



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการเรื่อง การออกแบบและสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบน
เส้นใยแก้วสำหรับมอดูเลเตอร์ทางเฟสของแสง

**Design and Fabrication of High Frequency Fiber Transducer for
Optical Phase Modulator**

โดย อธิคม ฤกษ์บุตร และคณะ

พฤศจิกายน 2543

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การออกแบบและสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใย
แก้วสำหรับมอดูเลเตอร์ทางเฟสของแสง

Design and Fabrication of High Frequency Fiber Transducer for
Optical Phase Modulator

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิคม ฤกษ์บุตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 2. นายระวี พรหมหลวงศรี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 3. Professor Pak L. Chu | University of New South Wales |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

ทีมงานวิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนตลอดโครงการวิจัย ในโครงการทุนวิจัยหลังปริญญาเอก ขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมโทรคมนาคม และศูนย์วิจัยวัสดุประยุกต์และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือวัดที่จำเป็น ขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง XRD และที่สำคัญ ผู้ร่วมงานทุกท่าน โดยเฉพาะ อาจารย์ระวี พรหมหลวงศรี ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยจนประสบผลสำเร็จด้วยดี

บทคัดย่อ

สัญญาเลขที่ PDF/39/2541

ชื่อโครงการ การออกแบบและสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วสำหรับมอดูเลเตอร์ทางเฟสของแสง

คณะผู้วิจัย 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิคม ฤกษ์บุตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

E-mail: athikom@mut.ac.th)

2. นายระวี พรหมหลวงศรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

3. Professor Pak L. Chu, University of New South Wales

ระยะเวลาดำเนินการ 1 กรกฎาคม 2541 – 30 มิถุนายน 2543 (ขยายเวลาถึง 31 ตุลาคม 2543)

โครงการนี้ ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วที่ทำงานด้วยหลักการทางอะคูสติกส์ สำหรับมอดูเลเตอร์ทางเฟสของแสง ทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลองปฏิบัติ โดยจะเน้นในส่วนของการทดลองปฏิบัติ เพื่อให้สามารถผลิตทรานสดิวเซอร์ ที่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ไมโครเวฟ ตั้งแต่หลายร้อยเมกกะเฮิรตซ์จนถึงช่วงของกิกะเฮิรตซ์ โดยการดัดแปลงระบบสปีดเดอริงชนิดระนาบแมกนีตรอน ซึ่งมีอยู่เพียงเครื่องเดียวให้สามารถใช้เคลือบฟิล์มบางของอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์บนผิวเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวได้ ในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมสำหรับชั้นอิเล็กโทรด จะสนใจที่ความหนาของชั้นฟิล์มน้อยกว่า 2 ไมครอน ลงมา เพื่อลดปัญหาการไหลดัดสัญญาณ ในขณะที่ฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าความถี่ทำงานของสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ จะมีความหนาประมาณ 2-5 ไมครอน ที่ผ่านมามีการวิจัยเกี่ยวกับการเคลือบชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์มาอย่างกว้างขวาง รายละเอียดของกระบวนการและการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในขณะทำการสปีดเดอริง จะขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบรวมทั้งการใช้เทคนิคพิเศษบางประการสำหรับงานแต่ละงาน เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีคุณสมบัติตามต้องการ โดยเฉพาะคุณสมบัติความเป็นสารเปียกซิงค์ออกไซด์ โครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเคลือบฟิล์มต่างๆ ในสภาวะที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม เช่น อัตราส่วนของก๊าซผสมใน 챔เบอร์ แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบ ผลของอุณหภูมิและปริมาณก๊าซต่อชิ้นงาน เป็นต้น จากการทดลองกับชิ้นงานประมาณ 1000 ชิ้น พบว่า การเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมสำเร็จลุล่วงด้วยดี ภายใต้แรงดันบรรยากาศ 20 มิลลิทอร์รี่ ด้วยการป้อนแรงดัน -350 โวลต์ และกระแส 135 มิลลิแอมป์ ในขณะที่การเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีความไม่แน่นอนในความสำเร็จสูง แต่ก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ โดยการปรับอัตราส่วนการผสมของก๊าซอาร์กอนและออกซิเจนเป็น 80% ต่อ 20% ภายใต้แรงดันบรรยากาศประมาณ 32-34 มิลลิทอร์รี่ แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นเป้าหมายมีค่า -520 โวลต์ และ 135 มิลลิแอมป์ ทรานสดิวเซอร์ที่ได้มีค่าความพรัวของ S11 สูงกว่า 5 dB ซึ่งมากกว่าค่าที่เคยรายงานมา

คำสำคัญ : เส้นใยแก้ว, ทรานสดิวเซอร์เส้นใยแก้ว, ซิงค์ออกไซด์, สปีดเดอริง, ไมโครเวฟ

Abstract

Project Code: PDF/39/2541

Project Title: Design and Fabrication of High Frequency Fiber Transducer for Optical Phase Modulator

Investigators: 1. Assistant Professor Dr. Athikom Roeksabutr, Mahanakorn University of Technology, E-mail: athikom@mut.ac.th
2. Mr. Ravee Phromluangsri, Mahanakorn University of Technology
3. Professor Pak L. Chu, University of New South Wales

Project Period: 1 July 1998 – 30 June 2000 (extended to 31 October 2000)

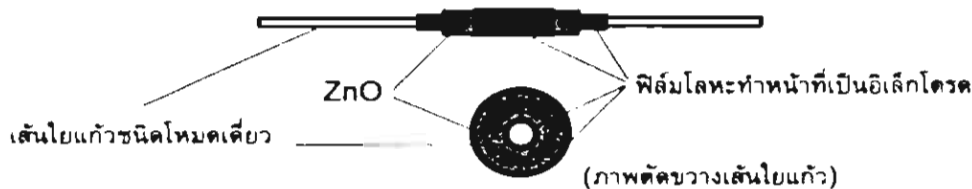
This research project studies the fabrication and design of a high frequency optical fiber acousto-optic transducer for optical phase modulation in both theory and experiment. The experiment is mainly focused to fabricate the transducer operating at microwave frequencies from a few hundred Megahertz up to Gigahertz region. A magnetron planar sputtering system is modified for coating aluminum and zinc oxide (ZnO) films onto the surface of a single mode fiber. The thickness of thin film aluminum for electrode layers should be less than 2 micron for the reduction of loading effect, whereas thin film ZnO, which defines modulating frequency, of 2-5 micron is of interest. Although deposition of aluminum and ZnO films using sputtering has been extensively investigated, only routine processes are normally followed with additional special techniques for particular applications to achieve good quality of film especially ZnO. This project has investigated various parameters of sputtering to obtain the appropriate condition such as gas mixture in the chamber, voltage and current supplied to the system, the effect of temperature and gas to the device, etc. From the experiment of over 1000 samples, we found that coating aluminum film is successful under the background pressure of 20 mTorr with supplying voltage of -350 volt and current of 135 mA. Coating ZnO film is not reliable but the appropriate parameters should be: mixture ratio of argon and oxygen is 80% to 20%, sputtering pressure of 32-34 mTorr, voltage and current supplied to the target are -520 volt and 135 mA. The transducer fabricated has the ripple of S11 more than 5dB, more than ever reported so far.

Keywords : optical fiber, fiber transducer, zinc oxide, sputtering, microwave

1. บทนำ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วสำหรับมอดูเลเตอร์ทางแสง กำลังเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลองปฏิบัติ เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้หลายด้าน ไม่เพียงแต่อุปกรณ์ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ประเภทตรวจจับหรือเซ็นเซอร์ (sensor) และการประมวลสัญญาณทางแสง (optical signal processing) เป็นต้น

โดยปรกติ คลื่นเสียง (acoustic waves) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นกล (mechanical waves) ที่มีความถี่สูง ดังเช่นในย่านความถี่คลื่นไมโครเวฟ ไม่สามารถเดินทางตามแนวเส้นใยแก้วได้เป็นระยะทางไกล หรือแม้แต่ในช่วงระยะทางสั้นๆ ได้ดีนัก เนื่องจากคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง จะมีค่าการลดทอนสัญญาณสูงมาก [1] ดังนั้น การส่งสัญญาณเสียงเข้าสู่เส้นใยแก้ว จึงมักให้ความสนใจในแนวภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วแทน [2] ในการผลิตสัญญาณเสียงให้เดินทางในเส้นใยแก้ว จะต้องสร้างทรานสดิวเซอร์ที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกบนผิวของเส้นใยแก้ว โดยทั่วไป ในการป้อนเสียงความถี่สูงตั้งแต่หลายร้อยเมกะเฮิร์ตขึ้นไป มักจะทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์หรือ ZnO (Zinc Oxide) โดยรอบเส้นใยแก้ว เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริก โดยมีชั้นฟิล์มของโลหะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว

ลักษณะของโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว ที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ มีประโยชน์ในการมอดูเลตแบบภายนอก (external Modulation) ที่กระทำกับสัญญาณแสงโดยตรง โดยเฉพาะสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว การมอดูเลตเฟสของสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว อาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของคอร์ (core) ที่เกิดจากการเดินทางของคลื่นเสียง (acoustic waves) หรือคลื่นกล (mechanic waves) ความถี่สูง ภายในเส้นใยแก้ว ซึ่งการสร้างคลื่นเสียงให้เดินทางภายในเส้นใยแก้ว จะเกิดจากการทำงานของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกผลิตคลื่นออกมา จากสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปยังอิเล็กโทรดที่ติดกับผนังทั้งสองด้านของสารเปียโซอิเล็กทริก ในการทำงานที่ความถี่สูงหลายร้อยเมกะเฮิร์ตซ์ มักใช้สารเปียโซอิเล็กทริกที่เป็นซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide: ZnO) ทำเป็นแผ่นฟิล์มบางประมาณ 2-8 ไมครอน เคลือบอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยแก้ว การที่ซิงค์ออกไซด์เป็นที่นิยม ก็เพราะว่า (1) ซิงค์ออกไซด์สามารถผลิตคลื่นที่มีความถี่สูงย่านไมโครเวฟตั้งแต่หลายร้อยเมกะเฮิร์ตซ์จนถึงย่านกิกะเฮิร์ตซ์ได้ [3,4] (2) ซิงค์ออกไซด์มีค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงพลังงานระหว่างเชิงไฟฟ้าและเชิงกล (electromechanical coupling efficiency: k_t) สูง ($k_t = 0.529$) และ (3) ซิงค์ออกไซด์สามารถเคลือบบนผิวของเส้นใยแก้วได้ด้วยเทคนิคของการสปัตเตอริง (sputtering) ซึ่งเทคนิคสปัตเตอริงนี้จะทำให้การเรียงตัวของผลึกซิงค์ออกไซด์มีแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของเส้นใยแก้ว ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติของการเป็นสารเปียโซอิเล็กทริกได้ดี อย่างไรก็ตาม ในการเคลือบซิงค์ออกไซด์ให้มีคุณสมบัติของเปียโซอิเล็กทริกที่ดีตามต้องการ จำเป็นต้องอาศัยการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ในการสปัตเตอริงที่เหมาะสม ตามชนิด ขนาด และสภาพแวดล้อมของเครื่องมือที่ใช้ [5,6] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จะมุ่งศึกษา พัฒนา ออกแบบ และสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วโดยการเคลือบซิงค์ออกไซด์ให้ได้ ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีของตนเอง เพื่อจะได้นำอุปกรณ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นมอดูเลเตอร์ทางแสง เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆ ทางแสงต่อไปในอนาคต

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในเชิงทฤษฎี เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานของอุปกรณ์ที่เป็นทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วนี้ กับระบบอุปกรณ์ Optical Fiber Frequency Decoder (OFD)

