) ได้ดี การนำแผ่นฟิล์มโลหะบาง หรือ อนุภาคนาโนมาปลูกหรือเจือลงบนชั้นฐานจะทำให้ได้อุปกรณ์หรือวัสดุทางแสงเชิงผิวที่หลากหลาย เช่น วัสดุเสมือน (meta materials) (Li & Sun, 2012) และมีประโยชน์ในหลายสาขา เช่น ฟิสิกส์ (Andryieuski *et al.*, 2014) เคมี (Tan 2018) วิศวกรรม (Dellagiacomma & etal 2011) วัสดุศาสตร์ (Roney *et al.*, 2012) ชีววิทยา (LATIFI *et al.*, 2012), (Wang & Chen, 2004) รวมถึงการแพทย์ด้วย

(Nemova & Kashyap, 2007) ในทางฟิสิกส์และวิศวกรรมได้มีการศึกษาท่อนำแสงที่เรียกว่าท่อนำแสงพลาสมอนิก ซึ่งประกอบด้วยท่อซิลิกอนเป็นแกนใน (core) รัศมีไมโครเมตรและมีชั้นฟิล์มโลหะบางเป็นเคลดดิ้ง (cladding) ที่นำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ต่างๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงมานานแล้ว (Fu, Yulan *et al.*, 2012), (Wang *et al.*, 2016), (Chen & Ming, 2012) และมีพัฒนาการก้าวหน้าตามเทคโนโลยีของอนุภาคนาโน ทำให้ท่อนำแสงแบบนี้มีความหลากหลายตามไปด้วย โดยเฉพาะทางด้านสารสื่อสารและอิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงนั้นมีการศึกษาท่อนำแสงชนิดใหม่ๆ มุ่งเน้นไปสู่ระดับนาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nanooptoelectronics) จุดประสงค์สำคัญในการศึกษาท่อนำแสงขนาดเล็กระดับนาโนนั้นเพื่อหาอุปกรณ์ทดแทนหรือลดอุปกรณ์จากไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อน รวมถึงลดพื้นที่ เพิ่มความเร็ว ท่อนำแสงแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยว (plasmonics slot waveguide) เป็นหนึ่งในท่อนำแสงขนาดเล็กจึงเป็นจุดสนใจศึกษาในปัจจุบัน มีผู้นำมาวิจัยในรูปแบบของนาโน

อิลีคทรอนิกส์ (Delacour *et al.*, 2000) รวมถึงอุปกรณ์ตรวจวัดด้วย (Osowiecki *et al.*, 2014) การทำอุปกรณ์ตรวจวัดในรูปแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยวเป็นเรื่องที่ยุ่งยากเพราะนอกจากจะมีต้นทุนสูงแล้ว ยังพบปัญหาเรื่องความไม่มีรูปแบบตายตัวและสูตรสำเร็จในการคาดหมายผลตอบสนอง ทั้งนี้เพราะขนาดและรูปร่างรวมถึงสมบัติของชั้นฟิล์มโลหะและแกนในที่ส่งผลต่อแพร่ของแสง ซึ่งมักต้องใช้การคำนวณและจำลองและเชิงเลขควบคู่กับทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน มีหลายงานวิจัยที่มุ่งเน้นการหาวัสดุใหม่มาทำแผ่นฟิล์มโลหะคู่ เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด (Han *et al.*, 2010), (Zhihong *et al.*, 2013), (Cheng-Han, 2014) งานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณและจำลองผลเชิงตัวเลขเพื่อหาผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยคำนวณกำลังส่งผ่านในท่อนำแสงแบบช่องเดี่ยวเมื่อถูกเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงตรงช่องว่างแผ่นฟิล์มทอง จำลองให้เหมือนกับว่าสิ่งแวดล้อมทำให้ดัชนีหักเหแสงส่วนนี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลให้โหมดแสงพลาสมอนิก TM_0 เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจึงใช้การจำลองผลเชิงเลขเปรียบเทียบกัน การคำนวณและการจำลองผลมีการทำซ้ำหลายๆ ครั้งโดยแต่ละครั้งเปลี่ยนตัวแปรและควบคุมตัวแปรไปที่ละค่า เหมือนกับการทดลองในเครื่องคอมพิวเตอร์ โปรแกรมในการคำนวณเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นจากโปรแกรมแมทแล็บ ส่วนการจำลองผลเชิงเลขใช้เทคนิควิธี FDTD (finite difference time domain method) ในโปรแกรม optiwave ผลการคำนวณและสร้างกราฟพบมีความสัมพันธ์ระหว่างโหมดแสง TM_0 กับค่าดัชนีหักเหแสงและความยาวคลื่นที่แปรเปลี่ยนไปคล้ายกับการรบกวนท่อนำแสงโดยสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งอาจทำได้เกิดขึ้นหลายวิธี เช่น เปลี่ยนความเข้มข้น เปลี่ยนอุณหภูมิ เป็นต้น เนื่องจากท่อนำแสงแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยวนี้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ดังนั้นการศึกษานี้อาจเป็นประโยชน์มากต่อการประยุกต์

เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดในที่จำกัด เช่น ในอวัยวะ อุปกรณ์เครื่องมือขนาดจิ๋ว หรือการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์อื่น

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ท่อนำแสงแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มโลหะประกอบด้วยฟิล์มโลหะบางๆ สองแผ่นปลูกลงบนแผ่นชั้นฐานที่เป็นไดอิเล็กตริก เช่นซิลิกอนเป็นต้น ตรงกลางเป็นช่องว่างหรือสารพวกไดอิเล็กตริก ขึ้นกับการออกแบบ โดยปกติโหมดแสง TE ที่เคลื่อนที่ในท่อนำแสงจะต้องมีส่วนที่เป็นแกนของความยาวคลื่น แต่การออกแบบท่อนำแสงแบบพลาสมอนิกสล็อตจะออกแบบให้ช่องสล็อตแคบมากๆ ดังนั้นสนามไฟฟ้าตามแนวช่อง TE โหมดจะไม่สามารถเคลื่อนผ่านโลหะไปได้ เพราะสนามไฟฟ้าในแนว y ถูกกั้นโดยแผ่นฟิล์มโลหะคู่ แต่ท่อนำแสงถูกออกแบบให้โลหะเป็นแผ่นฟิล์มบางมากในระดับนาโนเมตร สนามไฟฟ้าในแนวผิวราบของแผ่นโลหะ E_x จะสั้นพ้องกับอิเล็กตรอนและเกิดคลื่นสั้นพ้องในแนวนานกับผิวโลหะ สนามไฟฟ้าในแนวนี้ จะเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก H_y ซึ่งสั้นพ้องไปตามสารไดอิเล็กตริกในช่องของแผ่นฟิล์มโลหะบาง ส่วนในโลหะสนามส่วนนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วแบบเอกโปรเนนเชียล ดังสมการ

$$H_y(x) = \begin{cases} H_0 \cosh(\gamma x + \varphi), & |x| \leq a \\ H_0 \cosh(\gamma a + \varphi) e^{-\alpha_c(x-a)}, & x \geq a \\ -H_0 \cosh(\gamma a - \varphi) e^{\alpha_s(x+a)}, & x \leq -a \end{cases}$$

