

การจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลของโครงสร้างเส้นใยแก้วเกรตติง ที่ถูกเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อความยาวคลื่นแบร็ก

วัชรภรณ์ พรพานิช¹ และ อธิคม ฤกษ์บุตร²

Abstract

Pornpanich, W. and Roeksabutr, A.

Simulations for analysis of the effect of ZnO-coated fiber grating structure to the Bragg wavelength

Songklanakarini J. Sci. Technol., 2003, 25(6) : 729-741

This paper theoretically analyses the characteristic of a fiber Bragg grating coated with piezoelectric zinc oxide (ZnO) in order to operate under the acousto-optic effect by means of shifting Bragg wavelength. Simulations are performed to investigate the change of Bragg wavelength when varying parameters of the device structure. The results will be useful for consideration of device design as well as determination of the operating conditions.

Key words : acousto-optic, fiber Bragg grating, ZnO-coated fiber, tunable Bragg wavelength

Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand.

¹วศ.บ.(วิศวกรรมโทรคมนาคม) ²Ph.D.(Optical Communication), รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Corresponding e-mail: athikom@mut.ac.th

รับต้นฉบับ 22 พฤษภาคม 2546 รับลงพิมพ์ 3 สิงหาคม 2546

บทคัดย่อ

วัชรภรณ์ พรพานิช และ อริคม ฤกษ์บุตร
 การจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลของโครงสร้างเส้นใยแก้วเกรตติง
 ที่ถูกเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์ที่มีผลต่อความยาวคลื่นแบร็ก

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2546 25(6) : 729-741

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีเพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อค่าความยาวคลื่นแบร็กของเส้นใยแก้วเกรตติงชนิดแบร็กที่ถูกเคลือบด้วยสารพีโซอิเล็กทริกชนิดซิงค์ออกไซด์ โดยการจำลองระบบการทำงานของอุปกรณ์เพื่อศึกษาและสำรวจคุณสมบัติเชิงทฤษฎีของเส้นใยแก้วเกรตติงชนิดแบร็กที่ทำงานภายใต้คุณสมบัติทางอะคูสโต-ออปติกส์ (acousto-optic) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพต่าง ๆ และค่ากำลังงานทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาออกแบบ และการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของอุปกรณ์

เส้นใยแก้วเกรตติงชนิดแบร็ก (Fiber Bragg Grating) และตัวทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงของเส้นใยแก้วที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารพีโซอิเล็กทริก เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจในระบบสื่อสารโทรคมนาคมเชิงแสง เส้นใยแก้วเกรตติงชนิดแบร็ก มีคุณสมบัติในการสะท้อนความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ต้องการได้ โดยค่าความยาวคลื่นนี้ซึ่งเรียกว่าความยาวคลื่นแบร็ก (Bragg wavelength: λ_B) จะสะท้อนกับระนาบของเกรตติงชนิดแบร็กแต่ละคาบในเส้นใยแก้วเกรตติง โดยแต่ละส่วนของเกรตติงจะเกิดการสะท้อนก่อดัวสะสมมากขึ้นจนมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นแล้วแสงจะเดินทางสะท้อนกลับในทิศทางตรงกันข้ามกับแสงที่เข้ามากระทบกับระนาบของตัวเกรตติงชนิดแบร็ก (Kashyap, 1999) โดยปกติค่าของความยาวคลื่นแบร็กกำหนดได้จากโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยแก้วเกรตติงซึ่งมักมีค่าที่แน่นอนไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ อย่างไรก็ตามหากสามารถควบคุมโครงสร้างทางกายภาพให้เปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการได้ ก็จะสามารถควบคุมค่าความยาวคลื่นแบร็กได้ด้วยเช่นกัน Fox และคณะ (1997) ได้นำเสนอผลการทดลองของอุปกรณ์ที่เป็นเส้นใยแก้วเกรตติงที่ถูกเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์ที่ผิวโดยรอบ เพื่อทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงของเส้นใยแก้วเป็นครั้งแรก ตามลักษณะโครงสร้างแสดงใน Figure 1 เมื่อทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่สูงหลายร้อยเมกะเฮิรตจนถึงย่านกิกะเฮิรตให้กับทรานสดิวเซอร์ จะเกิดคลื่นอะคูสติกส์ (acoustic waves) ซึ่งเป็นคลื่นเสียงเดินทางในแนวตัด

ขวางของเส้นใยแก้ว ทำให้เส้นใยแก้วเกิดปรากฏการณ์ทางอะคูสโตออปติกส์ (acousto-optic effect) ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของคอร์ (core) เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากผลของปรากฏการณ์ของโฟโตอีลาสติก (photoelastic effect) นี้ ทำให้ค่าดัชนีหักเห (effective index) ของเส้นใยแก้วเกรตติงเปลี่ยนแปลงไปด้วย อันเป็นผลทำให้ค่าของความยาวคลื่นแบร็กเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ในการทดลองครั้งนั้นยังมีได้มีการนำเสนอทฤษฎีการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งต่อมา (Roeksabutr and Pornpanich, 2002) ได้ทำการนำเสนอทฤษฎีในการทำงานของอุปกรณ์เส้นใยแก้วเกรตติงชนิดแบร็กที่ทำการเคลือบด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นครั้งแรก โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว (Roeksabutr and Chu, 1997 และ Roeksabutr and Chu, 1998) กับทฤษฎีพื้นฐานของเส้นใยแก้วเกรตติง (Kashyap, 1999) โดยทฤษฎีที่ได้นำเสนอสามารถแสดงคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ได้สอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านั้นได้เป็นอย่างดี

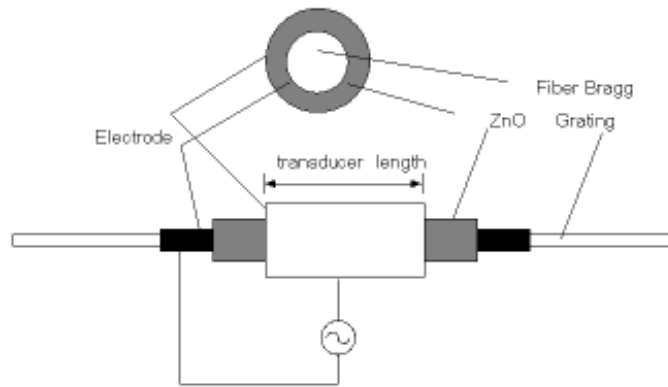
ในบทความนี้ เป็นการขยายผลเพิ่มเติมจากทฤษฎีที่ได้นำเสนอไปแล้ว (Roeksabutr and Pornpanich, 2002) ในการศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ โดยการจำลองระบบการทำงานเมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปเพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร็ก โดยค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพที่สนใจ ได้แก่ ค่าความหนาของชั้นไฟฟ้า (ในที่นี้คือโลหะ