2. ทฤษฎีการทำงานและการประยุกต์ใช้งาน

2.1 ทฤษฎีของทรานสดิวเซอร์

โครงสร้างทางเรขาคณิตของทรานสดิวเซอร์บนเส้นใยแก้วดังแสดงในรูปที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกระบอก ซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์มบางของสารเปียโซอิเล็กทริกที่เป็น ZnO ห่อหุ้มเส้นใยแก้วอยู่โดยรอบ และมีชั้นฟิล์มบางของโลหะอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นชั้นของอิเล็กโตรดรวมอยู่ด้วย โดยปกติความหนาของชั้นฟิล์มโลหะจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความหนาของสารเปียโซอิเล็กทริก ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดสภาพการเป็นโวลต์ร่วมกับตัวทรานสดิวเซอร์เอง เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของทรานสดิวเซอร์จะเห็นว่า ชั้นฟิล์มแต่ละชั้นมีโครงสร้างเป็นลักษณะวงแหวนอันเนื่องมาจากโครงสร้างทรงกระบอกของอุปกรณ์ หากพิจารณาเฉพาะส่วนของวงแหวนที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริก สมการที่แสดงค่าการขจัดของอนุภาคที่เคลื่อนที่ u เป็นระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลาง(แกนกลางเส้นใยแก้ว) ด้วยรัศมี r ในแนวของรัศมี จะอยู่ในเทอมของฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ที่มีอาร์กิวเมนต์เป็น $k_a r$ โดยที่ k_a เป็นค่าตัวเลขคลื่น (wave number) แต่เนื่องจากตามโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ที่กำลังพิจารณา จะพบว่า $k_a \gg 1$ ดังนั้น สมการของการขจัดจึงสามารถแสดงได้ในรูปของสมการเอกซ์โปเนนเชียล [7] ดังนี้

$$u(r) = \left(\frac{a}{\sqrt{r}} e^{-jk_a r} + \frac{b}{\sqrt{r}} e^{jk_a r} \right) e^{j\omega t} \quad (1)$$

เมื่อ a และ b เป็นขนาดหรือแอมพลิจูดของคลื่นกลที่เดินทางเข้าสู่และพุ่งออกจากแกนกลางของเส้นใยแก้วตามลำดับ ω เป็นค่าของความเร็วเชิงมุม และ t เป็นตัวแปรเวลา ในขณะเดียวกัน ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ตรงบริเวณผนังด้านในของชั้นฟิล์ม (v_1) และในบริเวณผนังด้านนอกของชั้นฟิล์ม (v_2) จะมีค่าเป็น

$$v_1 = \frac{du_1}{dt} = \frac{j\omega}{\sqrt{r_1}} \left(a e^{-jk_a r_1} + b e^{jk_a r_1} \right) e^{j\omega t} \quad (2)$$

$$v_2 = \frac{du_2}{dt} = \frac{j\omega}{\sqrt{r_2}} \left(a e^{-jk_a r_2} + b e^{jk_a r_2} \right) e^{j\omega t} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และ (3) ค่าของ a และ b สามารถหาออกมาได้ในรูปของฟังก์ชัน $f(v_1, v_2, k_a, r_1, r_2)$

ค่าของแรงกระทำ F ต่อหน่วยพื้นที่ A ที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านของสารเปียโซอิเล็กทริก ก็คือค่าของความเค้น (stress) T ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนสนามไฟฟ้าคคร่อมชั้นฟิล์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับ [5]

$$= \frac{F}{A} = c \frac{\partial u}{\partial x} - e \frac{D}{\epsilon} \quad (4)$$

เมื่อ c , e และ ϵ เป็นค่าคงที่ความหนืด ค่าคงที่ความเค้น และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารเปียโซอิเล็กทริก ตามลำดับ D เป็นค่าการขจัดทางสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $I/j\omega A$ โดยที่ I เป็นค่ากระแสที่ป้อน A เป็นพื้นที่ที่มีการกระจายพลังงานของคลื่นในระยระรัศมี r มีค่าเท่ากับ $2\pi r l$ เมื่อ l เป็นความยาวของทรานสดิวเซอร์

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ $\partial u / \partial r$ โดยแทนค่าของ a และ b ที่หาได้ก่อนหน้านี้นี้ลงไป แล้วใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์แก้สมการ จะได้ค่าของแรงกระทำในแต่ละด้านของชั้นฟิล์ม (1=ด้านใน, 2=ด้านนอก) เป็น

$$F_1 = j\theta Z \left(\frac{r_1}{\tan(k_a d)} - \frac{1}{2k_a} \right) v_1 - \frac{j\theta Z \sqrt{r_1 r_2}}{\sin(k_a d)} v_2 + \frac{h}{j\omega} I$$

$$= Z_{11} v_1 + Z_{12} v_2 + \frac{h}{j\omega} I$$
(5)

$$F_2 = \frac{j\theta Z \sqrt{r_1 r_2}}{\sin(k_a d)} v_1 - j\theta Z \left(\frac{r_2}{\tan(k_a d)} - \frac{1}{2k_a} \right) v_2 + \frac{h}{j\omega} I$$

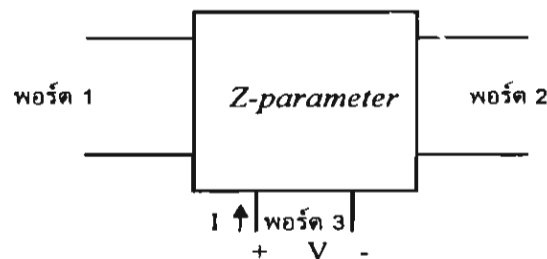
$$= Z_{21} v_1 + Z_{22} v_2 + \frac{h}{j\omega} I$$
(6)

เมื่อ $h=e/\epsilon$, $\theta=2\pi$, $d=r_2-r_1$ เป็นค่าความหนาของชั้นฟิล์ม และ $Z=ck_a/\omega$ เป็นค่าอิมพีแดนซ์เชิงกลของวัสดุ

การจัดของอนุภาค $u(r)$ เป็นผลจากแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่หรือความเค้นของวัสดุอันเนื่องมาจากผลของแรงดันไฟฟ้า V ที่ป้อนให้กับชั้นฟิล์มของสารเปียโซอิเล็กทริกโดยตรง ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กันดังสมการ $V=Dd/\epsilon-e(u(r_2)-u(r_1))$ หรือนั่นคือ

$$= \frac{h}{j\omega} (v_1 - v_2) + \frac{I}{j\omega C_o}$$
(7)

เมื่อ C_o เป็นค่าของคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสองของอิเล็กโตรดมีค่าเท่ากับ $C_o=\epsilon A/d$



รูปที่ 2 วงจรสามพอร์ตของสารเปียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างทรงกระบอก

เมื่อทำการพิจารณาสมการที่ (5) (6) และ (7) เข้าด้วยกันโดยทำการเปรียบเทียบตัวแปรเชิงกลของแรงกระทำ F และความเร็วอนุภาค v ให้เทียบเท่ากับตัวแปรทางไฟฟ้าที่เป็นแรงดันและกระแสตามลำดับ จะสามารถสร้างวงจรสมมูลของชั้นฟิล์มที่เป็นสารเปียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกับวงจรสมมูลแบบเมสันได้ [5] แต่ค่าพารามิเตอร์จะแตกต่างกัน และวงจรสมมูลที่ได้จะมีคุณสมบัติไม่สมมาตร อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่เป็นทรานสดิวเซอร์ วงจรสมมูลของมันอาจไม่มีความจำเป็นนัก โดยจะใช้การพิจารณาชั้นฟิล์มของสารเปียโซอิเล็กทริกให้มีรูปแบบง่ายๆ เช่น วงจรสามพอร์ต ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วใช้สมการที่ (5) (6) และ (7) ช่วย ก็จะช่วยให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้น

ในกรณีของชั้นฟิล์มของวัสดุที่ไม่ใช่สารเปียโซอิเล็กทริก เช่น ชั้นฟิล์มของโลหะ จะไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้าตกคร่อมชั้นฟิล์ม ดังนั้น เทอมทางไฟฟ้าในสมการต่างๆจะหายไป และเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าของแรงกระทำ F ที่แต่ละด้านของชั้นฟิล์มด้วยวิธีในทำนองเดียวกันกับชั้นฟิล์มของสารเปียโซอิเล็กทริกข้างต้น จะได้

$$F_1 = Z_{11}v_1 + Z_{12}v_2 \quad (8)$$

$$F_2 = Z_{21}v_1 + Z_{22}v_2 \quad (9)$$

โดยที่ Z_{ij} ($i,j=1,2$) สามารถคำนวณได้ด้วยสมการเดียวกันกับสมการที่ (5) และ (6) แต่ต้องแทนค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุของชั้นฟิล์มที่กำลังพิจารณาลงไป และเมื่อนำสมการที่ (8) และ (9) มาพิจารณาสร้างเป็นวงจรสมมูลของชั้นฟิล์มทรงกระบอกที่ไม่ใช่สารเปียกอิเล็กทริก จะมีลักษณะเป็นวงจรสองพอร์ตคล้ายกับรูปที่ 2 ที่มีเฉพาะพอร์ต 1 และ พอร์ต 2

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานสดิวเซอร์ทรงกระบอกบนเส้นใยแก้ว สามารถแสดงได้ในเทอมของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance) โดยทั่วไปมักจัดให้อยู่ในเทอมของ พารามิเตอร์ S11 นั่นคือ

$$S11 = 10 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_{so}}{Z_{in} + Z_{so}} \right| \quad \text{dB} \quad (10)$$

เมื่อ Z_{so} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยทั่วไปมักมีค่า 50 โอห์ม และ Z_{in} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวทรานสดิวเซอร์ หาได้จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์มแต่ละชั้นเมื่อนำมาต่อร่วมกัน ตามลักษณะโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ที่สร้างขึ้น ดังนี้

$$Z_{in} = \frac{h^2}{\omega^2} \cdot \frac{(Z_o - Z_i + Z_{11} + Z_{12} - Z_{21} - Z_{22})}{(Z_i + Z_{11})(Z_o + Z_{22}) - Z_{12}Z_{21}} - \frac{j}{\omega C_o} \quad (11)$$

เมื่อ Z_{ij} ($i,j=1,2$) เป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของชั้นฟิล์มที่เป็น ZnO

h เป็นพารามิเตอร์ทางอะคูสติกส์ของ ZnO

C_o เป็นค่าของคาปาซิแตนซ์ที่เกิดขึ้นบนตัวอุปกรณ์ เนื่องมาจากชั้นโลหะอิเล็กโตรดที่วางขนานกันด้านนอกและด้านใน ZnO

ω เป็นค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์

Z_i และ Z_o เป็นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่ต่อกับชั้นฟิล์มด้านในและด้านนอกของ ZnO ตามลำดับ มีค่าเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับค่าความหนาของชั้นฟิล์มโลหะที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรด ดังนั้น เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเปลี่ยนไปแม้เพียงเล็กน้อย ก็น่าจะมีผลทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ หรือค่า S11 ของทรานสดิวเซอร์ มี ค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน

2.2 การมอดูเลตทางเฟสของแสง

กลไกการทำงานเพื่อมอดูเลตเฟสของแสง สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ เมื่อทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้าในช่วงของความถี่ไมโครเวฟให้กับอุปกรณ์ผ่านขั้วอิเล็กโตรด จะทำให้ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นเปียโซอิเล็กทริก เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวทั้งสองด้านของมัน และจะผลิตคลื่นกลที่เป็นคลื่นทางยาว (Longitudinal waves) หรือในที่นี้จะเรียกว่าคลื่นเสียง (acoustic waves) เดินทางผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้ว เนื่องจากส่วนของทรานสดิวเซอร์ ถูกเคลือบอยู่โดยรอบผิวของเส้นใยแก้ว และคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของซิงค์ออกไซด์ จะทำให้คลื่นเสียงที่เดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้ว มีทิศทางอยู่ในแนวตัดขวาง และสะท้อนกลับป้อนมาเหมือนกับคลื่นกลทรงกระบอก หากขนาดความยาวคลื่นของคลื่นเสียง (Λ) ที่เดินทาง คูณด้วยเลขจำนวนนับ (integer) มีค่าเท่ากับ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุทธิของทรานสดิวเซอร์เส้นใยแก้วแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์คลื่นนิ่ง (standing waves) หรือ คลื่นก้ำทอน (resonance) ขึ้น ในแนวตัดขวางของเส้นใยแก้ว ทำให้ตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติเป็นเรโซเนเตอร์ (resonator) และจากโครงสร้างทรงกระบอกของเส้นใยแก้วที่มีส่วนของคอร์ (core) อยู่ในแนวแกนกลาง ทำให้กำลังงานของคลื่นเสียงจะถูกรวบรวมหรือโฟกัส (focus) ไปยังคอร์ของเส้นใยแก้ว