เมื่อ x เป็นระยะตามแนวแกนราบของแผ่นฟิล์มโลหะบาง, y เป็นแกนตั้งฉากกับระนาบแผ่นฟิล์มบาง ส่วน z เป็นระยะแนวทาวความยาวท่อนำแสง และ a เท่ากับครึ่งหนึ่งของความกว้างช่องช่องว่างของแผ่นฟิล์ม γ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนในท่อนำแสงที่เป็นช่องว่าง α_c, α_s เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนในแผ่นฟิล์มบางทั้งสอง

$\gamma^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_f$ และ $\alpha_c^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_c$ และ $\alpha_s^2 = \beta^2 - k_0^2 \epsilon_s$ และ φ เป็นมุมตกกระทบในท่อนำแสง ซึ่งต้องประมาณค่าจากเงื่อนไขขอบเขต และต้องมีโปรแกรมการหาค่าต่างๆ ที่ใช้สำหรับคำนวณค่า β และการคำนวณกำลังโหมดแสง TM_0 จาก

$$P_f = Re \left(\frac{\beta}{k_0 \epsilon_f} \right) \left[\frac{\sinh(2\gamma_R) \cosh(2\varphi_R)}{2\gamma_R} + \frac{\sin(2\gamma_I a) \cos(2\varphi_I)}{2\gamma_I} \right] \text{ และ } P_c = Re \left(\frac{\beta}{k_0 \epsilon_c} \right) \frac{|\cosh(\gamma a + \varphi)|^2}{2\alpha_{cR}}$$

$$\text{และ } P_s = Re \left(\frac{\beta}{k_0 \epsilon_s} \right) \frac{|\cosh(\gamma a - \varphi)|^2}{2\alpha_{sR}};$$

γ_R เป็นจำนวนจริงของ γ และ \mathcal{N} เป็นส่วนจินตภาพของ γ และ α_{cR} เป็นจำนวนจริงของ α_c กำลังแสงส่งผ่านตามสมการข้างต้นเป็นกำลังแสงที่ไม่พิจารณา $P_0 = \frac{1}{2} \eta_0 |H_0|^2$ ค่ากำลังแสงส่งผ่านในท่อนำแสงจึงไม่กำหนดหน่วยใดๆ การคำนวณหาค่าต่างๆ ตามสมการที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้สามารถเขียนโปรแกรมเรียกใช้ฟังก์ชันที่มีอยู่ในโปรแกรม matlab ส่วนการคำนวณระยะทางสูงสุดที่โหมดแสง TM_0 สามารถสั้นพ้องอยู่ได้ในท่อนำแสงจะใช้สมการ $L_z = \frac{1}{\text{Im}(\beta)}$ ค่า L_z นี้สัมพันธ์กับตัวแปร β ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่าต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบท่อนำแสงเช่น ค่ายอมทางไฟฟ้าของช่องว่างแผ่นฟิล์มโลหะบางและขนาดของท่อนำแสง ดังนั้นการตรวจสอบค่า L_z จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบท่อนำแสงพลาสมอนิก

อุปกรณ์และวิธีการ

ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณการเกิดการแพร่กระจายแสงในวัสดุโลหะบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Lorentz-Drude dispersion materials ซึ่งใช้ประมาณค่า relative permittivity ของฟิล์มโลหะบางของทอง ดังสมการ $\epsilon_r(\omega) = \epsilon_{r,\infty} + \sum_{m=1}^M \frac{G_m \Omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + j\omega \Gamma_m}$ เมื่อ $\epsilon_{r,\infty}$ เป็นค่า relative

permittivity ความถี่เป็นค่าอนันต์ Ω_m เป็นความถี่พลาสมาของอิเล็กตรอน ω_m เป็นความถี่เรโซแนนซ์ และ Γ_m เป็นเฟกเตอร์ความหน่วงหรือ collision frequency ϵ_r นี้เป็นค่าตั้งต้นที่ใช้คำนวณค่า ϵ_m ในสมการ β และ P_f รวมถึง L_z ในการคำนวณใช้โปรแกรม matlab ประมาณค่า $\epsilon_r(\omega)$ ของทองถึงลำดับที่ $m=5$ โดยใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ตาม Table 1 ซึ่งเป็นวิธีการเดียวกันกับการประมาณค่ายอมทางไฟฟ้าในโปรแกรม optiwave เพื่อจำลองผลเชิงเลขหาค่าสนามแม่เหล็กโหมด $TM_0 (H_y, E_x, E_z)$ ของคลื่น SPP ที่ตำแหน่งต่างๆ ผลการจำลองเชิงเลขจะได้ค่าออกมาเป็นค่าจำนวนจริงอ่านค่าได้โดยตรงจากกราฟ และแฉงระดับความเข้มโหมดแสงไว้เป็นระดับเฉดสีด้วย

การสร้างโมเดลในการจำลองผล เป็นแบบการวางชั้นสารต่างๆ แทนด้วยแผนภาพรูปทรงเรขาคณิตร่วมกับการกำหนดสมบัติของสารผ่านตัวแปรทางแสง โมเดลสำหรับศึกษาผลการรบกวนท่อนำแสงโดยสิ่งแวดลอมนั้นทำได้โดยการวางชั้นสารเพิ่มลงในตำแหน่งต่างๆ และปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรไปตามดัชนีหักเหแสงสารละลายที่สอดคล้องกับค่าที่คำนวณได้ของสิ่งแวดลอม มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในโปรแกรมที่ต้องกำหนดให้กับแต่ละชั้นสารคือขนาดในสามมิติ และค่าคงที่หรือฟังก์ชันของสารไดอิเล็กตริกขององค์ประกอบย่อยๆ แต่ละชั้นของท่อนำแสง ส่วน $\epsilon_r(\omega)$ ของฟิล์มบางของทองประมาณค่าจาก Lorentz-Drude model ที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งในส่วนนี้จะมีหน้าต่างย่อยในโปรแกรมให้ทำการกรอกค่าตัวแปรต่างดัง Table 1 ซึ่งโปรแกรมจะทำการประมาณค่าให้แล้วนำไปใช้ในการประมวลด้วย FDTD method ต่อไป ส่วนโมเดลที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงไว้ดัง Figure 1 ซึ่งเป็นรูปแบบ MDM slot waveguide