อะลูมิเนียม) ค่าความหนาของชั้นไพโซอิเล็กทริกที่เป็นซิงค์ออกไซด์ ค่าความยาวของตัวทรานสดิวเซอร์ ค่าของมุมในการเคลือบซิงค์ออกไซด์บนผิวเส้นใยแก้ว และขนาดของเส้นใยแก้วในเทอมของคาร์ตมี รวมไปถึงค่ากำลังงานทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์

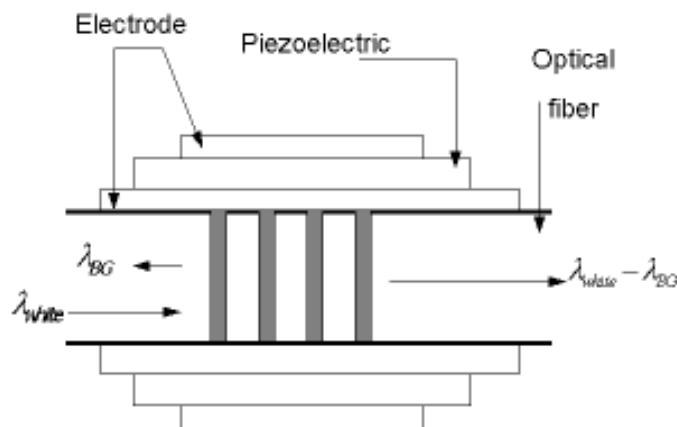
1. โครงสร้างและทฤษฎีการทำงานของอุปกรณ์

โครงสร้างของเส้นใยแก้วเกรตติ้งชนิดแบร็กที่ถูกละเลาะด้วยซิงค์ออกไซด์โดยรอบในช่วงของเส้นใยแก้วที่เป็นเกรตติ้ง (Figure 1) ซึ่งเมื่อป้อนกำลังงานไฟฟ้าความถี่สูง (ค่าความถี่สัมพันธ์กับความหนาของซิงค์ออกไซด์) ให้

กับตัวอุปกรณ์ จะเกิดปรากฏการณ์ทางอะคูสโตออปติกส์หรือปรากฏการณ์โฟโตอีลาสติก ทำให้คอร์ดมีค่าของความเครียด (strain) เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วเกรตติ้งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในที่สุดก็จะส่งผลให้ค่าการสะท้อนกลับ (reflectivity, R) และการส่งผ่านกำลังงานแสง (transmission, T) ของแสงที่เดินทางผ่านตัวอุปกรณ์ ในขณะที่ทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงที่มีสารไพโซอิเล็กทริกเป็นซิงค์ออกไซด์ทำงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยค่าการส่งผ่านกำลังงานของความยาวคลื่นแสงหาได้จาก $T = 1 - R$ โดยที่ R เป็นค่าของการสะท้อนกลับ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (1) (Kashyap, 1999)



(a) device schematic



(b) cross section along the fiber axis

Figure 1. Structure of an optical fiber transducer coated with zinc oxide.

$$R = \frac{k^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + S^2 \cosh^2(SL)} \quad (1)$$

เมื่อ L เป็นค่าความยาวเฉพาะส่วนที่เป็นเกรตติงของเส้นใยแก้ว, $S = \sqrt{k^2 - \Delta\beta^2}$ โดยที่ k เป็นค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิง (coupling coefficient) ของเส้นใยแก้วเกรตติงมีค่าตามสมการที่ (2)

$$k = \frac{\pi(\delta n + \Delta n)}{\lambda_B} \xi \quad (2)$$

โดยที่ δn เป็นค่าขนาดแอมพลิจูดของค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าดัชนีหักเหของคอร์ในช่วงที่เป็นเกรตติง ξ เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงค่ากำลังงานแสงที่อยู่ใน

ส่วนของคอร์ของเส้นใยแก้ว ซึ่งมีค่าประมาณ $\xi \approx 1 - \frac{1}{V^2}$

เมื่อค่า V เป็นค่าความถี่นอร์มัลไลซ์ (normalized frequency) ของเส้นใยแก้ว, และ λ_B เป็นค่าความยาวคลื่นของเส้นใยแก้วเกรตติงชนิดแบร์ริ่ง

$\Delta\beta$ เป็นค่าการเลื่อนไปของเวกเตอร์คลื่น (detuning wave vector) มีค่าเป็น $\Delta\beta = \beta - \frac{P\pi}{\Lambda}$ เมื่อ Λ เป็น

ค่าระยะของคาบเกรตติง (grating period) P เป็นเลขจำนวนนับ (ซึ่งในกรณีของ fundamental Bragg order จะได้ $P = 1$) และ β เป็นค่าคงที่โหมดของการเดินทาง (mode propagation constant) โดยที่

$$\beta = \frac{2\pi(n_{eff} + \Delta n)}{\lambda} \quad (3)$$

เมื่อ n_{eff} เป็นค่าดัชนีหักเหในคอร์ของเกรตติง และ λ เป็นค่าความยาวคลื่นแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว

Δn เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปของดัชนีหักเหในส่วนของคอร์ของเส้นใยแก้วเกรตติง อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์โฟโตอีลาสติก (photoelastic effect) ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการที่ (4)

$$\Delta n = 0.5n^3[(p_{11} + p_{12})S_r + p_{12}S_z] \quad (4)$$

โดยที่ p_{11} และ p_{12} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางโฟโตอีลาสติกของแก้ว n เป็นค่าดัชนีหักเหเดิมของคอร์ก่อนเกิดปรากฏการณ์โฟโตอีลาสติก S_z เป็นค่าความเครียดตามแนวยาวของเส้นใยแก้ว (axial strain) ซึ่งสามารถอนุมานให้เท่ากับศูนย์ เนื่องจากค่าความยาวคลื่นเสียงที่ผลิตจากทรานสดิวเซอร์ จะมีค่าน้อยกว่าความยาวของทรานสดิวเซอร์มาก S_r เป็นค่าความเครียดในแนวรัศมี (radial strain) (Roeksabutr and Chu, 1998) มีค่าดังสมการที่ (5)

$$S_r = \sqrt{\frac{\eta P_e}{Z_f v_f^2 \rho l}} \quad (5)$$

เมื่อ P_e เป็นกำลังงานทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์

Z_f เป็นความต้านทานเชิงอะคูสติกของเส้นใยแก้ว (acoustic impedance)

v_f เป็นความเร็วของคลื่นเสียง (acoustic velocity) ที่เดินทางภายในเส้นใยแก้ว

l เป็นความยาวของทรานสดิวเซอร์

ρ เป็นรัศมีของคอร์

η เป็นประสิทธิภาพของการเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าเป็นกำลังงานกลของคลื่นเสียงที่เข้าไปในเส้นใยแก้ว ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพของอุปกรณ์