ผลของพลังงานของคลื่นเสียงที่คอร์ของเส้นใยแก้ว จะทำให้เกิดความเครียดในแนวรัศมี (radial strain: S_r) และในแนวแกนกลาง (axial strain: S_z) ขึ้น ในกรณีนี้ ค่าของความเครียดแนวแกนกลาง S_z ถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเครียดในแนวรัศมี S_r เนื่องจากคลื่นเสียงเดินทางอยู่ในแนวรัศมีของเส้นใยแก้วเท่านั้น ดังนั้น เราจะสนใจค่าของ S_z เลย ในที่นี้

ความเครียดที่เกิดขึ้นนี้ จะส่งผลทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงของเส้นใยแก้วในส่วนของคอร์ เกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามผลของโฟโตอีลาสติก (photoelastic effect) เมื่อแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วผ่านเข้าไปในส่วนที่มีค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนไปนี้ จะเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแสงกับคลื่นเสียง (acousto-optic interaction) (ดังนั้น เราจึงเรียกชื่อของอุปกรณ์นี้ว่าอุปกรณ์อะคูสโตออปติกส์) ทำให้มุมเฟสของแสงมีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าของมุมเฟสจะถูกเลื่อนออกไปจากเดิม ตามโดเมนเวลาของคลื่นเสียงคือ $\Delta\phi \sin(\omega_a t)$ เมื่อ

ω_a เป็นความถี่เชิงมุมของคลื่นเสียง

$\Delta\phi$ เป็นขนาดแอมพลิจูดของมุมเฟสแสงที่เปลี่ยนแปลง

โดยที่ค่าของ $\Delta\phi$ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ [2,7]

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} n^3 p S_r l \quad (12)$$

เมื่อ n เป็นค่าดัชนีหักเหของแสงของคอร์

λ เป็นความยาวคลื่นแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้ว

p เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดทางแสงของเส้นใยแก้ว (strain-optic coefficient)

l เป็นขนาดความยาวของทรานสดิวเซอร์

ในกรณีที่นำทรานสดิวเซอร์บนเส้นใยแก้วมาใช้ หากไม่มีการป้อนสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าไป ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วยังคงมีค่าปกติ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของเฟสมีค่าแน่นอนตามสมการ $\phi = 2\pi n x / \lambda$ ตามระยะทาง x ที่แสงเดินทางภายในเส้นใยแก้ว เมื่อทำการป้อนสัญญาณขับทางไฟฟ้าให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ คลื่นเสียงจะถูกผลิตขึ้นโดยทรานสดิวเซอร์รอบเส้นใยแก้ว ทำให้เกิดความเครียด ($S = S_r$) มีค่าเป็นไปตามสมการ [7]

$$S^2 = \frac{P_a}{Z_f v_f^2 A l} \quad (13)$$

โดยที่ P_a เป็นค่าของกำลังงานทางกลอันเกิดจากคลื่นเสียงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้ว Z_f เป็นค่าความต้านทานของวัสดุต่อคลื่นเสียง (acoustic impedance) ที่เดินทางในเส้นใยแก้ว v_f เป็นความเร็วของคลื่นเสียงภายในเส้นใยแก้ว l เป็นความยาวของทรานสดิวเซอร์ และ A เป็นพื้นที่ที่เกิดการกระจายของคลื่นเสียง ในกรณีของเส้นใยแก้วซึ่งมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก กำลังงานของคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมเข้าไปยังแกนกลาง หรือส่วนของคอร์ในเส้นใยแก้วที่มีสัญญาณแสงเดินทางผ่าน ซึ่งในที่นี้ $A = 2\pi p l$ เมื่อ p เป็นค่ารัศมีของคอร์

ค่าของกำลังงานทางกล P_a มาจากการเปลี่ยนแปลงกำลังงานทางไฟฟ้า P_e ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ป้อนให้กับตัวทรานสดิวเซอร์ และมีค่าความสัมพันธ์ตามสมการ $P_a = \eta P_e$ เมื่อ η เป็นค่าประสิทธิภาพการคับปลิงกำลังงานระหว่างกำลังงานเสียงกับกำลังงานไฟฟ้า ค่าของ η เป็นฟังก์ชันของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ Z_{in} ทางไฟฟ้า

ที่เกิดขึ้นบนตัวทรานสดิวเซอร์เอง ซึ่งสามารถหาได้จากทฤษฎีการส่งผ่านกำลังงาน ในกรณีนี้ ค่าของ η สามารถหาออกมาได้มีค่าเท่ากับ

$$\eta = \frac{4R_{so} \operatorname{Re}(Z_{in})}{(R_{so} + \operatorname{Re}(Z_{se}) + \operatorname{Re}(Z_{in}))^2 + (\operatorname{Im}(Z_{se}) + \operatorname{Im}(Z_{in}))^2} \quad (14)$$

เมื่อ R_{so} เป็นค่าความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม Z_{se} เป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมที่เกิดขึ้นบนตัวทรานสดิวเซอร์ในทางปฏิบัติ $\operatorname{Re}()$ และ $\operatorname{Im}()$ แสดงเทอมที่เป็นจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ ตามลำดับ

ความถี่ที่เกิดขึ้นภายในเส้นใยแก้ว มีผลโดยตรงที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วในส่วนนั้น เกิดการเปลี่ยนแปลงตามผลของอะคูสโตออปติกส์ (Acousto-Optic Effect) และสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\Delta n = 0.5n^3pS \quad (15)$$

เมื่อ Δn เป็นค่าดัชนีหักเหภายในเส้นใยแก้วที่เปลี่ยนแปลงไป n เป็นค่าดัชนีหักเหเดิมของเส้นใยแก้ว และ p เป็นค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงและความเครียดในเส้นใยแก้ว (strain-optical coefficient)

แสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วแล้วผ่านเข้าไปในส่วนที่เกิดมีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห เฟสของแสงจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ϕ เป็น $\phi + \Delta\phi$ โดยที่ $\Delta\phi = 2\pi\Delta n l / \lambda$ มีค่าเช่นเดียวกับสมการที่ (12) และสามารถแสดงเป็นสมการสมบูรณ์ได้ดังนี้

$$\Delta\phi = \frac{n^3 p}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi P_e l}{Z_f v_f^2 \rho}} \cdot \frac{2R_{so} \operatorname{Re}(Z_{in})}{(R_{so} + \operatorname{Re}(Z_{se}) + \operatorname{Re}(Z_{in}))^2 + (\operatorname{Im}(Z_{se}) + \operatorname{Im}(Z_{in}))^2} \quad (16)$$

2.3 การประยุกต์ใช้งานกับ Optical Fiber Frequency Decoder

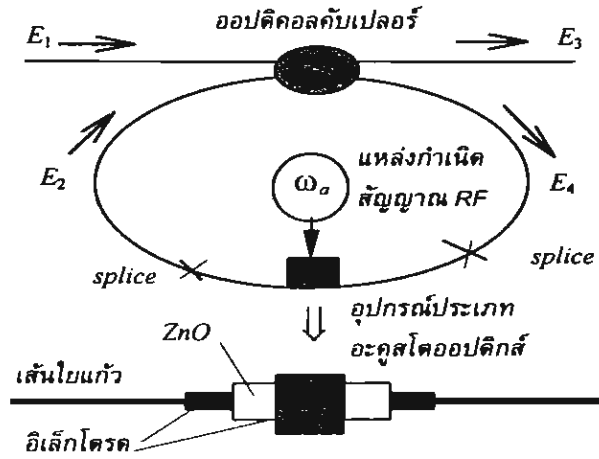
ก่อนหน้านี้ [7] ได้มีการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว ประกอบเป็นส่วนหนึ่งในรูปของเรโซเนเตอร์วงแหวนเส้นใยแก้ว (optical fiber ring resonator) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะถูกป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์เพื่อสร้างคลื่นกลเดินทางภายในเส้นใยแก้ว ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วในส่วนในส่วนของคลื่นเดินทาง เกิดการเปลี่ยนแปลงตามขนาดและความถี่ของสัญญาณ เมื่อแสงเดินทางผ่านจะถูกมอดูเลตทางเฟส และเมื่อเฟสของแสงในเรโซเนเตอร์วงแหวนมีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้ความเข้มแสงขาออกมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย เนื่องจากเราสามารถควบคุมขนาดการเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงในเส้นใยแก้วภายในรูปได้ด้วยตัวทรานสดิวเซอร์ ทำให้เราสามารถกำหนดขนาดของการมอดูเลตสัญญาณความเข้มแสงได้ด้วยเช่นกัน และจากคุณสมบัติของอุปกรณ์อะคูสโตออปติกส์ที่เป็นทรานสดิวเซอร์เอง ที่ทำให้เกิดช่วงความถี่ในการมอดูเลตแสง ตามลักษณะของการเกิดคลื่นนิ่งที่ความถี่ต่างๆ ทำให้เราสามารถนำมาสร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบความถี่สัญญาณไมโครเวฟที่ต้องการ ซึ่งถูกมอดูเลตไปกับสัญญาณแสงได้ (คล้ายกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์) เรียกว่า Optical Fiber Frequency Decoder (OFD) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ อิทธิพลความหนาของฟิล์มอิเล็กโทรด ที่อาจมีผลทำให้การทำงานของอุปกรณ์นี้เปลี่ยนแปลงไป

เรโซเนเตอร์วงแหวนเส้นใยแก้ว (optical fiber ring resonator) ที่มีทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว อยู่ภายในรูป มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งมีสัญญาณแสงขาเข้า E_1 ที่พอร์ต 1 และมีสัญญาณแสงขาออก E_3 ที่พอร์ต 3 ค่าการคับปลิงสัญญาณของออปติคอลลัมเพลอร์ k ในกรณีของรูปเปิด (ไม่มีการต่อเชื่อมเป็นรูป) หาได้จาก

$$k = \left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{I_4}{I_1} \quad (17)$$

เมื่อ E เป็นสนามไฟฟ้า และ I เป็นค่าความเข้มแสง ค่าการสูญเสียสัญญาณของคัปเปิลเลอร์ γ หาได้จาก

$$\gamma = \frac{\text{input} - \text{output}}{\text{input}} = 1 - \frac{|E_3|^2 + |E_4|^2}{|E_1|^2 + |E_2|^2} \quad (18)$$



รูปที่ 3 เรโซเนเตอร์วงแหวนที่มีทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงประกอบอยู่ในรูป

ค่าของสนามไฟฟ้าขาออก มีความสัมพันธ์กับค่าของ สนามไฟฟ้าขาเข้าดังสมการ [7]

$$E_3 = \sqrt{1-\gamma} \cdot (\sqrt{1-k} E_1 + j\sqrt{k} E_2) \quad (19)$$

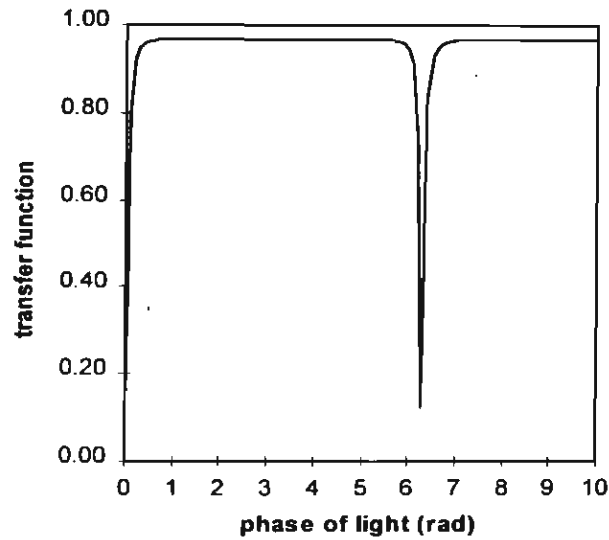
$$E_4 = \sqrt{1-\gamma} \cdot (j\sqrt{k} E_1 + \sqrt{1-k} E_2) \quad (20)$$

โดยที่ค่าของ E_2 อาจหาได้จาก $E_2 = \sqrt{1-a} \cdot e^{(-\alpha+j\beta)L} E_4$ เมื่อ a เป็นค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วด้วยการสไปลซ์ (splice loss) α เป็นค่าการลดทอนสัญญาณต่อหน่วยความยาวของเส้นใยแก้ว (fiber loss) β เป็นค่าคงตัวการเดินทางของแสง (propagation constant) ในเส้นใยแก้ว และ L เป็นความยาวของเส้นใยแก้วภายในรูป