โมเดลประกอบด้วย แผ่นฟิล์มทองคำกว้าง 130 nm หนา 50 nm สองแผ่นวางทับบนชั้นฐานซิลิกอนกว้าง 400 nm หนา 250 nm แผ่นทองทั้งสองห่างกัน 140 nm จำลองผลโดยการเปลี่ยนค่าตัวแปร

และควบคุมตัวแปรไปที่ละค่า แต่ครั้งจะเก็บสะสมผลการจำลองค่าและสร้างกราฟทุกตัวแปรที่เก็บได้ แต่นำเสนอเฉพาะโหมด TM_0

Table 1 shows the sixth order dates of the Lorentz-Drude model of gold thin film, which in frequency unit (Rad/s)

Term	Strength	Plasma Frequency	Resonant Frequency	Damping Frequency
0	0.7600	0.137188E+17	0.000000E+00	0.805202E+14
1	0.0240	0.137188E+17	0.630488E+15	0.366139E+15
2	0.0100	0.137188E+17	0.126098E+16	0.524141E+15
3	0.0710	0.137188E+17	0.451065E+16	0.132175E+16
4	0.6010	0.137188E+17	0.653885E+16	0.378901E+16
5	4.3840	0.137188E+17	0.202364E+17	0.336362E+16

Note: Source. optiwave manual

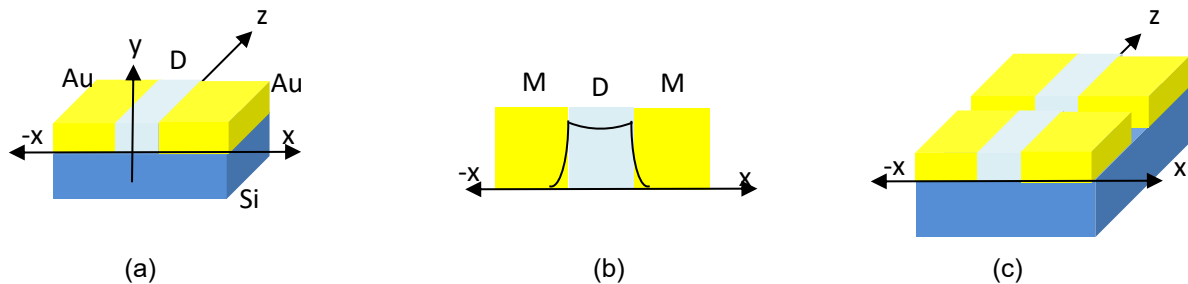


Figure 1 shows the configuration of the SPP slot waveguide, (a) single Metal-Dielectric-Metal (b) cross-section of the TM_0 mode as the black line in the gap slot (c) 2 slot lines model

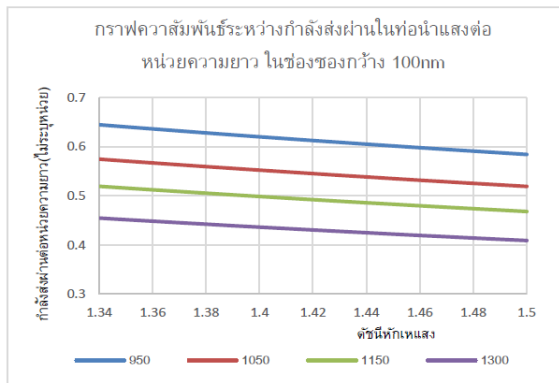
ผลการคำนวณและจำลองผล

ผลการคำนวณค่ากำลังแสงส่งผ่านในท่อนำแสงแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยวที่มีความกว้างช่องว่าง 100 nm 200 nm และ 400 nm พบว่ากำลังแสงลดลงเป็นเชิงเส้นตามดัชนีหักเหแสงของช่องว่างที่มากขึ้น ดัง Figure 2 - 4 เนื่องจากกำลังแสงส่งผ่านไปท่อนำแสงนี้ทำการคำนวณจากสมการที่กำหนด กำลังแสงเริ่มต้นเป็นหนึ่งหน่วย และคำนวณต่อหนึ่งความยาวจึงไม่ระบุหน่วย (a.u.) ในการคำนวณใช้ค่าดัชนีหักเหแสงของสารไดอิเล็กทริกในช่องช่องว่างตั้งแต่ 1.34 ถึง 1.5 ซึ่งได้ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่ากำลังแสงพลาสมอนิกลดลงเมื่อดัชนีหักเหแสงในช่องช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยวเพิ่มขึ้นดัง Figure 2(a) Figure 3(a) และ Figure 4(a) และยังพบว่า ความกว้างของช่องช่องว่างมากกำลังส่งผ่านไปได้มาก และกำลังที่ส่งผ่านแบบสั้นพ้องไปตามแผ่นฟิล์มทองบาง ๆ กลับมีค่าเป็นลบมากขึ้นดัง Figure 2(b) Figure 3(b) และ

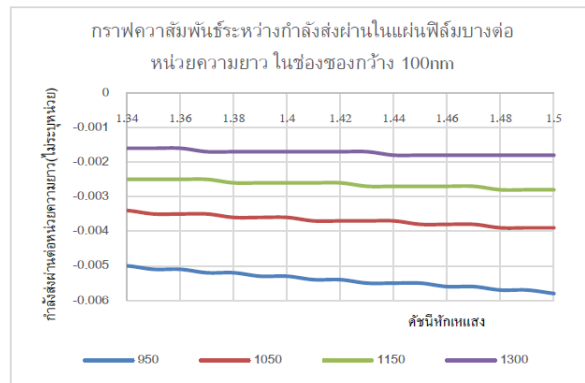
Figure 4(b) แต่มีความลาดชันเด่นชัดมากที่เส้นกราฟ ความยาวคลื่น 850 nm ในการคำนวณระยะทางสูงสุดที่กำลังแสงเชิงผิวสั้นพ้องได้ L_2 พบว่าค่าดัชนีหักเหแสงของสารไดอิเล็กทริกในช่องช่องว่างมากขึ้นส่งผลให้ L_2 มากขึ้น ทุกค่าของความยาวคลื่นที่ป้อนเข้า และลดทอนลงเร็วมากเมื่อความกว้างช่องช่องว่างแคบลงดัง Figure 5 ซึ่งคำนวณที่ความกว้างช่องช่องว่าง 100 nm และ 200 nm เปรียบเทียบกัน จากการจำลองผลที่ความกว้างช่องช่องว่าง 140 nm พบว่ามี TM_0 โหมดสั้นเป็นคลื่นในท่อนำแสงแบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยวดัง Figure 6(a) และเมื่อจำลองผลโดยเปลี่ยนดัชนีหักเหแสงของไดอิเล็กทริกในช่องช่องว่างไปที่ละ 0.01 และเก็บรวบรวมผลความเข้ม TM_0 โหมดที่ปลายท่อนำแสงที่ละค่าความยาวคลื่นที่ป้อนเข้า โดยเปลี่ยนความยาวคลื่นไป 3 ค่า คือ 1100 nm 1300 nm และ 1300 nm พบว่าความเข้มของ TM_0 โหมดแปรเปลี่ยนตามดัชนีหักเหแสงของช่องช่องว่างและความยาวคลื่น