2. ผลกระทบของโครงสร้างทางกายภาพต่อค่าความยาวคลื่นแบร์ริ่ง

ในการจำลองระบบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการทำงานของอุปกรณ์ในทอมของจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริ่งในที่นี้ใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 6.5 สร้างเป็น m.file เพื่อคำนวณหาค่าการสะท้อนกลับในแต่ละเงื่อนไขที่พิจารณา โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์หลักที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ (Rosenbaum, 198) ในเบื้องต้นมีค่าคงที่ ดังนี้

1) **อิเล็กโทรด (โลหะอะลูมิเนียม)** มีความหนาของชั้นฟิล์ม 0.1 μm , ความต้านทานทางอะคูสติกส์ $17.33 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, ความเร็วคลื่นเสียงที่เดินทางในวัสดุ 6400 m/s, การลดทอนสัญญาณเชิงคลื่นกล 236.2 Np/m^2 และความยาวของทรานสดิวเซอร์ 2 มม.

2) **ซิงค์ออกไซด์:** ความหนาของชั้นฟิล์ม 2.45 μm , ความต้านทานทางอะคูสติกส์ $36 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, ความเร็วคลื่นกลในตัวกลาง 6300 m/s

3) **เส้นใยแก้ว:** เส้นผ่านศูนย์กลาง 7/125 μm , ความต้านทานทางอะคูสติกส์ $13.1 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{-s}$, ความเร็วคลื่นกล 5600 m/s, สัมประสิทธิ์ของโฟโตออสติคของเส้นใยแก้ว $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.2$, ดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง (cladding) 1.457, ดัชนีหักเหของคอร์ 1.461, ค่าความยาวคลื่นแสงที่เดินทางอยู่ในช่วง 1550 nm

4) **แบร์ริเกรตติง:** ค่าความเครียดเดิมของเกรตติง 0.0016, ค่าความยาวของเกรตติงในช่วงที่เป็นทรานสดิวเซอร์ 2 มม.,

5) ค่ากำลังงานที่ป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์ 15 dBm

เมื่อทำการจำลองระบบด้วยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ แล้วพิจารณาการสะท้อนกลับของความยาวคลื่นแบร์ริ ในเทอมของประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานแสง ($T = I-R$) จะ

พบว่าตัวเส้นใยแก้วเกรตติงเอง มีค่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริเป็น 1552 นาโนเมตร และแบนด์วิดท์ (bandwidth) การทำงานในช่วงความยาวคลื่นแบร์ริเท่ากับ 3.5 นาโนเมตร และเมื่ออุปกรณ์ได้รับกำลังงานไฟฟ้าขนาด 15 dBm จุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริจะเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 1556 นาโนเมตร โดยที่ค่าของแบนด์วิดท์ยังคงเดิม (Figure 2)

2.1 ผลของความหนาของอิเล็กโทรด (อะลูมิเนียม)

การศึกษาหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าความหนาของอิเล็กโทรดที่เป็นอะลูมิเนียมทั้งด้านใน (ระหว่างซิงค์ออกไซด์กับแก้ว) และด้านนอก (สัมผัสอากาศ) ในส่วนแรกจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งผ่านระหว่างอุปกรณ์ที่มีค่าความหนาของอิเล็กโทรดด้านในเท่ากับ 0.1 ไมโครเมตร กับอุปกรณ์ที่เพิ่มความหนาอิเล็กโทรดเป็น 0.9 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นว่าจุดกึ่งกลางของค่าความยาวคลื่นแบร์ริจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีค่าลดลงคือจากเดิม 1556 นาโนเมตร ไปเป็น 1555.5 นาโนเมตร (Figure 3a) ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาอิเล็กโทรดด้านนอก จะพบว่าความหนาของอิเล็กโทรดด้านนอก จะมีอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงจุดกึ่งกลางความยาวคลื่นแบร์ริมากกว่า โดยค่าความยาวคลื่นแบร์ริจะลดลงจากเดิมประมาณ 2.4

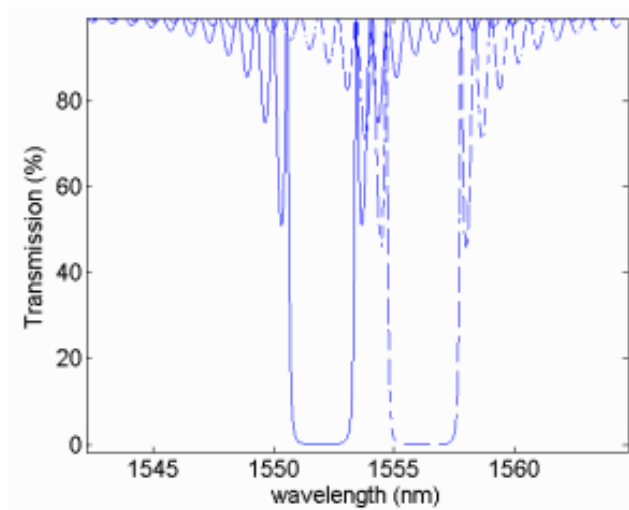
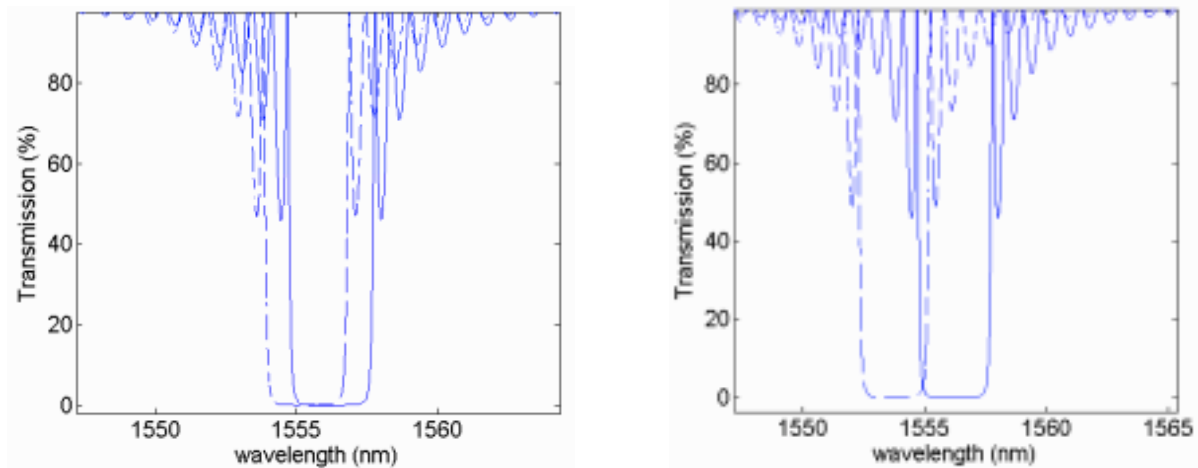


Figure 2. Transmission coupling efficiency of the fiber Bragg grating transducer alone (solid line) and when applied by an electric field (dot line).