เมื่อทำการแก้สมการหาฟังก์ชันการส่งผ่านในเทอมของอัตราส่วนของสัญญาณขาออกและขาเข้า เมื่อไม่มีการทำงานของทรานสดิวเซอร์ความถี่สูง โดยใช้สมการพื้นฐานข้างต้น จะได้

$$H = \frac{I_3}{I_1} = \frac{k(1-\gamma)}{1+A-2\sqrt{A} \cos \beta L} \quad (21)$$

$$\text{เมื่อ } A = (1-k)(1-a)(1-\gamma)e^{-2\alpha L}$$



รูปที่ 4 กราฟแสดงคุณสมบัติของเรโซแนนท์วงแหวน เส้นใยแก้วโดดๆ ตามค่าของเฟสของแสงในลูป

เมื่อทำการพล็อตกราฟจากสมการที่ (21) ดังรูปที่ 4 จะพบว่า ค่าของ I_3 ที่แสดงด้วยค่าของฟังก์ชันการส่งผ่าน (transfer function) H มีค่าแปรเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันของเฟสของแสง (phase of light) βL ภายในลูปวงแหวน โดยมีค่าต่ำสุดเมื่อพลังงานของแสงภายในลูปเกิดเรโซแนนท์ นั่นคือ เมื่อเฟสของแสงมีค่า $\beta L = 2m\pi$ โดยที่ m เป็นเลขจำนวนนับ ในช่วงที่ใกล้กับการเกิดเรโซแนนท์ I_3 จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วขึ้นกับค่าฟิเนส (Finesse) ของเรโซเนเตอร์ และค่าการคับปลิงสัญญาณของออปติคอลคับเพลอร์ โดยที่ I_3 จะสามารถกำหนดให้มีค่าน้อยที่สุดได้เมื่อ k มีค่าเป็น

$$k \rightarrow k_r = 1 - (1 - \gamma)(1 - a)e^{-2\alpha L} \quad (22)$$

ซึ่งในช่วงนี้หากเฟสของแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้สัญญาณแสงขาออกมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย การเปลี่ยนแปลงเฟสของแสง ทำได้โดยการควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ความถี่สูง ที่ประกอบอยู่ภายในลูปของเรโซเนเตอร์ เมื่อทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้าให้กับทรานสดิวเซอร์ แสงที่เดินทางผ่านตัวมันจะถูกมอดูเลตทางเฟสมีค่าเป็น $\varphi = \phi + \Delta\phi \sin(\omega_d t)$ เมื่อ ϕ เป็นค่าของเฟสเดิม φ เป็นค่าของเฟสที่ถูกมอดูเลต ω_d เป็นค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณทางไฟฟ้า และ $\Delta\phi$ เป็นขนาดของเฟสสูงสุดที่ถูกเลื่อนมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (16)

เมื่อป้อนสัญญาณไฟฟ้าให้ทรานสดิวเซอร์ทำงาน ค่าของฟังก์ชันการส่งผ่านในสมการที่ (21) จะมีค่าขึ้นกับเฟสของแสงภายในลูปที่เปลี่ยนไป ในขณะเดียวกัน หากกำหนดให้ขนาดความยาวของลูปมีค่าที่ทำให้ฟังก์ชันการส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวนมีค่าคงที่ ตรงจุดกึ่งกลางระหว่างค่าความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุด จะทำให้สามารถควบคุมความเข้มแสงขาออกได้โดยการควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ โดยที่ตำแหน่งของเฟสในลูป βL ที่กล่าวถึง สามารถหาได้เป็น

$$\beta L = \cos^{-1} \left(\frac{2\sqrt{A}}{1+A} \right) \quad (23)$$

หากสมมติให้สัญญาณแสงขาเข้า $I_1 = 1$ มีค่ากำลังงานหนึ่งหน่วย ค่าของความเข้มแสงขาออก $I_0 = I_3$ จะ

หาได้จากสมการของฟังก์ชันการส่งผ่าน เป็น [7]

$$I_o = (1 - \gamma) \cdot \left[1 - \frac{k(1 - k - A)}{(1 - k)(1 + A - 2\sqrt{A} \cos(\Delta\phi))} \right] \quad (24)$$

โดยที่การทำงานของทรานสดิวเซอร์ในรูป จะควบคุม $\Delta\phi$ ซึ่งจะทำให้การทำงานของ OFD เปลี่ยนแปลงไป

ในการสร้างระบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของ OFD โดยเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นจริงในทางปฏิบัติ ดังนี้

เรโซเนเตอร์วงแหวน :

$k = 0.05$ ($k_r = 0.049$), $\gamma = 0.03$, $\alpha = 0.01$, $\alpha = 0.2$ dB/km @ λ 1.55 μm , $L = m\lambda/n$ เมื่อ $m = 3 \times 10^6$ และ $n = 1.479$

ทรานสดิวเซอร์ :

อิเล็กโตรด : โลหะอะลูมิเนียม
 ความหนาชั้นฟิล์ม 0.1 μm (และมีการเปลี่ยนค่าเพื่อดูผล)
 ความต้านทานทางอะคูสติกส์ 17.33×10^6 kg/m²-s
 ความเร็วคลื่นกล 6400 m/s
 การลดทอนสัญญาณคลื่นกล 236.2 Np/m²
 ความยาวอิเล็กโตรด(ทรานสดิวเซอร์) 3 mm

ซิงค์ออกไซด์ :

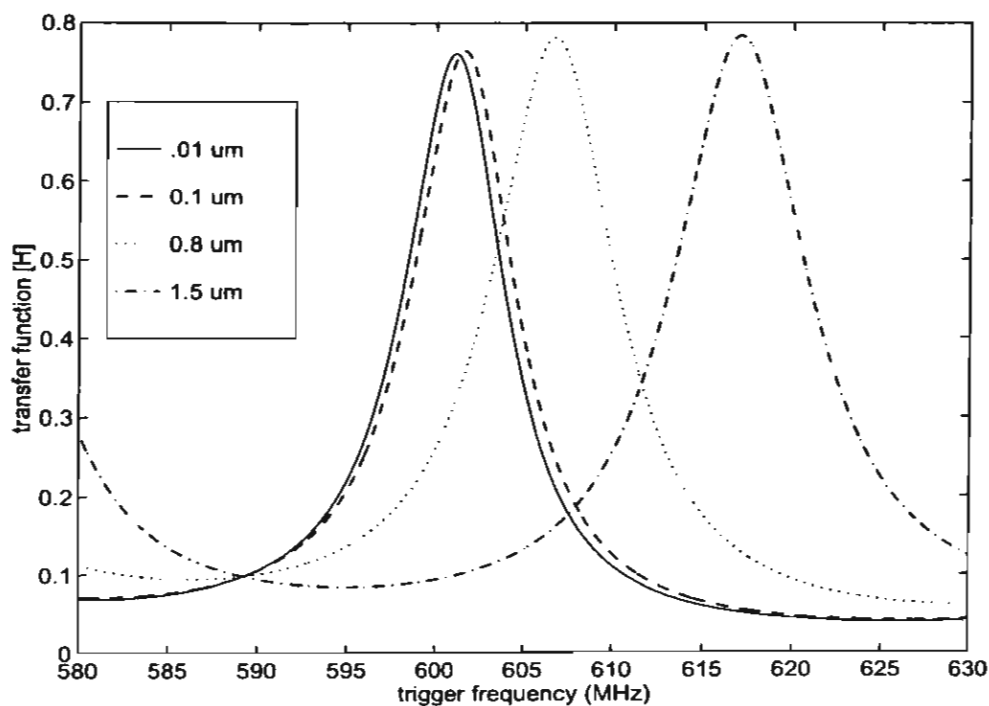
ความหนาชั้นฟิล์ม 5 μm
 ความต้านทานทางอะคูสติกส์ 36×10^6 kg/m²-s
 ความเร็วคลื่นกล 6300 m/s
 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 9.74×10^{-11}
 ค่าคงตัวการคับปลิงพลังงาน (k^2) 0.28

เส้นใยแก้ว :

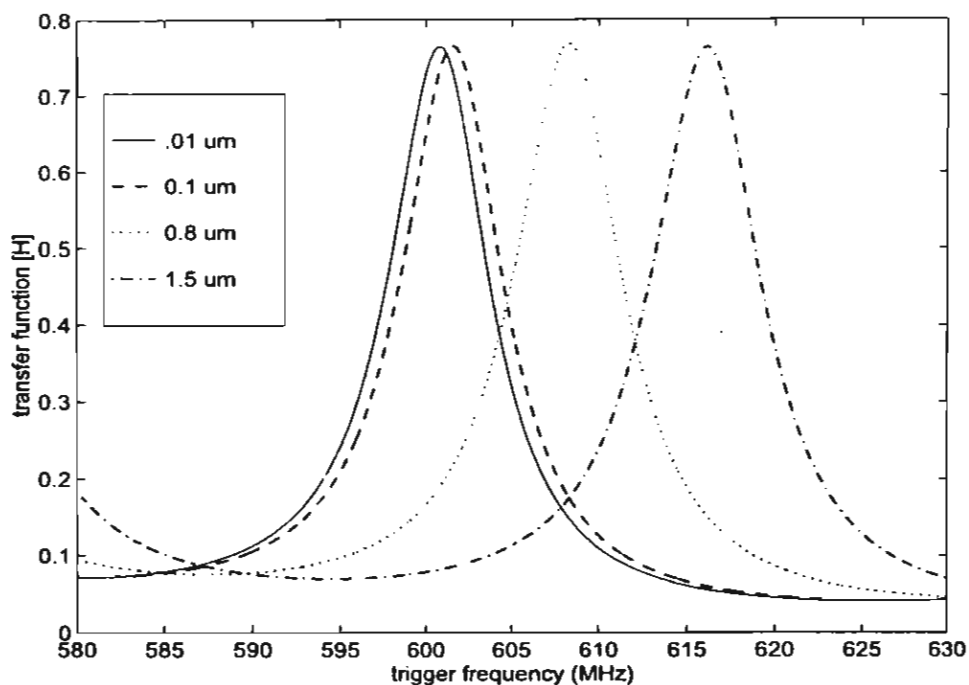
เส้นผ่านศูนย์กลาง 7/125 μm
 ความต้านทานทางอะคูสติกส์ 13.1×10^6 kg/m²-s
 ความเร็วคลื่นกล 5600 m/s
 การลดทอนสัญญาณคลื่นกล 5993.27 Np/m²
 ดัชนีหักเหของคอร์ 1.479
 สัมประสิทธิ์อิเล็กโตรออปติกส์ 0.121

จากการคำนวณเพื่อหาค่าของความเข้มแสงขาออก เมื่อความหนาของอิเล็กโตรดด้านในคงที่ (0.1 ไมครอน) แต่ความหนาของอิเล็กโตรดด้านนอกมีค่าเปลี่ยนแปลงไป จะได้ผลลัพธ์แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 5 ซึ่งจะพบว่า ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่มอดูเลตตามกับสัญญาณแสง จะมีค่าสูงขึ้นตั้งแต่ไม่กี่เมกะเฮิร์ตซ์ไปจนถึงหลายสิบลเมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีขนาดการเปลี่ยนแปลงผันตรงกับความหนาของอิเล็กโตรดด้านนอกที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หากความหนาของอิเล็กโตรดมีค่าน้อยกว่า 0.1 ไมครอนแล้ว การเลื่อนความถี่จะมีค่าน้อยมากจนถือว่าไม่เกิดขึ้นได้ สำหรับรูปที่ 6 เป็นการพล็อตกราฟเพื่อแสดงค่าความถี่ที่ถูกเลื่อน เมื่อความหนาของฟิล์มอิเล็กโตรดด้านนอกมีค่าคงที่ (0.1

ไมครอน) แต่อิเล็กทรอนิกส์ด้านในมีค่าความหนาเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลไปในทำนองเดียวกับข้างต้น แต่จะมีผลน้อยกว่าในกรณีแรก ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่อิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกมีลักษณะสัมผัสกับอากาศ (air-back) โดยตรง ซึ่งทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์เชิงกลแตกต่างกันมาก