ที่ป้อนเข้าดังกราฟใน Figure 6(b) แต่ความชันไม่ชัดเจนที่เส้นกราฟของ 1500 nm และการเกิดท้องถิ่นที่มีจุดโค้งต่ำสุด (peak) เห็นแนวโน้มเล็กน้อยที่ 1300 nm และ 1100 nm เมื่อทำการจำลองผลจากสองช่องช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเรียงกันและเก็บผลแบบเดียวกันกับแบบช่องเดี่ยว ได้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจคือพบ TM_0 โหมดสั้นเป็นลูกคลื่นที่เกิดในท่อนำแสงดัง Figure 7(a) แตกต่างไปจาก Figure 6(a) และผลจากการรวบรวมข้อมูลแบบเดียวกันกับรูปกราฟ Figure 6(b) ได้กราฟตาม Figure 7(b) ต่างออกไป พบว่าจุดโค้งต่ำสุดที่ 1300 nm เปลี่ยนไป ซึ่งมีหนึ่งตำแหน่งซึ่งต่าง

จาก Figure 6(b) ที่พบหลายตำแหน่ง และใน Figure 7(b) จุดโค้งต่ำสุดขยับตำแหน่งเลื่อนเข้ามาที่ดัชนีหักเหแสงน้อยกว่าใน Figure 6(b) เช่นเดียวกับที่เส้นกราฟ 1100 nm และเมื่อทำการจำลองผลโดยใช้ 4 ช่องช่องว่างแผ่นฟิล์มทองบางเรียงกันจะพบว่าได้รูปแบบของ TM_0 โหมดใน Figure 8(a) แตกต่างไปจากใน Figure 6(a) และ Figure 7(a) ที่เป็นของหนึ่งช่องช่องว่างแผ่นฟิล์มทองบางเดี่ยว และ สองช่องว่างแผ่นฟิล์มทองบางเรียงกัน ทั้งนี้ยังพบว่าจุดโค้งต่ำสุดที่แสดงการสูญเสียกำลังของโหมด TM_0 มากที่สุดในเส้นกราฟของความยาวคลื่นที่ 1300 nm และ



(a)



(b)

Figure 2 shows the relation between relative power transfer and gap refractive index, which (a) oscillates in a 100 nm space gap slot and (b) oscillates in gold thin films of 100 nm gap slot.

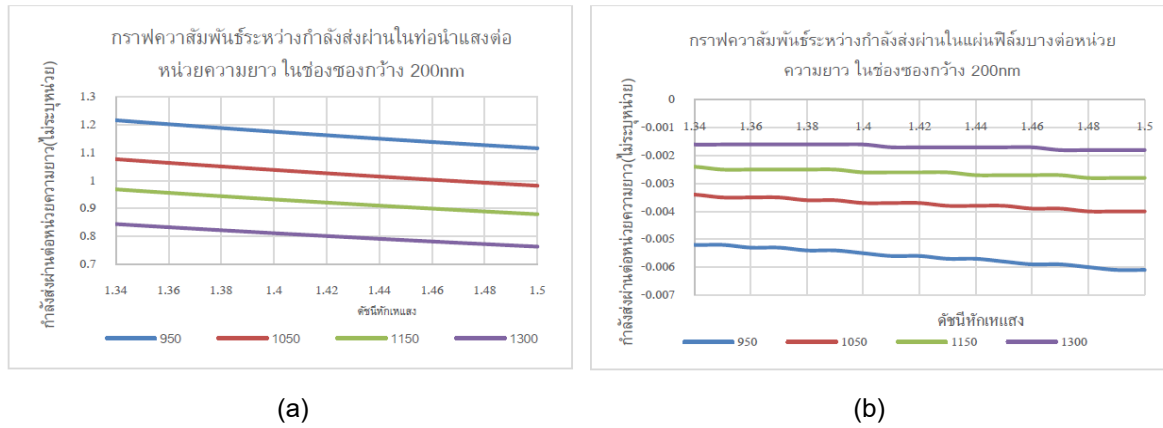


Figure 3 shows the computation result of the relation between relative power transfer and gap refractive index, which (a) oscillates in a 200 nm gap slot and (b) oscillates in gold thin films of 200 nm gap slot.

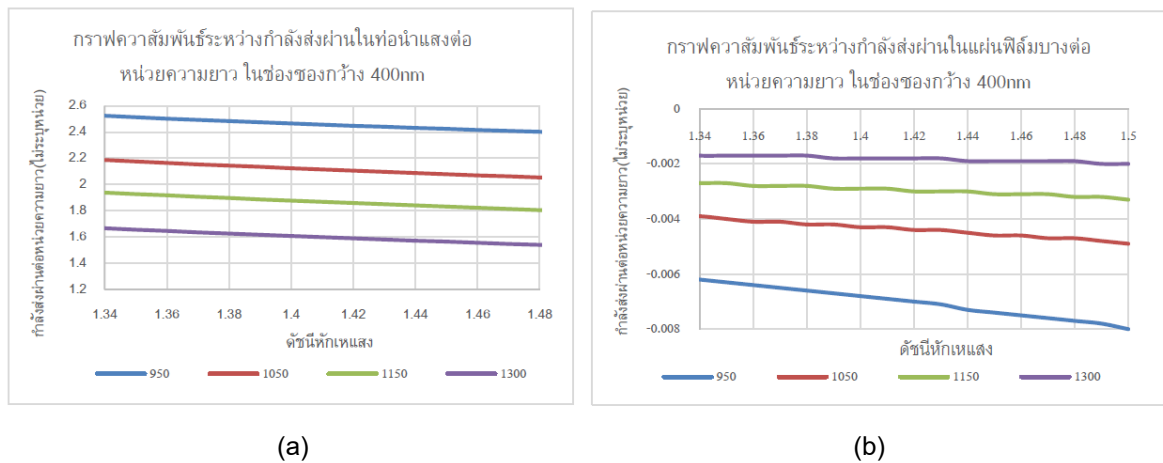


Figure 4 shows the computation result of the relation between relative power transfer and gap refractive index, which (a) oscillates in a 400 nm gap slot and (b) oscillates in gold thin films of 400 nm gap slot.