(a) when varying the thickness of inner electrode (b) when varying the thickness of outer electrode

Figure 3. Transmission coupling efficiency when the thickness of outer electrode is 0.1 micrometre (solid line) compared with that of 0.9 micrometre (dot line).

นาโนเมตร เป็น 1553.6 นาโนเมตร (Figure 3b)

การเปลี่ยนแปลงจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริกในลักษณะค่อยๆ ลดลง เมื่อความหนาของอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.1-0.9 ไมโครเมตร (Figure 4) จะเห็นว่าค่าความหนาของอิเล็กโทรดด้านนอกมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์ริกมากกว่า เมื่อความหนาอิเล็กโทรดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิเล็กโทรดด้านนอกสัมผัสกับอากาศ ทำให้มีพฤติกรรม

เป็นผนังที่คลื่นสะท้อนกลับเข้ามาสู่คอร์ของเส้นใยแก้ว อย่างไรก็ตามหากค่าความหนาของอิเล็กโทรดมีค่ามากกว่าที่ได้แสดงไว้ในกราฟ อิเล็กโทรดจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นโหลด (load) (Rosenbaum, 1988) ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ในลักษณะที่ต่างออกไป ในทางปฏิบัติค่าความหนาของอิเล็กโทรด จะคงไว้ที่ค่าน้อยๆ (ประมาณ 0.1 ไมโครเมตร) จนเสมือนไม่มีผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์เลย

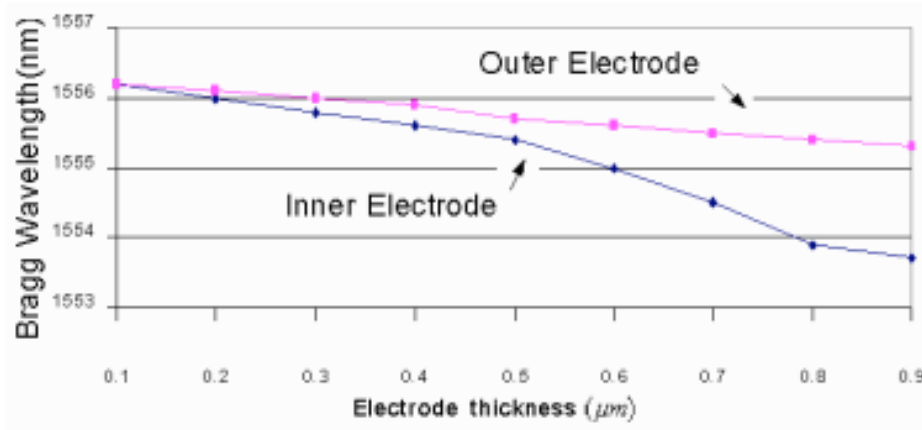


Figure 4. Bragg wavelength as a function of inner and outer electrode thickness.

2.2 ผลของความหนาของซิงค์ออกไซด์

ในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าความหนาของฟิโธอิเล็กทริกซิงค์ออกไซด์ ได้ทำการจำลองระบบเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ที่มีความหนาของซิงค์ออกไซด์เป็น 2 กับ 4 ไมโครเมตร พบว่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.7 ไมโครเมตร เมื่อความหนาของซิงค์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว โดยรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์ริกในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงย่อยๆ ครึ่งละ 500

นาโนเมตร (Figure 5) จะพบว่าค่าความยาวคลื่นแบร์ริกที่เปลี่ยนแปลงไป จะค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากสัมประสิทธิ์การคัปปลิงพลังงานมีค่ามากขึ้น (Roeksabutr and Chu, 1997 และ Roeksabutr and Chu, 1998) แต่เมื่อความหนาของซิงค์ออกไซด์มีค่ามากกว่า 4 ไมโครเมตร (Figure 6) การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์ริกจะมีลักษณะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเรโซเนเตอร์ (resonator) เปลี่ยนแปลง

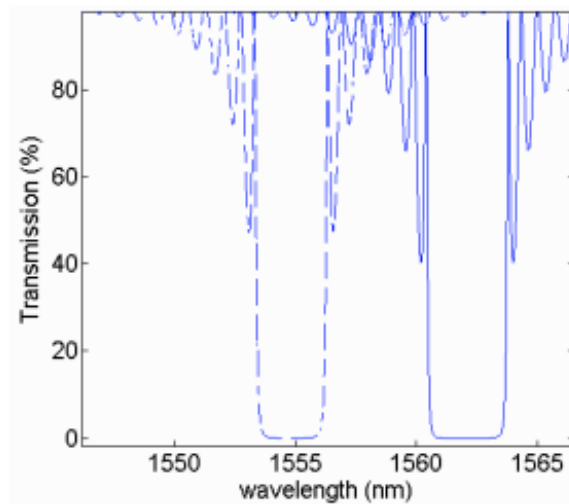


Figure 5. Transmission efficiency when the thickness of zinc oxide are 2 micrometre (dot line) and 4 micrometre (solid line).

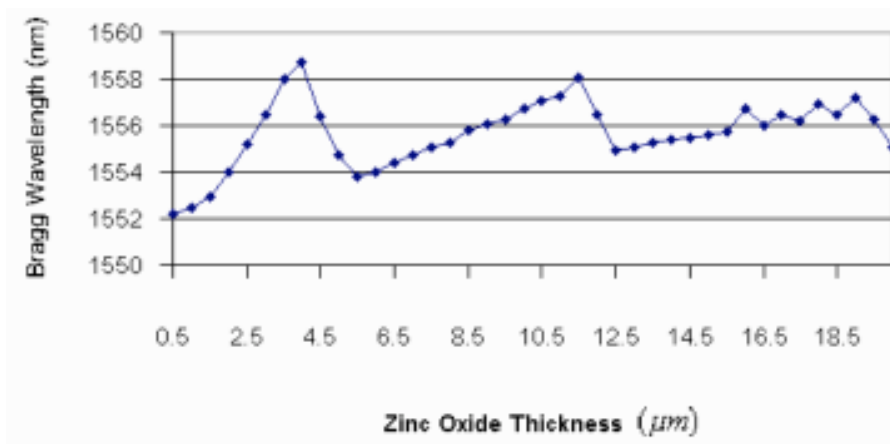


Figure 6. Bragg wavelength as a function of zinc oxide thickness between 0.5 to 20 micrometre.