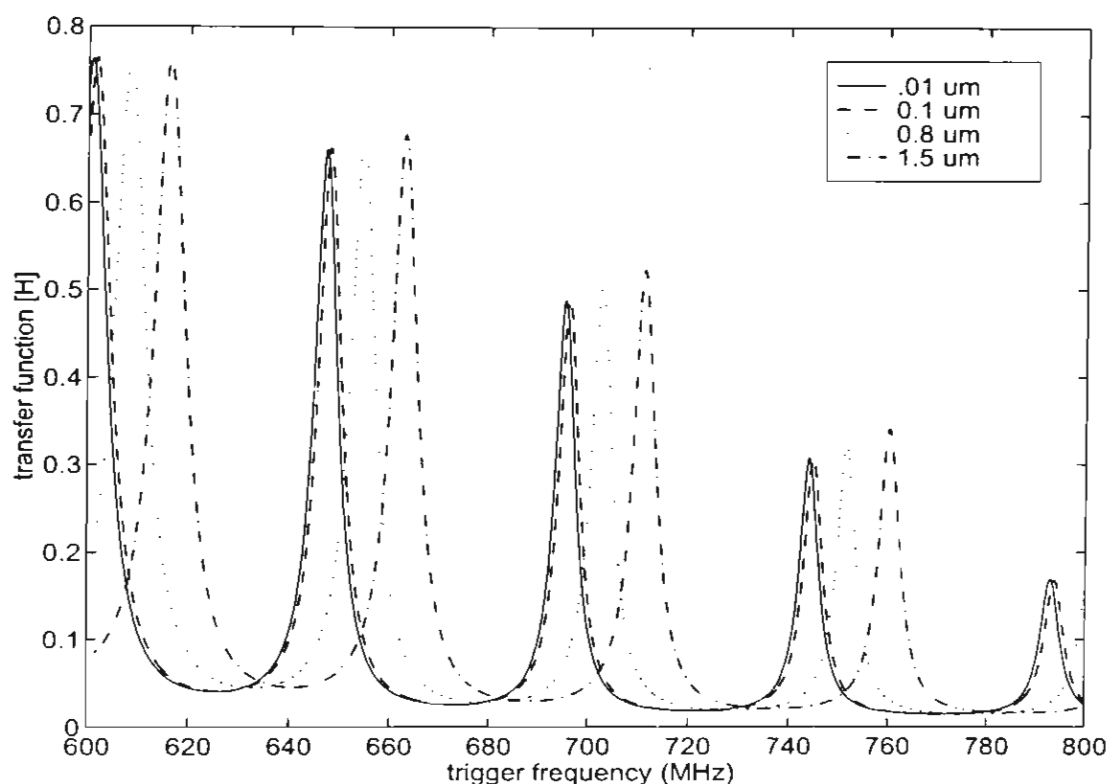


รูปที่ 5 ค่าความถี่ถูกเลื่อนไปเมื่อความหนาของอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6 ค่าความถี่ถูกเลื่อนไปเมื่อความหนาของอิเล็กทรอนิกส์ด้านในเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยแก้ว ทำให้เกิดคลื่นนิ่งบนตัวเรโซเนเตอร์ ค่าความถี่ที่ทรานสดิวเซอร์ผลิตได้ หรือความถี่ที่ OFD จะดีเท็กได้ จึงมีลักษณะเป็นยอด (peak) หลายยอดเป็นช่วงๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของ คลื่นเสียงที่ผลิตขึ้นจะต้องมีค่าเท่ากับจำนวนเท่าของเลขจำนวนเต็ม (multiple integer) ที่ทำให้มีค่าเท่ากับขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางของเรโซเนเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าระยะห่างระหว่างยอดความถี่ (peak separation) มีค่าประมาณ 45 MHz ทั้งนี้เกิดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วนั่นเอง



รูปที่ 7 ค่าความถี่ที่ถูกดีเท็กมีลักษณะเป็นยอดหลายยอด แต่ละยอดห่างกันประมาณ 45 MHz

3. การเคลือบฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการเคลือบฟิล์มบางเพื่อสร้างทรานสดิวเซอร์บนผิวเส้นใยแก้วอยู่สองชนิด ชนิดแรกคือชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียม เพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดของทรานสดิวเซอร์ ซึ่งรายละเอียดในการกำหนดเลือกชนิดของชั้นฟิล์มอิเล็กโทรดเป็นอะลูมิเนียม เป็นผลจากการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ดังรายละเอียดในเอกสารอ้างอิงที่ [2,7] และชนิดที่สองได้แก่ ชั้นฟิล์มของซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide : ZnO) โดยจะใช้ระบบสปัตเตอริง (sputtering) ในกระบวนการเคลือบฟิล์มทั้งสองชนิด สำหรับระบบสปัตเตอริงที่ใช้ในโครงการนี้เป็นเครื่องยี่ห้อ DYNAVAC โมเดลรุ่น SC100MS ซึ่งเป็นระบบสปัตเตอริงแบบระนาบที่ใช้ไฟตรงและมีการเพิ่มสนามแม่เหล็กเพื่อดักจับอนุภาค หรือที่เรียกว่าระบบ DC planar magnetron sputtering ดังแสดงในรูปที่ 8 ข้อจำกัดในการวิจัยนี้ก็คือ กระบวนการเคลือบฟิล์มทุกชนิดต้องกระทำด้วยเครื่องสปัตเตอริงเพียงเครื่องเดียว ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบสปัตเตอริงเพียงเครื่องเดียวที่สามารถหาได้ (โดยปรกติเครื่องสปัตเตอริงมีราคาแพงมาก) นอกจากนี้ การสปัตเตอริงสารประกอบของซิงค์ มักทำให้ระบบเกิด contamination อยู่เสมอ ส่งผลให้ระบบไม่สมดุลง่ายและสามารถปรับใช้เครื่องกับงานอื่นได้ยาก ผู้ใช้ส่วนใหญ่จึงมักไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้เครื่องร่วมด้วย



รูปที่ 8 ภาพถ่ายแสดงระบบสปัตเตอร์ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้

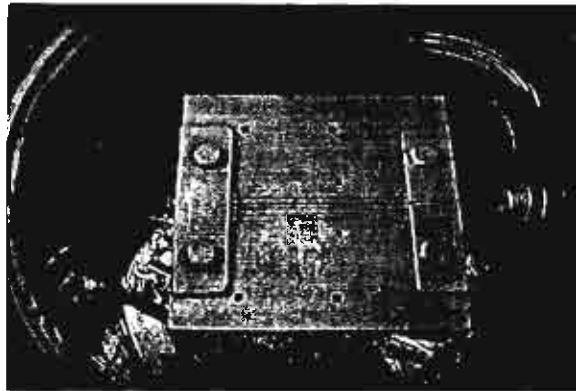
3.1 การดัดแปลงระบบและการออกแบบระบบหน้ากาก

ระบบสปัตเตอร์ของ DYNAVAC รุ่น SC100MS ที่ใช้ในโครงการนี้ มีขนาดของห้องสุญญากาศหรือแชมเบอร์ (vacuum chamber) เป็นทรงกระบอกทำด้วยโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 200 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 185 มม. และมีความสูง 150 มม. โดยมีลักษณะเป็นฝาเปิดด้านบน ซึ่งลักษณะของแชมเบอร์ดังกล่าวถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานทั่วไป ดังนั้น โครงการนี้จึงต้องทำการดัดแปลงระบบ และสร้างระบบหน้ากาก (masking system) เพื่อให้สามารถเคลือบชิ้นงานตามต้องการได้ การดัดแปลงระบบที่สำคัญคือการติดตั้งมอเตอร์เพื่อหมุนเส้นใยแก้วเข้าไปในแชมเบอร์ โดยมอเตอร์นี้จะถูกควบคุมความเร็วรอบได้จากภายนอก ให้มีความเร็วในการหมุนประมาณ 6 รอบต่อนาที เพื่อทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอโดยรอบเส้นใยแก้ว

สำหรับระบบหน้ากากที่ใช้ จะประกอบรวมเป็นแท่นยึดชิ้นฐานรองบนแผ่นฐาน (substrate plate) โดยจะต้องสามารถใช้เคลือบฟิล์มบนผิวเส้นใยแก้วได้ 2 ลักษณะ คือแบบเคลือบฟิล์มบนเส้นใยแก้วด้านเดียว และแบบที่เคลือบฟิล์มรอบเส้นใยแก้วที่หมุนเพื่อให้เกิดชั้นฟิล์มล้อมรอบเส้นใยแก้ว

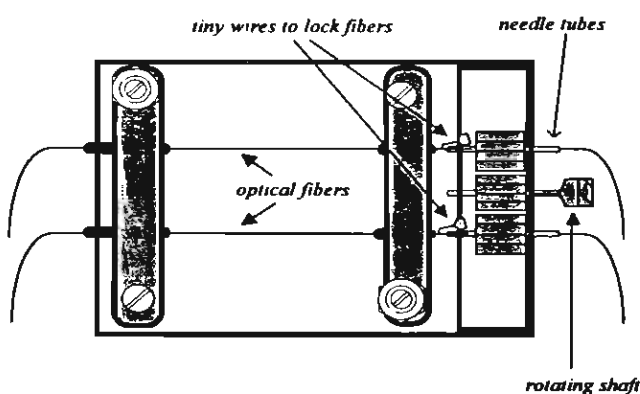
ในการออกแบบแท่นยึดสำหรับเคลือบฟิล์มบางบนเส้นใยแก้วด้านเดียว (เส้นใยแก้วไม่หมุน) จะใช้ปลายเข็มฉีดยาที่มีขนาดเล็กตัดเป็นหลอดกลม เพื่อให้สามารถสอดเส้นใยแก้วเข้าไปได้อย่างสะดวก แล้วจัดเรียงกันสองด้านที่

ริมขอบของแท่นยึด ดังแสดงในรูปที่ 9 แท่นยึดที่ออกแบบนี้สามารถใช้สำหรับเคลือบเส้นใยแก้วที่มีความยาวประมาณ 80-100 เซนติเมตร ได้ครั้งละ 5 ถึง 10 เส้นพร้อมกันในการเคลือบฟิล์มแต่ละครั้ง โดยที่พื้นที่สำหรับเคลือบอะลูมิเนียมบนผิวเส้นใยแก้วจะยาวประมาณ 5 ซม. และอยู่ตรงกลางระหว่างหลอดเข็มฉีดยาสองด้าน



รูปที่ 9 ภาพถ่ายของแท่นยึดสำหรับเคลือบฟิล์มด้านเดียว

ในการออกแบบแท่นยึดสำหรับเคลือบเส้นใยแก้วแบบหมุน จะใช้เฟืองพลาสติกขนาดเล็กที่ใช้ต่อกับแกนหมุนมอเตอร์เด็กเล่น 3 ตัว มาดัดแปลงโดยเจาะรูตรงกลางของแกนหมุน แล้วสอดเข็มฉีดยาขนาดเล็กเข้าไป จากนั้นนำแกนเฟืองทั้ง 3 มาวางเรียงกันในกล่องโลหะให้ฟันเฟืองขบกัน ดังรูปที่ 10 โดยแกนเฟืองตัวกลางจะถูกต่อเข้ากับแกนหมุนของมอเตอร์ ส่วนเฟืองและแกนเข็มฉีดยาอีก 2 ตัว ด้านข้าง จะใช้สำหรับหมุนเส้นใยแก้ว ดังนั้น แท่นยึดนี้จะใช้เคลือบเส้นใยแก้วได้พร้อมกันเพียงคราวละไม่เกิน 2 เส้น เท่านั้น ในขณะที่ใช้งานแท่นยึดเพื่อเคลือบเส้นใยแก้ว จะสอดเส้นใยแก้วขนาดความยาวประมาณ 80 เซนติเมตร ที่จะเคลือบชั้นอีเล็กโตรดด้านล่างเข้าไปในรูเข็มฉีดยา แล้วใช้หลอดขนาดเล็กพอเหมาะสอดเข้าไปในช่องว่างระหว่างเส้นใยแก้วและผนังด้านในของรูเข็มฉีดยา เพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทานเพื่อที่จะยึดให้เส้นใยแก้วหมุนไปตามการหมุนของแกนเฟืองที่สร้างขึ้น ในการจัดพื้นที่สำหรับเคลือบฟิล์มบนเส้นใยแก้ว จะใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil) ห่อหุ้มเส้นใยแก้วโดยรอบส่วนที่ไม่ต้องการเคลือบ โดยจะเปิดส่วนที่ต้องการเคลือบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข) สำหรับส่วนปลายของเส้นใยแก้วที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเคลือบ จะถูกปล่อยให้มีการเคลื่อนไหวอย่างอิสระอยู่ภายในแชมเบอร์ด้านล่าง



(ก)



(ข)

รูปที่ 10 แท่นยึดสำหรับเคลือบฟิล์มบนเส้นใยแก้วรอบผิวเส้นใยแก้วแบบหมุนอยู่ในแชมเบอร์โดยที่รูป (ก) แสดงภาพวาดโครงสร้าง และรูป (ข) แสดงภาพถ่ายชิ้นงานจริงที่อยู่ในแชมเบอร์