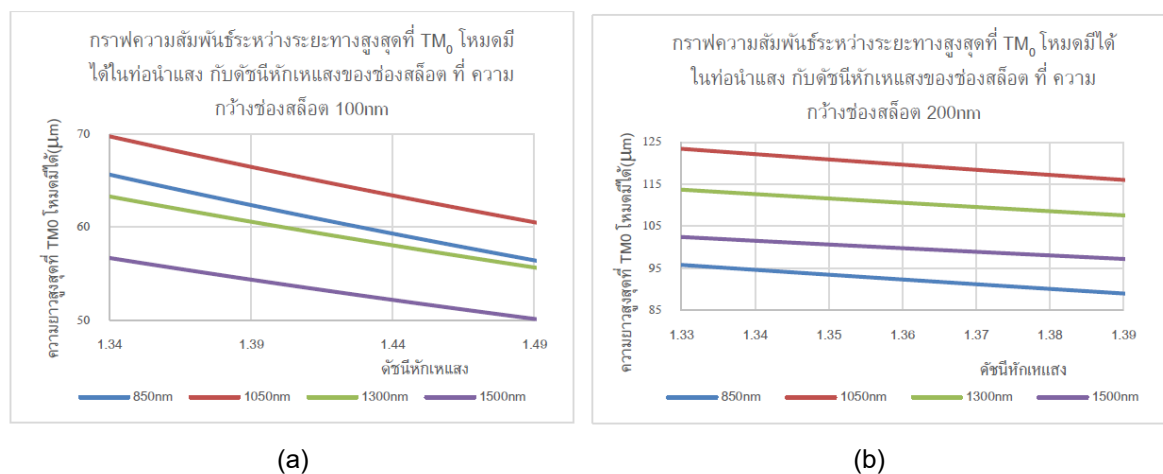


Figure 5 shows the computation result of the relation between propagation length and gap refractive index of (a) 100 nm of gold thin film slot and (b) of gold thin film slot 200 nm.

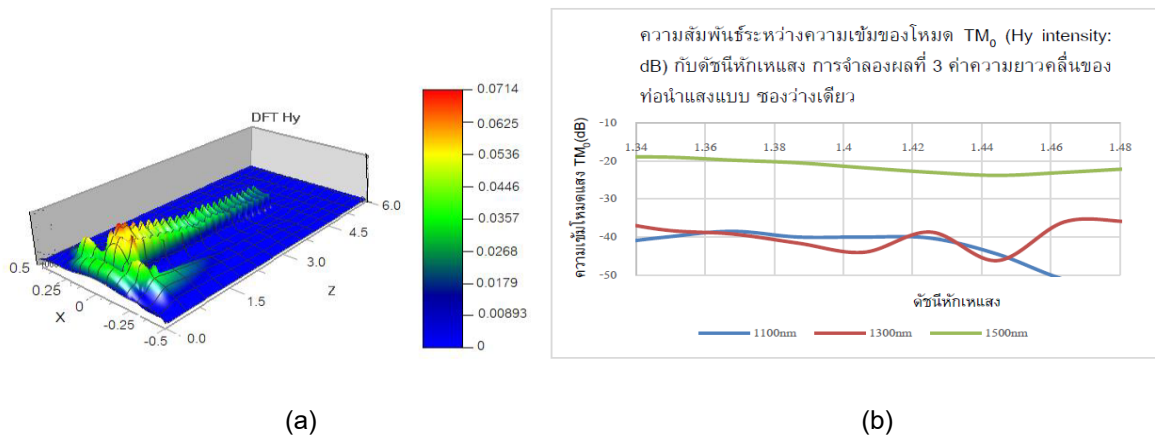


Figure 6 shows the result of perturbation simulation in a single SPP slot waveguide gap while the refractive index of the gap slot is changed, (a) TM_0 mode of simulation result; (b) graph of the relation between TM_0 mode intensity and the refractive index of the gap slot that is corrected from many times of simulation.

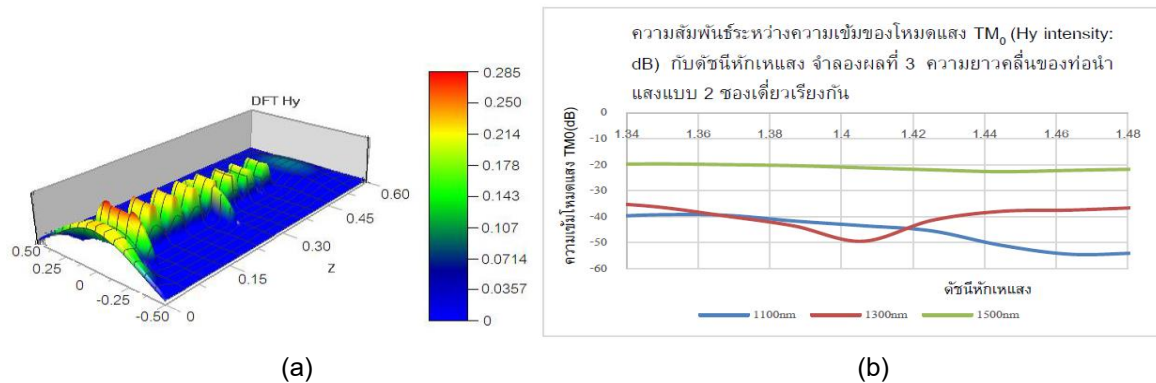


Figure 7 shows the result of perturbation simulation in 2 SPP slot line waveguide gap while the refractive index of the gap slot is changed. (a) TM_0 mode of simulation result; (b) graph of the relation between TM_0 mode intensity and the refractive index of the gap slot that is corrected from many times of simulation.