จนทำให้ไม่สัมพันธ์กับพจน์ที่แสดงเงื่อนไขของการเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) $q\lambda_d/2$ เมื่อ q เป็นเลขจำนวนนับ และ λ_d เป็นความยาวคลื่นเสียงที่ผลิตโดยซิงค์ออกไซด์ (Roeksabutr, 1998) อันเป็นการส่งผลให้ค่าการคับปลิงพลังงานของทรานสดิวเซอร์ลดลง ความยาวคลื่นแบร์ริกจึงเปลี่ยนแปลงไปในอัตราที่ลดลงด้วย และเมื่อความหนาของซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนแปลงไปจนทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเรโซเนเตอร์สัมพันธ์กับเทอมที่เป็นจำนวนเท่าของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียง ค่าการคับปลิงพลังงานก็จะเพิ่มขึ้นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาตามค่าความหนาของซิงค์ออกไซด์

2.3 ผลของความยาวของตัวทรานสดิวเซอร์

จากการจำลองด้วยการเปลี่ยนค่าความยาวของตัวทรานสดิวเซอร์ให้มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 2 มม. - 50 มม. ซึ่งเป็นความยาวของเกรตติงที่เป็นไปได้ จะได้ผลลัพธ์ที่แสดงการเลื่อนจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่น แบร์ริกลดลงจาก 1556.5 นาโนเมตร เป็น 1552.25 นาโนเมตร โดยรายละเอียดเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความยาวของตัวทรานสดิวเซอร์จากเดิม 2 มม. ให้เพิ่มขึ้นจนถึงความยาว 50 มม. จะเห็นว่าจุดกึ่งกลางของค่าความยาวคลื่นแบร์ริกเกิดการเลื่อนไปในลักษณะลดลงจาก 1556 นาโนเมตร เป็น 1552.25 นาโนเมตร (Figure 7)

การเปลี่ยนแปลงของค่าความยาวคลื่นแบร์ริกเมื่อทรานสดิวเซอร์มีความยาวเท่ากับ 2-50 มม. (Figure 8) จะพบว่าความยาวคลื่นแบร์ริกมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวของทรานสดิวเซอร์ โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากเมื่อความยาวทรานสดิวเซอร์มีค่าน้อย และอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะค่อยๆ มีค่าลดลง เมื่อทรานสดิวเซอร์เริ่มมีความยาวเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มความยาวทรานสดิวเซอร์เป็นการเพิ่มพื้นที่การแพร่กระจายคลื่นเสียง ซึ่งเมื่อเทียบกับขนาดของอุปกรณ์และค่ากำลังงานเสียงที่ใช้ ในช่วงไม่เกิน 15 dBm (เพราะถ้ามากกว่านั้นทรานสดิวเซอร์จะเสียหาย) จะทำให้ประสิทธิภาพการคับปลิงพลังงานลดลง ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์ริกลดลงด้วย อนึ่ง การเพิ่มความยาวทรานสดิวเซอร์จะไม่มีผลต่อการสูญเสียสัญญาณคลื่นเสียง เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเรโซเนเตอร์ยังคงมีค่าเท่าเดิมตามขนาดรัศมีของเส้นใยแก้ว

2.4 ผลของรัศมีของเส้นใยแก้ว

ในการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากขนาดเส้นใยแก้ว จะพิจารณาในเทอมของขนาดรัศมีของเส้นใยแก้วเกรตติง จากการจำลองด้วยการเปลี่ยนค่ารัศมีของเส้นใยแก้วให้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40 ไมโครเมตร เป็น 62.5 ไมโครเมตร (ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในระบบสื่อสารโทรคมนาคม)

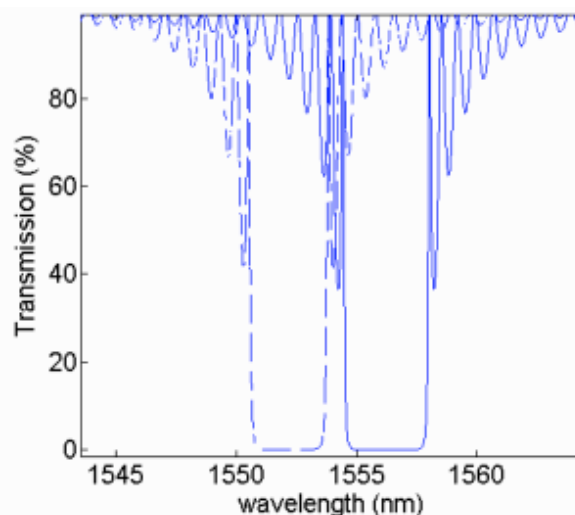


Figure 7. Transmission efficiency when the transducer length is 2 mm (solid line) and 50 mm (dot line).

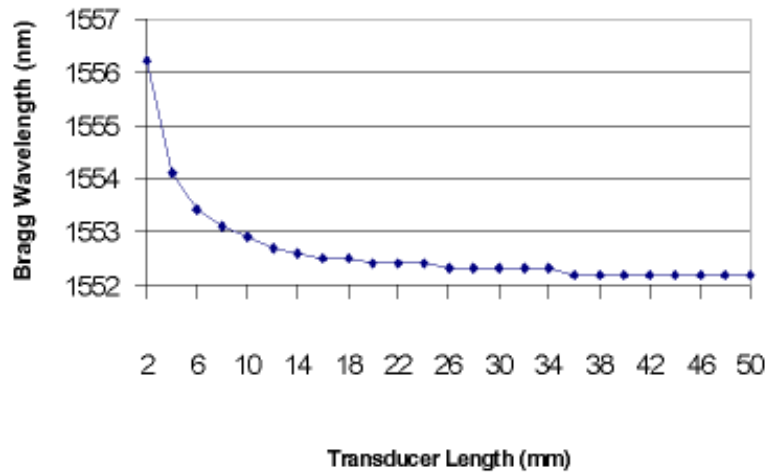


Figure 8. Bragg wavelength as a function of transducer length between 2 to 50 millimeter.