3.2 กระบวนการเคลือบฟิล์ม

ในกระบวนการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิด ในเบื้องต้นต้องทำการจัดเตรียมระบบให้พร้อม โดยเฉพาะเรื่องความสะอาด ในที่นี้จะใช้อะซีโตนหรือของเหลวประเภทเมทานอลทำความสะอาด ด้วยการเช็ดแชมเบอร์และส่วนประกอบของอุปกรณ์ทุกชนิดภายในแชมเบอร์ก่อนทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการระหว่างการเคลือบอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์ หลังจากนั้นจะดูอากาศภายในแชมเบอร์ให้มีสภาพเป็นสุญญากาศอยู่ที่ความดันประมาณต่ำกว่า 10^{-5} ทอร์ (Torr) อยู่ประมาณ 2-5 วันๆ ละ 4-20 ชั่วโมง ขึ้นกับสภาพการใช้งานของแชมเบอร์ก่อนหน้านี้ จากนั้น ทำการจัดระบบให้คล้ายกับกระบวนการสปัตเตอริง เรียกว่า ปริสปัตเตอริง (pre-sputtering) เพื่อเป็นการทำให้ระบบโดยเฉพาะแผ่นเป้า (target) มีสภาพเข้าสู่สมดุลสำหรับการเคลือบก่อนทำการเคลือบจริง นอกจากนี้ การเกิดพลาสมาในขณะทำการปริสปัตเตอริงนี้ ยังช่วยทำความสะอาดแชมเบอร์และระบบก่อนที่จะทำการเคลือบจริงอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เราได้ค้นพบว่าควรกระตุ้นระบบให้เกิดพลาสมาด้วยค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าต่ำๆ เพื่อเป็นการทำให้ฟิล์มยึดเกาะกับแท่นยึดชิ้นฐานรองก่อน ซึ่งจะส่งผลให้การเคลือบฟิล์มจริงมีประสิทธิภาพ อันจะช่วยเพิ่มคุณภาพของฟิล์มได้

เส้นใยแก้วที่ใช้ผลิตทรานสดิวเซอร์ในงานวิจัยนี้ เป็นเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวแบบมาตรฐานที่ใช้ในระบบสื่อสาร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งเส้น 125 ไมครอน ในการเตรียมชิ้นงานจะนำเส้นใยแก้วมาตัดให้ยาวประมาณ 80 เซนติเมตร แล้วปอกโค้ตติ้ง (coating) บริเวณส่วนที่ต้องการเคลือบฟิล์มออกให้เหลือแต่เส้นใยแก้วเปลือยยาวประมาณ 4-5 เซนติเมตร (ถ้ามากกว่านั้นจะหักง่าย) ทำความสะอาดบริเวณเส้นใยแก้วเปลือยด้วยกระดาษทิชชูชนิดไม่มีขุย ที่ชุบด้วยอะซีโตนหรือไอโซโพรพานอล จากนั้นส่องดูกับแสงสว่างเพื่อตรวจสอบสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่บนเส้นใยแก้ว แล้วจึงนำเส้นใยแก้วที่ทำความสะอาดแล้วไปใส่แท่นยึดฐานรอง เพื่อเคลือบอะลูมิเนียมสำหรับอิเล็กโทรดด้านในเคลือบซิงค์ออกไซด์สำหรับชั้นเปียโซอิเล็กทริก และเคลือบอะลูมิเนียมสำหรับชั้นอิเล็กโทรดด้านนอก ตามลำดับ แล้วจึงนำชิ้นงานไปเชื่อมต่อเข้ากับคอนเน็กเตอร์สำหรับทดสอบและใช้งานต่อไป

3.2.1 การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียม

ในการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมสำหรับการสร้างทรานสดิวเซอร์บนเส้นใยแก้วให้ประสบความสำเร็จ จะต้องคำนึงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งถ้าหากฟิล์มที่ได้มีความเป็นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ก็ถือว่าใช้ได้ นอกจากนั้น ยังต้องคำนึงถึงสภาพการยึดเกาะติดกับผิวเส้นใยแก้ว จะต้องติดแน่นไม่หลุดร่อนง่าย ในช่วงแรกของโครงการนี้ ได้ทดลองเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนแผ่นสไลด์แก้วก่อน เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ฟิล์มอะลูมิเนียมติดกับผิวแก้วได้ดีที่สุดเสียก่อน แล้วจึงจะนำเงื่อนไขการทำงานที่ได้นี้ ไปใช้ปรับแต่งกับการเคลือบฟิล์มบนเส้นใยแก้ว ในการทดสอบคุณสมบัติการติดแน่นของแผ่นฟิล์ม ใช้การทดลองชุบฟิล์มด้วยโลหะละลายแหลม ควกับกับการติดเทปกาวยาวบนฟิล์มที่ติดอยู่บนแผ่นสไลด์แก้ว แล้วดึงออกอย่างแรง โดยฟิล์มที่ดีจะต้องไม่หลุดร่อนออกมา

การเคลือบอะลูมิเนียมสำหรับเป็นชั้นอิเล็กโทรดด้านล่างที่ติดอยู่กับเนื้อแก้ว จะเคลือบลงบนผิวเส้นใยแก้วเปลือย (bare fiber) เฉพาะในช่วงความยาวประมาณ 4 ซม. ในการเตรียมชิ้นงานจะต้องทำความสะอาดเส้นใยแก้วเปลือยอย่างดีด้วยเมทานอล แล้วติดตั้งเข้ากับแท่นยึดยึดฐานรองโดยสอดใส่เส้นใยแก้วผ่านแกนเข็มฉีดยา แท่นยึดนี้จะถูกวางในแชมเบอร์ โดยจัดให้ห่างจากแผ่นเป้าสารเคลือบ (target) ประมาณ 40-50 มม. สำหรับแผ่นเป้าสารเคลือบในที่นี้ เป็นแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และมีความหนา 1 มม.

ในการเคลือบฟิล์มจะต้องทำการดูอากาศออกจากแชมเบอร์ จนกระทั่งความดันอากาศลดลงต่ำที่สุด ซึ่งระบบที่ทำวิจัยนี้สามารถดูอากาศให้มีความดันต่ำสุด 7.5×10^{-7} ทอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งปลอมปนเหลืออยู่ภายในแชมเบอร์หรือถ้าจะมีก็ต้องมีน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม จากการทดลองหลายครั้งพบว่า ในการเคลือบอะลูมิเนียมไม่จำเป็นต้องรอให้ถึงความดันอากาศต่ำขนาดนี้ก็ได้ หากความดันอากาศมีค่าต่ำกว่า 2.5×10^{-5} ทอร์ ก็จะสามารถใช้งานได้ ซึ่งระบบจะใช้เวลาดูอากาศลงไปจนถึงระดับความดันนี้ได้ภายในเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที ก่อนการเคลือบ

จริงต้องทำปรีสปีดเตอร์สองครั้ง โดยในครั้งแรก ทำการเปิดวาล์วปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไปในแชมเบอร์สุญญากาศให้มีอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 130 sccm (standard cubic centimetre per minute) ซึ่งจะทำให้ความดันอากาศในแชมเบอร์มีค่าประมาณ 20 มิลลิทอร์ จากนั้นจ่ายกำลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับระบบ (ระหว่างแผ่นเป่ากับฐานรอง) ด้วยกระแสไฟฟ้ามีค่าไม่เกิน 10 มิลลิแอมป์ เพื่อให้เกิดพลาสมาเป็นเวลาประมาณ 20 นาที จากนั้นทำการปรีสปีดเตอร์ครั้งที่ 2 โดยปรับกระแสที่ทำให้เกิดพลาสมามีค่าไม่เกิน 40 มิลลิแอมป์ และใช้เวลาในการจ่ายกำลังงานให้กับระบบเป็นเวลา 10 นาที รวมเวลาการปรีสปีดเตอร์ทั้งสองครั้งเป็น 30 นาที แล้วจึงทำการเคลือบฟิล์มจริง การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมบนเส้นใยแก้วเพื่อเป็นชั้นอิเล็กโตรดด้านล่างสำหรับสร้างทรานซิสเตอร์บนเส้นใยแก้ว จะใช้เวลาในการเคลือบระหว่าง 6-10 นาที ขึ้นอยู่กับความหนาและประสิทธิภาพของชั้นฟิล์มที่ต้องการ โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ -350 โวลต์ ที่กระแส 135 มิลลิแอมป์ ภายใต้ความดันบรรยากาศของอาร์กอน 20 มิลลิทอร์ เมื่อเคลือบอะลูมิเนียมได้แล้ว ต้องทำการอบอ่อน (annealing) โดยการปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างช้าๆ อยู่ในแชมเบอร์ภายหลังการเคลือบฟิล์มเป็นเวลาประมาณ 60 นาที ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับสภาพของชั้นฟิล์มที่ได้ให้สมบูรณ์ จากการทดลองพบว่า ฟิล์มบางของอะลูมิเนียมที่เคลือบบนผิวเส้นใยแก้วสำหรับใช้เป็นอิเล็กโตรดด้านล่างที่ดี จะต้องมีสีเงินเป็นมันวาว และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำมาก

กล่าวโดยสรุป การเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมบนผิวเส้นใยแก้วในระบบสปีดเตอร์นี้ เงื่อนไขของตัวแปรที่ต้องใช้หรือปรับ เพื่อให้ได้ฟิล์มอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพดี เป็นดังนี้

- ใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์
- ระยะห่างจากแผ่นเป่าถึงเส้นใยแก้วประมาณ 4 เซนติเมตร
- ความดันบรรยากาศก่อนเริ่มสปีดเตอร์ (Background Pressure) น้อยกว่า 2.5×10^{-5} ทอร์
- กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นเป่า 135 มิลลิแอมป์
- แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะสปีดเตอร์ -350 โวลต์
- ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนขณะเคลือบฟิล์ม 20 มิลลิทอร์
- เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม 6-8 นาที
- อัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 25 นาโนเมตรต่อนาที
- ระยะเวลาอบอ่อน 60 นาที

3.2.2 การเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

ในการจัดเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์ลงบนเส้นใยแก้วที่ถูกเคลือบอะลูมิเนียมแล้วในแชมเบอร์ จะเป็นไปทำนองเดียวกันกับกระบวนการเคลือบอะลูมิเนียม ในครั้งนี้แผ่นเป่าสารเคลือบจะเป็นแผ่นสังกะสีบริสุทธิ์ (pure zinc) 99.995 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซที่ใช้ในการสปีดเตอร์จะเป็นก๊าซผสมระหว่างออกซิเจนและอาร์กอนในอัตราส่วน 80% ต่อ 20% โดยก่อนทำการผสมก๊าซจะต้องดูอากาศภายในแชมเบอร์ให้ได้ความดันต่ำสุดประมาณ 10^{-6} - 10^{-7} ทอร์ เสียก่อน ในงานวิจัยที่ผ่านมา [2,8-11] มักจะมีการให้ความร้อนกับเส้นใยแก้วขณะเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิ 100-350 องศาเซลเซียส เพื่อลดการเกิดความเค้น (stress) บนชั้นฟิล์มของชิ้นงาน ซึ่งทำให้ได้คุณภาพของฟิล์มเป็นผลที่น่าพอใจ แต่ก็ก่อให้เกิดความยุ่งยากทั้งในเรื่องของการจัดเตรียมอุปกรณ์ และเพิ่มเวลาในกระบวนการเคลือบ เนื่องจากต้องมีการปรับความร้อนจนได้อุณหภูมิที่เหมาะสม และที่สำคัญ เมื่อเส้นใยแก้วอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงๆ เป็นเวลานาน (ประมาณ 6-8 ชั่วโมง) ขณะเคลือบซิงค์ออกไซด์ จะทำให้ชิ้นงานเปราะและแตกหักได้ง่าย ทำให้อัตราความสำเร็จ (yield) ต่ำ และไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเพราะมีโอกาสที่จะหักสูงเมื่อนำไปเชื่อมต่อกับคอนเนกเตอร์ ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์ โดย