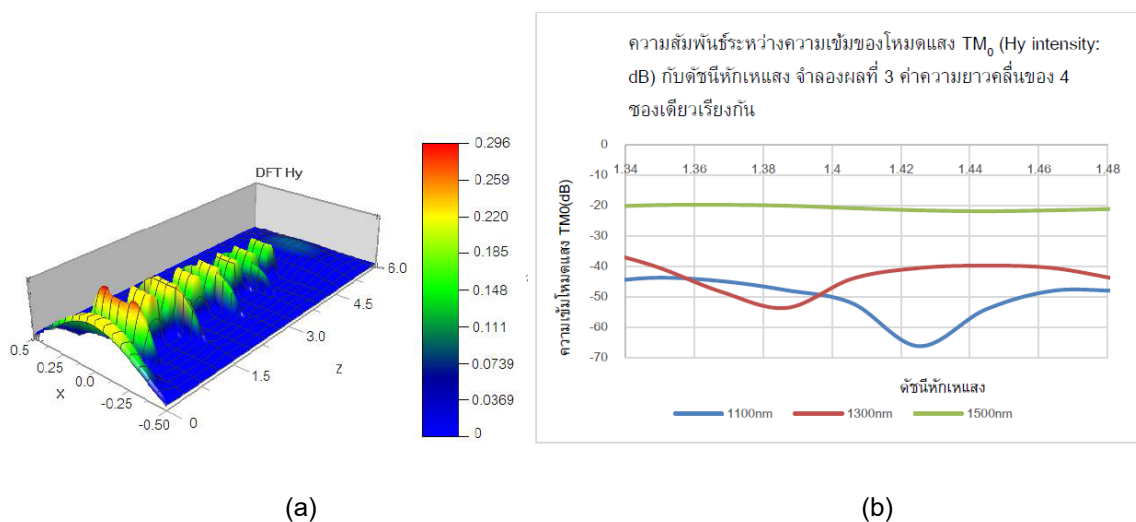


Figure 8 shows the result of perturbation simulation in 4 SPP slot line waveguide gaps while the refractive index of the gap slot is changed, (a) TM_0 mode of simulation result; (b) graph of the relation between TM_0 mode intensity and the refractive index of the gap slot that is corrected from many times of simulation.

เมื่อทำการจำลองผลโดยคงค่าความยาวคลื่นที่ป้อนเข้าที่นำแสงเป็น 1100 nm แต่เปลี่ยนดัชนีหักเหแสงจาก 1.34 ถึง 1.48 ของแต่ละโมเดลคือ แบบช่องว่างแผ่นฟิล์มทองเดี่ยว 2 ช่องต่อเรียงกัน และ 4 ช่องต่อเรียงกัน ได้ผลที่น่าสนใจมาก ดัง Figure 9(a) ซึ่งจะเห็นว่าการสูญเสีย TM_0 โหมด ตรงจุดโค้งต่ำสุดของเส้นกราฟที่ตำแหน่งต่างๆ กันตามดัชนีหักเหแสงในช่องช่องว่างที่ต่างกัน จุดโค้งต่ำสุดของแต่ละเส้นกราฟนี้แสดงการเลื่อนเหลื่อมกันตามแนวแกนดัชนีหักเหแสงและเกิดขึ้นชัดเจนที่สุดที่ความยาวคลื่นป้อนเข้าที่นำแสง 1100 nm ส่วนใน Figure 9(b) เป็นการจำลองผลและเก็บผลแบบเดียวกันกับใน Figure 9(a) แต่ทำการเก็บผลที่ความยาวคลื่น 1300 nm ที่ป้อนเข้าที่นำแสง ซึ่งได้ผลสนับสนุนกันกับ Figure 9(a) แต่พบว่าจุดโค้งต่ำสุดของแต่ละ

เส้นกราฟเลื่อนเหลื่อมกันไปตามแนวแกนดัชนีหักเหแสงชัดเจนกว่าใน Figure 9(a) นอกจากนี้การจำลองผลเชิงเลขยังได้ทำการรบกวนที่แผ่นฟิล์มทองบางโดยการวางชั้นบางๆ ของสิ่งแวดล้อมที่มีดัชนีหักเหแสงอยู่ในช่วง 1.33 ถึง 1.5 ลงบนแผ่นฟิล์มบางของโลหะทั้งสองของที่นำแสงแต่กำหนดให้ช่องว่างช่องเป็นอากาศ พบว่าผลการรบกวนที่นำแสงด้วยวิธีนี้ได้ผลการส่งผ่านแสงที่ตอบสนองต่อดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบางของสิ่งแวดล้อมอย่างมากดัง Figure 10(a) และมีจุดโค้งต่ำสุดของแต่ละเส้นกราฟหลายจุดในช่วงความยาวคลื่นที่ป้อนเข้า 1000 nm ถึง 1350 nm แต่ละจุดต่ำสุดในเส้นกราฟแต่ละเส้นเลื่อนเหลื่อมกันตามแนวแกนของดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบางของสิ่งแวดล้อมที่วางบนแผ่นฟิล์มโลหะ ดัง Figure 10(b)

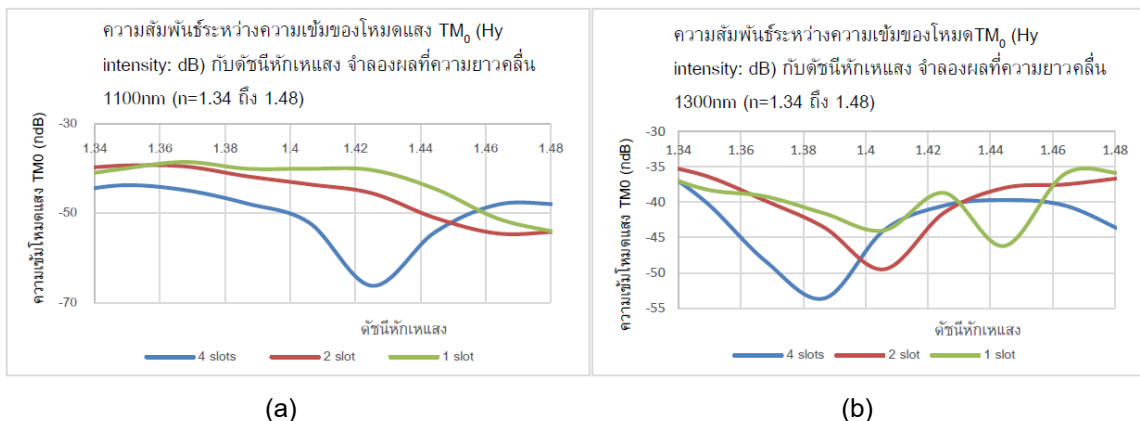
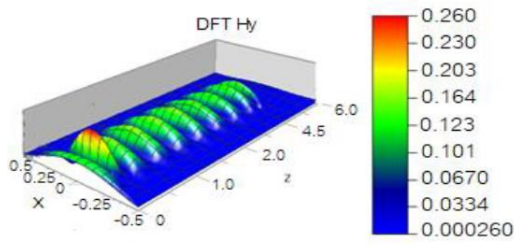
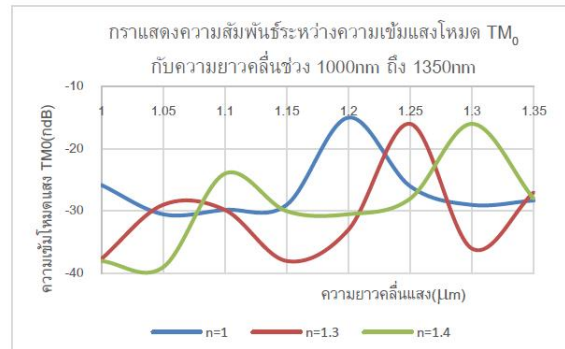


Figure 9 shows the graph of the relation between TM_0 mode intensity and refractive index that are corrected from many times of simulation of single, 2 and 4 slot lines (a) at 1100 nm input wavelength and (b) at 1300 nm input wavelength.