จะได้ผลลัพธ์ที่แสดงการเลื่อนจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริกลดลงจาก 1557.25 นาโนเมตร เป็น 1554.75 นาโนเมตร (Figure 9) โดยรายละเอียดเมื่อทำการเปลี่ยนค่ารัศมีของเส้นใยแก้วจากเดิม 40 ไมโครเมตร ให้เพิ่มขึ้นจนถึงรัศมี 62.5 ไมโครเมตร จะเห็นว่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริกเกิดการเลื่อนในลักษณะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามค่ารัศมีของเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้น จากเดิม 1556 นาโนเมตร ไปเป็น 1554.75 นาโนเมตร (Figure 10) ทั้งนี้

เนื่องจากเมื่อเส้นใยแก้วมีขนาดใหญ่ขึ้น โอกาสที่พลังงานเสียงจะถูกลดทอนลงตามระยะทางก็จะมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานรวมในส่วนของคอร์มีค่าลดลง ทำให้ค่าความยาวคลื่นแบร์ริกลดลงไปด้วย

2.5 ผลของมุมที่เคลือบซิงค์ออกไซด์

จากการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ด้วยการเปลี่ยนค่ามุมที่เคลือบซิงค์ออกไซด์ให้มามีค่าลดลงจาก 360° ซึ่งหมายถึงการเคลือบซิงค์ออกไซด์โดยรอบเส้นใยแก้ว กับ

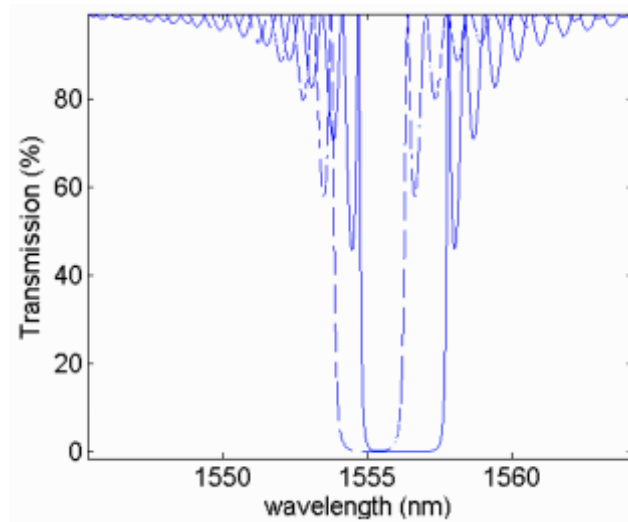


Figure 9. Transmission efficiency when the fiber radius is 50 micrometre (solid line) compared to 62.5 micrometre (dot line).

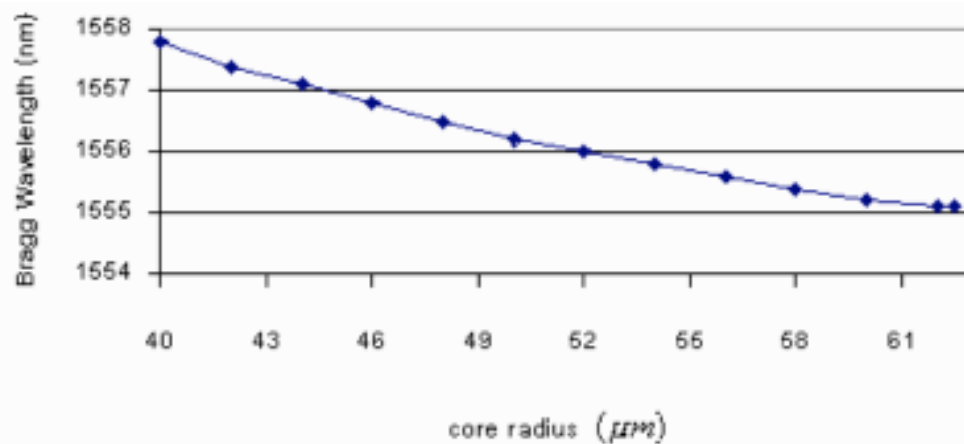


Figure 10. Bragg wavelength as a function of fiber size in terms of fiber radius between 40 to 62.5 micrometre.

การเคลือบผิวเส้นใยแก้วด้วยซิงค์ออกไซด์เป็นบางส่วน โดยส่วนกระจายพลังงานทำมุมกับจุดศูนย์กลางเส้นใยแก้วเป็น 60° หรือ $\pi/3$ จะได้ผลลัพธ์ที่แสดงการเลื่อนจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริ่งเพิ่มขึ้นจาก 1556 นาโนเมตร เป็น 1560 นาโนเมตร (Figure 11)

โดยรายละเอียดเมื่อทำการเปลี่ยนค่ามุมที่เคลือบซิงค์ออกไซด์จากเดิม ให้เพิ่มขึ้นจาก 0° จนถึง 360° (โดยรอบ) (Figure 12) จะเห็นว่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริ่งเกิดการเลื่อนไปเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามค่าของมุมที่ทำการเคลือบซิงค์ออกไซด์ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์ริ่งจะมีค่ามากที่สุดที่ค่ามุมประมาณ 90° หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะลดลงแต่ไม่มาก เนื่องจากโครงสร้างทรงกระบอกของเส้นใยแก้ว ช่วยในการรวบรวมพลังงานเสียงให้มาอยู่ในแนวแกนกลางซึ่งเป็นส่วนของคอร์พอดี้

2.6 ผลของกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์

ในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวอุปกรณ์เป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานตามที่ต้องการ จากการจำลองระบบด้วยการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานไฟฟ้า จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์ริ่งในช่วงที่กว้างกว่าเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของอุปกรณ์ (Figure 13) แสดงค่าความยาวคลื่นแบร์ริ่งที่ 1556 นาโนเมตร (เส้น

ทึบ) เมื่อป้อนกำลังงานไฟฟ้าขนาด 15 dBm ให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ เปรียบเทียบกับเมื่อทำการป้อนกำลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 30 dBm ซึ่งจะเห็นว่าจุดกึ่งกลางของความยาวคลื่นแบร์ริ่งมีค่าเพิ่มขึ้นมากเป็น 1573 นาโนเมตร