ไม่มีการให้ความร้อนขณะเคลือบ ซึ่งจากการทดลองพบว่า กระบวนการที่ใช้ในโรงงานสามารถให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ในช่วงต้นๆ ของกระบวนการเคลือบซิงค์ออกไซด์ (เมื่อเปลี่ยนมาจากการเคลือบอะลูมิเนียม) จะต้องทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์ให้มีสภาพเป็นสุญญากาศ เป็นเวลาติดต่อกันประมาณ 2 วัน เพื่อทำความสะอาดระบบ และเป็นการปรับระบบให้เข้าสู่สภาวะสมดุลสำหรับงานเคลือบวัสดุชนิดใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากมีระบบสปัดเตอร์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเพียงเครื่องเดียว นอกจากนี้ ก่อนที่จะเคลือบชิ้นงานจริงต้องทำการสปัดเตอร์แผ่นเป่าโดยไม่ต้องใส่ชิ้นงานเป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง เพื่อปรับสมดุลให้กับแผ่นเป่าด้วยเช่นกัน โดยมีข้อสังเกตว่า ช่วงแรกๆ ของการสปัดเตอร์ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมหัวแมกนีตรอน (ส่วนที่วางแผ่นเป่าสารเคลือบ) จะมีค่าต่ำประมาณ -320 ถึง -340 โวลต์ ซึ่งแสดงว่าแผ่นเป่ายังไม่พร้อมที่จะใช้ในการเคลือบชิ้นงานจริง เพราะจะทำให้ได้ฟิล์มที่ไม่มีคุณสมบัติทางเปียโซอิเล็กทริกดีพอ จึงควรจะต้องเปิดและปิดกระแสไปเรื่อยๆ หลายๆ ครั้งๆ ละประมาณ 10 นาที ที่ระดับกระแสประมาณ 120 มิลลิแอมป์ จนขนาดแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึง -380 โวลต์ แผ่นเป่าจึงพร้อมที่จะใช้งานได้ เมื่อแผ่นเป่าถูกใช้งานไปนานๆ แรงดันตกคร่อมจะยิ่งเพิ่มขนาดมากขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงระดับ -520 โวลต์ ซึ่งจะทำให้ได้ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบบปรับตัวสู่สภาวะสมดุลที่เหมาะสมกับการเคลือบซิงค์ออกไซด์มากขึ้น

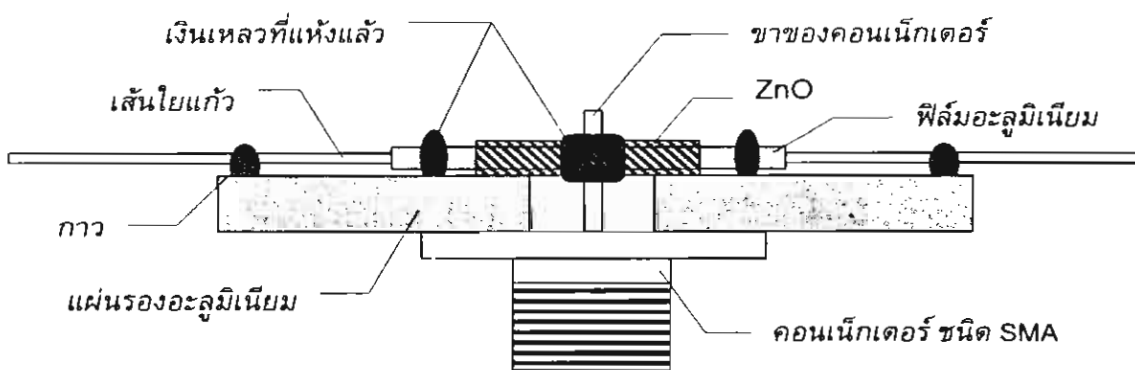
ในการเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์จะกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับออกซิเจนที่ความดันบรรยากาศประมาณ 32 มิลลิทอร์ โดยจะต้องทำการสปัดเตอร์ก่อนเช่นเดียวกับกระบวนการเคลือบอะลูมิเนียม ในขณะที่เคลือบซิงค์ออกไซด์ จะป้อนไฟให้กับระบบด้วยค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ -440 ถึง -520 โวลต์ ขึ้นกับสภาพของแผ่นเป่า ด้วยค่ากระแสประมาณ 135 มิลลิแอมป์ เป็นเวลาประมาณ 4-10 ชั่วโมง ขึ้นกับความหนาของฟิล์มที่ต้องการ โดยระบบที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์นี้ มีอัตราการเคลือบฟิล์มประมาณ 500 นาโนเมตรต่อชั่วโมง เมื่อเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์เสร็จ ต้องทำการอบอ่อน (annealing) ภายใต้บรรยากาศเช่นเดียวกับขั้นตอนการสปัดเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วต่อด้วยการอบอ่อนภายใต้สุญญากาศเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง 30 นาที ก่อนจะนำออกมาจากแชมเบอร์ อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่า หากทำการอบอ่อนภายใต้บรรยากาศสุญญากาศเป็นระยะเวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ขึ้นไป จะทำให้ได้ทรานสดิวเซอร์ที่มีโครงสร้างทางกายภาพที่แข็งแรงมากขึ้น ไม่เปราะและแตกหักง่าย โดยสรุปแล้ว ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองเคลือบซิงค์ออกไซด์ เป็นดังนี้

- แผ่นซิงค์บริสุทธิ์ 99.95 เปอร์เซ็นต์
- ระยะห่างระหว่างเส้นใยแก้วกับแผ่นเป่า 4 เซนติเมตร
- ความดันแบคกราวด์น้อยกว่า 3×10^{-6} ทอร์
- ความดันบรรยากาศภายใต้ก๊าซผสมขณะเคลือบ 24-36 มิลลิทอร์
- อัตราส่วนผสมก๊าซอาร์กอนต่อออกซิเจนเป็น 20% ต่อ 80%
- กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นเป่า 135 มิลลิแอมป์
- แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะสปัดเตอร์ -450 โวลต์
- ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนขณะเคลือบฟิล์ม 20 มิลลิทอร์
- เวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม 4-8 ชั่วโมง
- อัตราการเคลือบฟิล์ม 500 นาโนเมตรต่อชั่วโมง
- ระยะเวลาอบอ่อนภายใต้สภาพบรรยากาศเช่นเดียวกับการสปัดเตอร์ 30 นาที
- ระยะเวลาอบอ่อนภายใต้สุญญากาศ 90 นาที

3.3 การประกอบทรานสดิวเซอร์กับคอนเน็กเตอร์

ในการสร้างทรานสดิวเซอร์เส้นใยแก้ว ขั้นตอนแรกจะต้องเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมบนผิวเส้นใยแก้ว สำหรับเป็นชั้นอิเล็กโทรดด้านใน จากนั้นจะเคลือบซิงค์ออกไซด์ลงบนอะลูมิเนียม แล้วทำการเคลือบอะลูมิเนียมบนซิงค์ออกไซด์เป็นชั้นสุดท้ายเพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดด้านนอก ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณเกือบสัปดาห์ ในการสร้างทรานสดิวเซอร์ที่สมบูรณ์เพียงตัวเดียว ทั้งนี้กระบวนการทั้งหมดต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีปัญหาในการทำงานเลย ซึ่งจะเห็นว่าต้องใช้เวลามากมาย อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการสร้าง ในขั้นต้นจะไม่มี การเคลือบอะลูมิเนียมสำหรับอิเล็กโทรดด้านนอก แต่จะใช้เงินเหลว (silver paint) แฉกทรานสดิวเซอร์ตรงส่วนของ ชั้นฟิล์มซิงค์ออกไซด์เข้ากับขาของคอนเน็กเตอร์ โดยเงินเหลวเมื่อแห้งแล้ว ไม่เพียงแต่จะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เชื่อมทรานสดิวเซอร์เข้ากับคอนเน็กเตอร์เท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดด้านนอกอีกด้วย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการใช้เงินเหลวเป็นอิเล็กโทรดด้านนอก จะช่วยทำให้การทำงานง่ายขึ้น แต่ก็ทำให้ประสิทธิภาพการคับปลิงพลังงานของทรานสดิวเซอร์ลดลงด้วย ดังนั้น เมื่อทำการทดลองจนแน่ใจถึงพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเคลือบซิงค์ออกไซด์ เพื่อให้ได้คุณสมบัติการเป็นเปียโซอิเล็กทริกแล้ว ก็จะเพิ่มขั้นตอนการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมบนผิวของซิงค์ออกไซด์เพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดด้านนอกในที่สุด

การประกอบทรานสดิวเซอร์เส้นใยแก้วเข้ากับคอนเน็กเตอร์ (device mounting) มีลักษณะโครงสร้างแสดง ดังรูปที่ 5 โดยจะใช้คอนเน็กเตอร์ไมโครเวฟชนิด SMA ยึดติดกับแผ่นอะลูมิเนียมบาง (ทำหน้าที่เป็นฐานรองอุปกรณ์) ที่เจาะรูให้ขาของคอนเน็กเตอร์ยื่นออกมาได้ จากนั้นนำทรานสดิวเซอร์ที่ได้มาวางลงบนแผ่นอะลูมิเนียมนี้ โดยจัดวาง ให้ส่วนของซิงค์ออกไซด์ (ในกรณีที่ไม่ได้เคลือบฟิล์มอิเล็กโทรดด้านนอก) วางพาดลงบนขาของคอนเน็กเตอร์ จากนั้น แฉกด้วยเงินเหลบบนชั้นฟิล์มซิงค์ออกไซด์เข้ากับขาของคอนเน็กเตอร์ ส่วนของเงินเหลวเมื่อแห้งแล้วจะทำหน้าที่เป็น อิเล็กโทรดด้านนอก ซึ่งจะต้องกำหนดให้ทรานสดิวเซอร์มีความยาวอยู่ระหว่าง 1-3 มม. และจะต้องทำให้ชั้นเคลือบ ของเงินมีความหนาให้น้อยที่สุด ในขณะเดียวกันก็ใช้เงินเหลวแฉกส่วนของอิเล็กโทรดด้านในเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อทำหน้าที่เป็นกราวด์ (ground) แผ่นอะลูมิเนียมบางที่ใช้เป็น Housing นี้ จะต้องครอบคลุมส่วนของเส้นใยแก้ว เปลือย จะได้ติดกาวบนส่วนของเส้นใยแก้วที่ยังมีโค้ตติงอยู่เข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมได้ เพื่อยึดติดทรานสดิวเซอร์ให้ แข็งแรง สามารถจับถือได้โดยไม่เกิดอันตรายต่ออุปกรณ์ ในกรณีของทรานสดิวเซอร์ที่มีการเคลือบอะลูมิเนียมเป็นอิ เล็กโทรดด้านนอก จะใช้กาวเงินแฉกเพียงเล็กน้อยระหว่างอิเล็กโทรดกับขาของคอนเน็กเตอร์ ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ ในการเชื่อมต่อตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น



รูปที่ 11 โครงสร้างในการประกอบทรานสดิวเซอร์เข้ากับคอนเน็กเตอร์ไมโครเวฟแบบ SMA

4. การทดลองและทดสอบอุปกรณ์

4.1 การทดลองหาสภาพก๊าซผสมที่เหมาะสม

เนื่องจากกระบวนการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิดใช้เวลาพอสมควรสำหรับแต่ละชิ้นงาน อีกทั้งในการเปลี่ยนแปลงกระบวนการระหว่างการเคลือบอะลูมิเนียมกับการเคลือบซิงค์ออกไซด์ ยังต้องเสียเวลาในการปรับสมดุลของระบบอีกหลายวัน ในโครงการนี้จึงจัดการเคลือบฟิล์มแต่ละชนิดเป็นช่วงๆ ละประมาณ 3-4 เดือน โดยแต่ละช่วงจะเคลือบชิ้นงานด้วยฟิล์มบางของวัสดุเพียงประเภทเดียวเป็นจำนวนหลายๆ ชิ้นงาน โดยปกติ การเคลือบอะลูมิเนียมให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีคุณสมบัติตามต้องการมักจะไม่มีปัญหา ในขณะที่การเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์จะประสบปัญหามาก เพราะแม้ว่าจะได้ชั้นฟิล์มที่เป็นซิงค์ออกไซด์ แต่ก็ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติความเป็นเปียโซอิเล็กทริกตามต้องการได้ เนื่องจากโครงสร้างของผลึกมีการจัดเรียงตัวไม่ดี ไม่จัดเป็นแท่งในแนวตั้งฉากกับเส้นใยแก้ว จึงต้องทำการทดลองในสภาพแวดล้อมหลายๆ แบบ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเคลือบ แล้วบันทึกหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ปัญหาในทางปฏิบัติที่มักพบในกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์บนเส้นใยแก้วอีกประการหนึ่งก็คือ เมื่อทำการเคลือบชั้นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ลงไปบนฟิล์มอะลูมิเนียมที่อยู่บนผิวเส้นใยแก้ว ชั้นฟิล์มของซิงค์ออกไซด์จะเกิดความเค้นภายใน (internal stress) สูงมาก และเมื่อนำชิ้นงานออกมาจากแชมเบอร์สุญญากาศ แผ่นฟิล์มซิงค์ออกไซด์จะค่อยๆ หลุดร่อนออกมาเป็นสะเก็ดทีละนิด จนกระทั่งชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมชั้นล่างที่ถูกชั้นฟิล์มซิงค์ออกไซด์เคลือบทับหลุดตามไปด้วยจนหมด ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาจะใช้การให้ความร้อนแก่เส้นใยแก้วในขณะที่เคลือบเพื่อช่วยลดความเค้น นอกจากนี้ชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบบนผิวเส้นใยแก้ว จะต้องเป็นชั้นฟิล์มบริสุทธิ์ที่มีคุณภาพสูง จากการทดลองพบว่า ฟิล์มอะลูมิเนียมที่มีคุณภาพดี จะต้องไม่มีสีของฟิล์มใสแวววาว ถ้าสีขุ่นเหลืองแสดงว่ามีสิ่งปลอมปน และถ้าสีขุ่นเทาแสดงว่าฟิล์มที่ได้ไม่ใช่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่จะเกิดเป็นสารประกอบของออกไซด์ สำหรับเงื่อนไขที่จะกำหนดความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มบนผิวเส้นใยแก้ว ได้แก่ ความสะอาดของชิ้นงานและระบบเคลือบ และสภาพแวดล้อมขณะเคลือบหรือสภาพการผสมของก๊าซที่เรากำลังให้ความสนใจอยู่ในที่นี้นั่นเอง