(a)



(b)

Figure 10 shows the perturbation simulation result while the thin films of some solution are added to the gold thin films of a single slot waveguide (a) picture of the simulation result and (b) a graph of the simulation result that are corrected many times while the input wavelength is changed to 3 values of the refractive index of solution thin films.

วิจารณ์

ผลการคำนวณใน Figure 2 ถึง Figure 4 จะพบว่าโหมดแสงเชิงผิวที่ถูกพาโดยแผ่นฟิล์มโลหะบางในท่อนำแสงแบบช่องของฟิล์มทองได้ ดัง Figure 2(a) 3(a) และ 4(a) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่ากำลังแสงที่คำนวณได้นี้แปรเปลี่ยนลดลงเมื่อดัชนีหักเหแสงของช่องของว่างเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 1.34 ถึง 1.5 หรืออาจกล่าวได้ว่าการส่งผ่านแสงเชิงผิวเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อดัชนีหักเหแสงของว่างเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กันเป็นแบบเชิงเส้นที่มีความชันมากที่ความกว้างช่องของ 100 nm ถึง 200 nm และผลการคำนวณใน Figure 2(b) 3(b) และ 4(b) แสดงให้เห็นว่ากำลังแสงเชิงผิวที่ส่งผ่านโดยแผ่นฟิล์มบางของทองเปลี่ยนแปลงตามดัชนีหักเหแสงของสารในช่องของด้วย อย่างไรก็ตามท่อนำแสงเชิงผิวแบบนี้มีการลดทอนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นผลการคำนวณดังแสดงไว้ใน Figure 5 จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบโมเดลท่อนำแสง ซึ่งเป็นผลการคำนวณระยะทางสูงสุดที่โหมด TM_0 สันพ้องอยู่ได้ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของชั้นสารช่องของว่างจาก 1.33 ถึง 1.5 ที่กว้าง 100 nm แต่ระยะทางสูงสุดที่กำลังแสง TM_0 โหมดสันพ้องอยู่ได้มีค่าประมาณ 50 ถึง 70 ไมโครเมตร ตั้งแต่ความยาวคลื่น 850 nm ถึง 1500 nm ที่ป้อนเข้าท่อนำแสงตาม Figure 5(a) และที่

ความกว้างช่องของ 200 nm จะมากขึ้นเป็น 87 ถึง 124 ไมโครเมตร ตาม Figure 5(b) ซึ่งก็มากกว่ามากๆ เมื่อเทียบกับความยาวท่อนำแสงที่จะใช้ในการจำลองผล

ท่อนำแสงที่ใช้ในการจำลองผลความยาว 4 μm ความกว้างช่องของที่ 140 nm ซึ่งเป็นค่าระหว่าง 100 nm กับ 200 nm จากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่าโหมดแสงเชิงผิว TM_0 โหมดสามารถสันพ้องในท่อนำแสงได้ไปจนถึงปลายท่อและตรวจรับได้ในระยะใกล้ ตาม Figure 6(a) 7(a) และ 8(a) และเกิดขึ้นได้ทั้งในแบบช่องของเดี่ยว 2 ช่องของเรียงกัน และ 4 ช่องของเรียงกัน และผลการรบกวนที่ท่อนำแสงที่ได้จากการจำลองผลโดยเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงของช่องของตั้งแต่ 1.33 ถึง 1.5 ตาม Figure 6(b) 7(b) และ 8(b) แสดงให้เห็นว่าโหมดแสงเชิงผิวนี้มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสารในช่องของว่างแผ่นฟิล์มทอง และพบได้ชัดเจนที่เส้นกราฟของความยาวคลื่นป้อนเข้าท่อนำแสงที่ 1100 nm และ 1300 nm ของแบบช่องของเดี่ยวแต่ความชันน้อยและมีโคงจุดต่ำสุดน้อยๆ ตาม Figure 6(b) การจำลองผลที่ 2 ช่องของเดี่ยวเรียงกันพบว่า มีผลตอบสนองมากขึ้นคือที่เส้นความยาวคลื่น 1100 nm และ 1300 nm พบจุดโคงต่ำสุดเป็นพีคทั้งสองเส้น และพบแนวโน้มการเลื่อนเหลื่อมกัน

ของจุดต่ำสุดทั้งสองเส้นกราฟ ตาม Figure 7(b) และเมื่อจำลองผลที่สี่ช่องของเรียงกันก็พบว่า เส้นกราฟที่ความยาวคลื่น 1100 nm และ 1300 nm มีจุดโค้งต่ำสุดขยับเข้ามาที่ดัชนีหักเหแสงน้อยลงชัดเจนและเลื่อนเหลื่อมกันชัดเจนตาม Figure 8(b) แสดงให้เห็นว่าโมเดลช่องของเดี่ยวเดี่ยวตอบสนองน้อยกว่า และตอบสนองที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า ที่สองช่อง และที่สี่ช่องเดี่ยวเรียงกัน การมีจำนวนช่องของเดี่ยวเรียงกันมากมีผลต่อการเลื่อนเหลื่อมของจุดโค้งต่ำสุดของกราฟ หรือมีผลต่อการสูญเสียกำลังส่งผ่านมากที่สุดที่ความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับท่อนำแสงและดัชนีหักเหแสงของสารในช่องช่องว่าง ผลการจำลองผลใน Figure 9(a) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเลือกความยาวคลื่นที่ป้อนเข้าท่อนำแสงเป็น 1100 nm จุดโค้งต่ำสุดเด่นชัดที่ 4 ช่องของเรียงกัน ส่วนสองช่องของและสี่ช่องของเดี่ยวแนวโน้มจุดโค้งต่ำสุดอยู่นอกช่วงดัชนีหักเหแสงที่จำลองผล แต่ผลการจำลองเชิงตัวเลขโดยป้อนความยาวคลื่น 1300 nm พบว่าจุดโค้งต่ำสุดเหลื่อมเหลื่อมกันของทั้งสามรูปแบบชัดเจนในช่วงดัชนีหักเหแสง 1.34 ถึง 1.48 ดัง Figure 9(b) แต่พบว่าผลของช่องของเดี่ยวเกิดจุดโค้งต่ำสุดหลายจุด จากการคำนวณและจากผลการจำลองเชิงเลขจะพบว่า การส่งผ่านกำลังแสงเชิงผิวในท่อนำแสงแบบช่องของเดี่ยวแปรเปลี่ยนไปตามค่าดัชนีหักเหแสงของสารในช่องช่องของฟิล์มทองบาง ดังนั้น การรบกวนจากภายนอกที่ส่งผลให้สารในช่องช่องดังกล่าวเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่ากำลังแสงที่ส่งผ่านไปท่อนำแสงมีจุดที่เสถียรกำลังต่ำสุดเปลี่ยนตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด การเพิ่มจำนวนช่องเดี่ยวของแผ่นฟิล์มทองบางมีผลให้การตอบสนองในแบบอุปกรณ์ตรวจวัดที่หลากหลายมากขึ้น แต่โดยทั่วไปข้อจำกัดของขนาดช่องช่องว่างทำให้ประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้จำกัด การรบกวนท่อนำแสงจากภายนอกตรงบริเวณด้านบนของแผ่นฟิล์มทองบางอาจมีข้อจำกัดน้อยกว่า และพบว่าการตอบสนองในแบบอุปกรณ์ตรวจวัดได้ดีกว่าดังผล