เมื่อทำการพิจารณาโดยละเอียด ศึกษาผลลัพธ์ที่ได้ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงกำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ในช่วงระหว่าง 0-30 dBm จะพบว่าค่าความยาวคลื่นแบร์ริ่งมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะแปรผันตรงเป็นเชิงเส้นกับค่าการณธ์ที่สอง (square root) ของค่ากำลังงานไฟฟ้าในเทอมของวัตต์ (Figure 14) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำงานของอุปกรณ์ตามสมการที่ (5) แม้ว่าค่าความหนาของซิงค์ออกไซด์จะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม โดยประสิทธิภาพในการเลื่อนความยาวคลื่นแบร์ริ่งของอุปกรณ์ที่เคลือบซิงค์ออกไซด์หนา 2.45 ไมโครเมตร คือ $0.65 \text{ nm}/\sqrt{\text{mW}}$ หรือ $3.25 \text{ nm}/\sqrt{\text{mW}}/\text{ซม.}$ (เทียบกับความยาวเรโซเนเตอร์ด้วย) ในทำนองเดียวกันเมื่อเปลี่ยนค่าความหนาของทรานสดิวเซอร์เป็น 3 ไมโครเมตร และ 4 ไมโครเมตร จะได้ค่าประสิทธิภาพของการเลื่อนความยาวคลื่นแบร์ริ่งเป็น $0.98 \text{ nm}/\sqrt{\text{mW}}$ หรือ $4.9 \text{ nm}/\sqrt{\text{mW}}/\text{ซม.}$ และ $1.6 \text{ nm}/\sqrt{\text{mW}}$ หรือ $8 \text{ nm}/\sqrt{\text{mW}}/\text{ซม.}$ ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์และสรุปผลการจำลอง

จากผลลัพธ์ที่ได้ในการจำลองการทำงานของเส้นใยแก้วเรดดิ้งที่ถูกเคลือบด้วยทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงที่ใช้

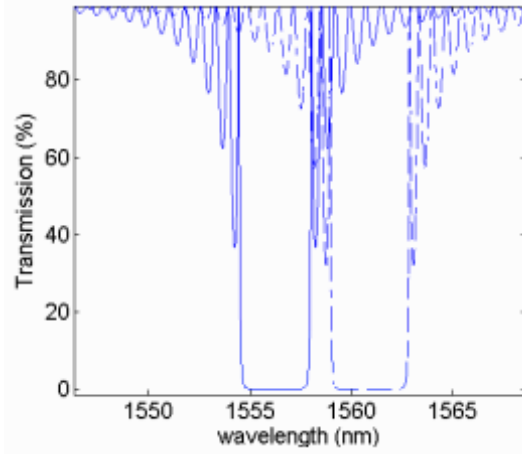


Figure 11. Transmission efficiency when the angular of zinc oxide coated is 360 degree (solid line) compared to 60 degree (dot line).

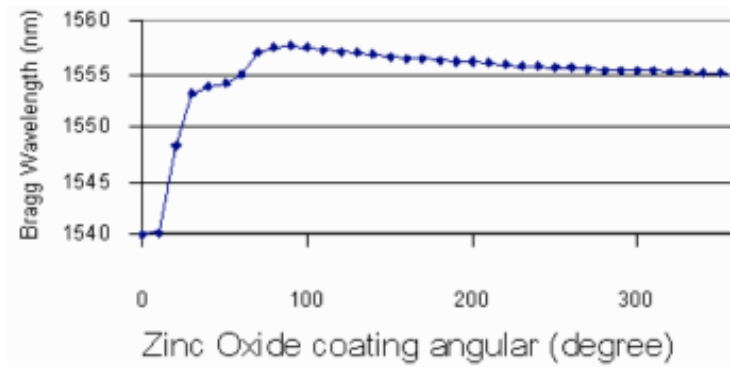


Figure 12. Transmission efficiency as a function of zinc oxide coating angular between 0 to 360 degree (10-degree step).

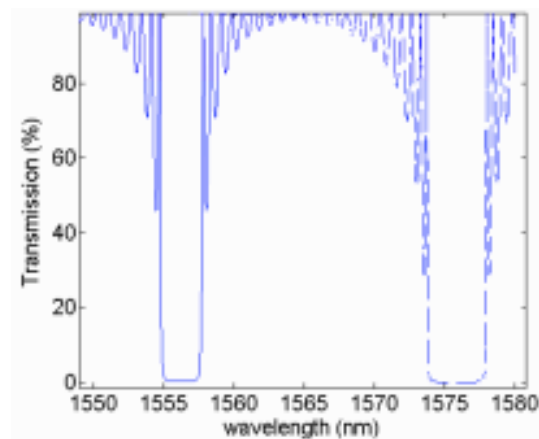


Figure 13. Transmission efficiency when applying the electrical power to the transducer of 15 dBm (solid line) and 30 dBm (dot line).

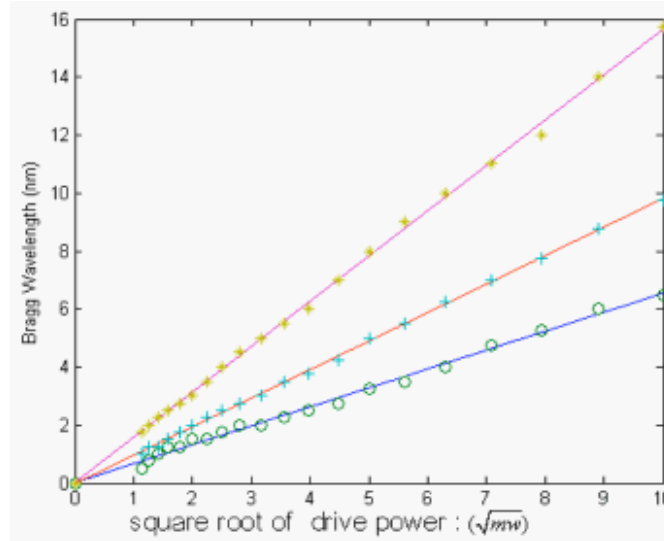


Figure 14. The relationship between Bragg wavelength and an electrical power applied to the transducer when the thickness of zinc oxide is 2.45 micrometre (o), 3 micrometre (+), and 4 micrometre (*).

สารพีซีอีเล็กทริกเป็นซิงค์ออกไซด์ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆทั้งในส่วนที่เป็นโครงสร้างทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาของอีเล็กโตรดออลูมิเนียมทั้งด้านในและด้านนอก ค่าความหนาของพีซีอีเล็กทริกซิงค์ออกไซด์ ค่าความยาวของทรานสดิวเซอร์ ขนาดของเส้นใยแก้วในเทอมของคาร์ซีมี ค่าของมุมในการเคลือบซิงค์ออกไซด์ และส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างทางกายภาพ เช่น ค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ พบว่าไม่มีผลกระทบที่เห็นได้ชัดต่อคุณสมบัติการทำงานของเกรตติ้งเส้นใยแก้วที่เป็นค่าแบนด์วิดท์ในช่วงความยาวคลื่นแบร์ริก แต่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของเกรตติ้งเส้นใยแก้วในลักษณะที่ทำให้จุดกึ่งกลางของค่าความยาวคลื่นแบร์ริกเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทั้งที่เป็นไปในลักษณะของการเพิ่มขึ้นและลดลง ดังสรุปได้ดังนี้