การจำลองเชิงเลขดัง Figure 10(a) การเพิ่มชั้นสารบางๆ ลงไปบนแผ่นฟิล์มทองทั้งสองให้เหมือนกับมีการสัมผัสสารที่นำมาทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดแบบท่อนำแสงนี้ โดยจำลองว่าเป็นชั้นสารมีดัชนีหักเหแสงอยู่ในช่วงกลางของสารละลายทองนาและอลูมิเนียมนาโนที่ความเข้มข้นต่ำๆ (อยู่ระหว่าง 1.33 ถึง 1.49 ซึ่งได้มาจากการคำนวณ) คือใช้ที่ $n=1.33$ และ $n=1.4$ และเปรียบเทียบกับที่ $n=1$ ของอากาศ ซึ่งผลการจำลองแสดงแนวโน้มที่สรุปได้ว่าการตอบสนองต่อดัชนีหักเหแสงที่แตกต่างกันทั้งสามค่าดัง Figure 10(b) ซึ่งจะพบจุดโค้งต่ำสุดของโหมดแสง TM_0 มีหลายจุดในช่วงความยาวคลื่น 1000 nm ถึง 1350 nm ท่อป้อนเข้าท่อนำแสง การซ้อนเหลื่อมสลับกันของแต่ละค่าดัชนีหักเหแสงชั้นสารชัดเจน และสามารถเลือกการตอบสนองได้หลายช่วง นอกจากนี้ทั้งผลการคำนวณและการจำลองผลเชิงเลขทั้งหมดยังแสดงให้เห็นว่ามีความหลากหลายรูปแบบการตอบสนองต่อปัจจัยกระทบภายนอกท่อนำแสงแบบช่องช่องของแผ่นฟิล์มทองและอาจนำไปออกแบบการประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้หลากหลาย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ที่ให้การสนับสนุนด้านโปรแกรม Matlab

เอกสารอ้างอิง

- Andryieuski, A., Zenin, V. A., Malureanu, R., Volkov, V. S., Bozhevolnyi, S. I., & Lavrinenko, A. V. (2014). Direct characterization of plasmonic slot waveguides and nanocouplers. *Nano letters*, 14(7), 3925-3929.
- Chen, Y., & Ming, H. (2012). Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor. *Photonic Sensors*, 2(1), 37-49.

- Du, C. H., & Chiou, Y. P. (2014). Vertical directional couplers with ultra-short coupling length based on hybrid plasmonic waveguides. *Journal of lightwave technology*, 32(11), 2065-2071.
- Delacour, C., Blaize, S., Grosse, P., Fedeli, J. M., Bruyant, A., Salas-Montiel, R., Chelnokov, A. (2010). Efficient directional coupling between silicon and copper plasmonic nanoslot waveguides: toward metal-oxide-silicon nanophotonics. *Nano letters*, 10(8), 2922-2926.
- Dellagiacoma, C., Lasser, T., Martin, O. J. F., Degiron, A., Mock, J. J., & Smith, D. R. (2011). Simulation of complex plasmonic circuits including bends. *Optics Express*, 19(20), 18979-18988.
- Fu, Y., Hu, X., Lu, C., Yue, S., Yang, H., & Gong, Q. (2012). All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides. *Nano letters*, 12(11), 5784-5790.
- Han, Z., Elezzabi, A. Y., & Van, V. (2010). Wideband Y-splitter and aperture-assisted coupler based on subdiffraction confined plasmonic slot waveguides. *Applied Physics Letters*, 96(13), 131106.
- LATIFI, H., ZIBALI, M. I., HOSSEINI, S. M., & JORGE, P. (2012), Nonadiabatic Tapered Optical Fiber for Biosensor Applications. *Photonic Sensors*, 2(4) , 340–356.
- Li, C. S., & Sun, H. (2012). Metamaterials Application in Sensing. *Sensors*, 12(3), 2742-2765.
- Nemova, G., & Kashyap, R. (2007). Novel fiber Bragg grating assisted plasmon-polariton for bio-medical refractive-index sensors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 18(1), 327-330.
- Osowiecki, G. D., Barakat, E., Naqavi, A., & Herzig H. P. (2014). Vertically Coupled Plasmonic Slot Waveguide Cavity for Localized Bio-sensing applications. *Optics Express*, 22(17), 20871-20880.
- Roney, T., Ikonik, Z., & Kelsall, R. W. (2012). Silicon based plasmonic coupler. *Optics Express*, 20 (19), 21520-21531.
- Tan, Y. (2018). Chemical Sensing Applications of Carbon Nanotube-Deposited Optical Fibre Sensors. *Chemo sensors*, 6 (4), 55.
- Wang, J., Cheng, Z., Chen, Z., Wan, X., Zhu, B., Tsang, H. K., ... Xu, J. (2016). High-responsivity graphene-on-silicon slot waveguide photodetectors. *Nanoscale*, 8(27), 13206-13211.
- Zhu, Z., Garcia-Ortiz, C. E., Han, S., Radko, I. P., & Bozhevolnyi, S. I. (2013). Compact and Broadband Directional Coupling and Demultiplexing in Dielectric-loaded Surface Plasmon Polariton Waveguides Based on the Multimode Interference Effect. *Applied Physics Letters*, 103(6), 061108.