3.1 การเพิ่มความหนาของอีเล็กโตรด มีผลทำให้ค่าความยาวคลื่นแบร์ริกมีค่าลดลง โดยอีเล็กโตรดด้านนอกจะมีอิทธิพลมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอีเล็กโตรดด้านนอกสัมผัสกับอากาศโดยตรง และถือเป็นขอบด้านนอกของเรโซเนเตอร์ (หรือส่วนที่ทำให้คลื่นอะคูสติกส์ในแนวตัดขวางเกิดเรโซแนนต์) ดังนั้นคลื่นอะคูสติกส์ที่เดินทางในทิศทางพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางจะสะท้อนกลับทันทีที่

ผนังอีเล็กโตรดด้านนอกนี้ ในขณะที่อีเล็กโตรดด้านในมีพฤติกรรมเสมือนเป็นทางผ่านของคลื่นเสียงที่เดินทางเข้าหาและพุ่งออกจากจุดศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว

3.2 ความหนาของซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าความยาวคลื่นแบร์ริกเพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะกลับไปกลับมา เนื่องจากความหนาของซิงค์ออกไซด์มีผลทำให้ขนาดของเรโซเนเตอร์เปลี่ยนแปลงไป และถ้าขนาดของเรโซเนเตอร์สัมพันธ์กับจำนวนเท่าของค่ากึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียง จะทำให้การเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแบร์ริกมีค่ามาก เนื่องจากคลื่นจะเกิดเรโซแนนต์ทำให้มีพลังงานมากที่สุด

3.3 ในส่วนที่เกี่ยวกับขนาดของมุมที่เคลือบซิงค์ออกไซด์ การเคลือบซิงค์ออกไซด์เพียงบางส่วนจะทำให้ประสิทธิภาพการคับปลิงกำลังงานระหว่างกำลังงานไฟฟ้าไปเป็นกำลังงานทางอะคูสติกส์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ในการกระจายพลังงานกลมีค่าลดลงในขณะที่กำลังงานทางไฟฟ้ามีค่าเท่าเดิม ประกอบกับโครงสร้างของเส้นใยแก้วเองที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำให้พลังงานกลที่เกิดขึ้นถูกรวบรวมไว้ที่จุดศูนย์กลางโดยธรรมชาติ ทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของเกรตติ้งมีค่ามากขึ้น ตามประสิทธิภาพการคับปลิงกำลังงานที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

3.4 เมื่อทรานสดิวเซอร์มีความยาวเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นแบร์รี่ที่มากขึ้นตามด้วย เนื่องจากช่วงระยะที่ค่าดัชนีหักเหของเรตติ้งเกิดการเปลี่ยนแปลงจากปรากฏการณ์โฟโตอิลาสติกมีมากขึ้น ทั้งนี้ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นแบร์รี่จะมีค่ามากขึ้นเมื่อทรานสดิวเซอร์มีขนาดความยาวน้อยๆ และอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะค่อยๆ มีค่าลดลง เมื่อทรานสดิวเซอร์เริ่มมีความยาวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความยาวของทรานสดิวเซอร์ เป็นการเพิ่มพื้นที่การกระจายพลังงานเชิงกล ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการคับปลิงกำลังงานมีค่าลดลงนั่นเอง

3.5 เมื่อพิจารณาสมการที่ (5) จะได้ว่า การเพิ่มค่ากำลังงานทางไฟฟ้ามีผลโดยตรงที่ทำให้ค่าความยาวคลื่นแบร์รี่มีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกับค่าครนซ์ของกำลังงานในทอมของวัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากการกำลังงานทางอะคูสติกส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่มีความสอดคล้องกับทฤษฎีโดยสมบูรณ์ โดยเฉพาะเมื่อความหนาของชั้นพีโซอิเล็กทริกซิงค์ออกไซด์มีค่าน้อยๆ ซึ่งประเด็นนี้น่าจะเป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการขยายงานวิจัยต่อไปในอนาคต

บทสรุป

บทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์การทำงานของเส้นใยแก้วเรตติ้งที่ถูกเคลือบด้วยทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงที่ใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารพีโซอิเล็กทริก โดยการศึกษาเชิงสำรวจค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความเข้มแสงตามฟังก์ชันของค่าความยาวคลื่นแสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแก้วเรตติ้งเมื่อโครงสร้างทางกายภาพของอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงไป รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวอุปกรณ์ โดยนำทฤษฎีที่เคยเสนอไว้ก่อนหน้านั้นมาขยายผล ผลลัพธ์ที่ได้ในส่วนที่เป็นผลกระทบจากโครงสร้างทางกายภาพ จะมีประโยชน์ในการพิจารณาออกแบบอุปกรณ์

สำหรับนำไปใช้ในระบบสื่อสาร เช่น อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์ที่สามารถปรับจูนความถี่ได้ (tunable demultiplexer) ตัวล็อกความยาวคลื่นแสง (optical wavelength locker) เป็นต้น ในขณะที่เดียวกัน ผลกระทบจากค่ากำลังงานทางไฟฟ้า จะมีส่วนในการกำหนดเงื่อนไขการทำงานในทางปฏิบัติเมื่อนำอุปกรณ์ไปใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- Fox, G.R., Muller, C.A.P., Setter, N., Constantini, D.M., Ky, N.H. and Limberger, H.G. 1997. Wavelength tunable fiber Bragg grating devices based on sputter deposited resistive and piezoelectric coatings, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 15(3): 1791-1795.
- Kashyap, R. 1999. *Fiber Bragg Gratings*, Proceedings of the ACADEMIC PRESS: 119-145.
- Roeksabutr, A., and Chu, P.L. 1998. Design of high-frequency ZnO-coated optical fiber acousto-optic phase modulators, *IEEE J. of Lightwave Technol.*, 16(7), July: 1203-1211.
- Roeksabutr, A., and Chu, P.L., 1997. Broadband frequency response of a ZnO coated fiber phase modulator, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 9(5): 613-615.
- Roeksabutr, A., Phromluangsri, R., and Chu, P.L., 2000. Fabrication of high efficiency ZnO-coated fiber using sputter without heat treatment, *Proc. 6th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2000)*, Seoul, Korea, 30 Oct - 2 Nov 2000: 218-221.
- Roeksabutr, A., and Pornparnich, W., 2002. Theory of acousto-optic fiber Bragg grating coated with zinc oxide (ZnO), *Proc. IEEE/LEOS Annual Meeting, Glasgow, Scotland, Nov. 10-14, 2002*: 821-822.
- Rosenbaum, J.F. 1988. *Bulk acoustic wave theory and devices*, Artech House, London.