เป้าหมายหนึ่งของงานวิจัยนี้คือ การเคลือบซิงค์ออกไซด์บนผิวเส้นใยแก้วให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริก โดยไม่มีการให้ความร้อนกับเส้นใยแก้วในขณะสเป็คเตอริง ซึ่งจากการทดลองในโครงการนี้พบว่า คุณสมบัติของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่แสดงความเป็นเปียโซอิเล็กทริก ขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศของระบบในสองลักษณะ คือ

- (1) ความดันบรรยากาศก่อนปล่อยก๊าซเข้าสู่แชมเบอร์ (background pressure) เพื่อทำการสเป็คเตอริง และ
- (2) ความดันบรรยากาศขณะทำการสเป็คเตอริง

โดยสภาพสุญญากาศหรือความดันบรรยากาศที่เหมาะสมก่อนปล่อยก๊าซเข้าแชมเบอร์ในกระบวนการเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์จะอยู่ในช่วง 10^{-6} - 10^{-7} ทอรร์ ถ้าสูงเกินไป (เกินกว่า 30 ไมโครปรอท) จะทำให้เม็ดเกรนมีขนาดใหญ่ (ดังจะได้ในกล่าวรายละเอียดต่อไป) นอกจากนี้ การดูดอากาศออกจากแชมเบอร์สุญญากาศก่อนการเคลือบให้ได้ความดันบรรยากาศต่างๆ จะเป็นการกำจัดสิ่งปลอมปน และลด contamination ในแชมเบอร์ ให้ลดลงตามไปด้วย ความดันบรรยากาศขณะทำการสเป็คเตอริงควรจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1-100 มิลลิทอรร์ ขึ้นอยู่กับโหมดของฟิล์มที่ต้องการ และกำลังงานไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับหัวแมกนีตรอน อย่างไรก็ตาม การปรับความดันบรรยากาศที่เหมาะสมขณะทำการสเป็คเตอริงเพียงอย่างเดียว ไม่เพียงพอที่จะทำให้ประสบความสำเร็จในกระบวนการเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ แต่จะต้องสัมพันธ์กับอัตราส่วนของก๊าซผสม และอัตราการไหลของก๊าซแต่ละชนิดด้วย

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] การเคลือบซิงค์ออกไซด์กระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน 100% แต่ต้องมีการให้ความร้อนกับเส้นใยแก้ว สำหรับโครงการนี้ เลือกใช้ก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซออกซิเจน ในอัตราส่วน อาร์กอน 20% ต่อ ออกซิเจน 80% [9,10] ซึ่งเหมาะสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบแบบดีซีพลาสมาแมกนีตรอนสเป็คเตอริงที่ใช้ในโครงการ อย่างไรก็ตาม การปรับอัตราไหลของก๊าซให้ได้อัตราส่วนก๊าซผสมที่ต้องการ มีผลต่อคุณภาพของฟิล์มซิงค์ออกไซด์โดยตรง ทั้งนี้ การปรับอัตราไหลของก๊าซผสมเพื่อให้ได้ความดันบรรยากาศของก๊าซผสมที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของแชมเบอร์สุญญากาศ และอัตราเร็วในการดูดอากาศของระบบ (ขึ้นอยู่กับปั๊ม) เมื่อทำการทดลองปรับอัตราการไหลของก๊าซทั้งออกซิเจนและอาร์กอน ให้มีค่าความดันบรรยากาศของก๊าซผสมทั้งสองชนิดเปลี่ยนจาก 26 ถึง 34 มิลลิทอรร์ แล้วทำการวัดค่าความต้านทานไฟตรงของชั้นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ จะได้ผลการทดลองที่น่าสนใจ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองเมื่อปรับอัตราไหลของก๊าซที่ต่างกัน

ตัวอย่างที่	O ₂ : Ar	อัตราการไหล O ₂ : Ar (sccm)	ความดันผสม (มิลลิทอร์)	เวลาเคลือบ (ชั่วโมง)	ความต้านทาน (เมกกะโอห์ม)
1	80 : 20	130 : 105	26	5	5
2	80 : 20	135 : 108	28	5	14
3	80 : 20	140 : 112	30	5	28
4	80 : 20	150 : 120	32	5	45
5	80 : 20	160 : 136	34	5	60

หมายเหตุ sccm = standard cubic centimetre per minute

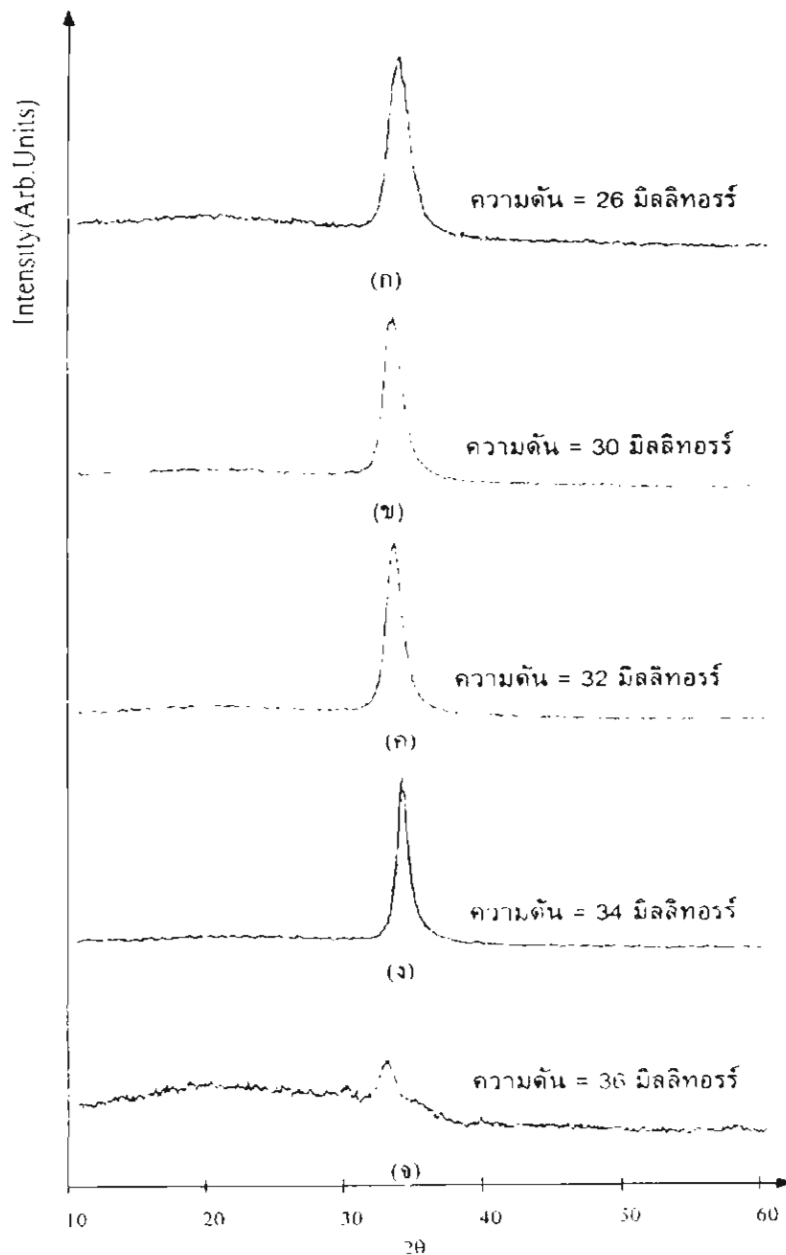
ในตารางที่ 1 เป็นผลการทดลองเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนและอาร์กอนที่ค่าต่างๆ โดยยังคงสภาพการผสมของก๊าซทั้งสองให้มีอัตราส่วนคงที่เสมอ คือ อาร์กอน 20% ต่อ ออกซิเจน 80% ค่าความต้านทานไฟกระแสดรของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในบรรยากาศผสมระหว่างก๊าซออกซิเจนและอาร์กอนจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนเพิ่ม และจะเพิ่มตามปริมาณของออกซิเจนอย่างหยาบๆ ค่าความต้านทานนี้ ช่วยบอกคุณสมบัติของชั้นฟิล์มว่ามีความเป็นโลหะมากน้อยเพียงไร โดยที่ความต้านทานน้อยๆ แสดงถึงชั้นฟิล์มที่ยังคงสภาพโหมดความเป็นโลหะของซิงค์อยู่ ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ดีควรมีค่าความต้านทานทางไฟตรงสูงหลายสิบบเมกกะโอห์มขึ้นไป อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 1 ถือว่าชั้นฟิล์มที่ได้อยู่ในโหมดของสารประกอบออกไซด์แล้ว

จากข้อมูลในตารางนี้แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าอัตราส่วนผสมของก๊าซทั้ง 2 ชนิดจะคงที่ แต่เมื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซทั้งสองจนความดันผสมเปลี่ยนไป ก็จะส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มที่เคลือบทันที ซึ่งเมื่อนำฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ไปทำการวัดหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ S11 ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายทางไมโครเวฟ (microwave network analyzer) จะพบว่าไม่เกิดการเรโซแนนซ์ และเมื่อทำการทดสอบตัวอย่างที่ เหลือพบว่า ซิงค์ออกไซด์ของตัวอย่างที่ 4 เกิดการเรโซแนนซ์ที่แรงกว่าตัวอย่างที่ 5 ดังนั้น ในเบื้องต้นพอสรุปได้ว่าการเคลือบฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ความดันผสมของก๊าซตั้งแต่ 32 มิลลิทอร์ขึ้นไป จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ดีมีคุณสมบัติทางเปียโซอิเล็กทริก และยังช่วยให้ชั้นฟิล์มมีค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงสูงอีกด้วย

ในการเคลือบฟิล์มที่มีคุณสมบัติเป็นออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศต่างๆ จะต้องใช้กำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวแมกนีตรอนในระดับ 100-200 วัตต์ ซึ่งในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริ่ง จะใช้อัตราส่วนผสมก๊าซออกซิเจน 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อ อาร์กอน 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเคลือบแบบระนาบไฟตรงหรือดีซีพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริ่งในที่นี้ จะใช้อัตราส่วนผสมก๊าซออกซิเจน 80 เปอร์เซ็นต์ ต่อ อาร์กอน 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีผลให้ความต้านทานไฟกระแสดรของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบแบบดีซีพลาสมาแมกนีตรอนสปัตเตอริ่งมีค่าสูงอยู่ในระดับหลายสิบบเมกกะโอห์ม เพราะฟิล์มที่มีส่วนประกอบของออกซิเจนมากจะมีความต้านทานสูง

4.2 การตรวจสอบระนาบการจัดเรียงตัวของอนุภาคในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

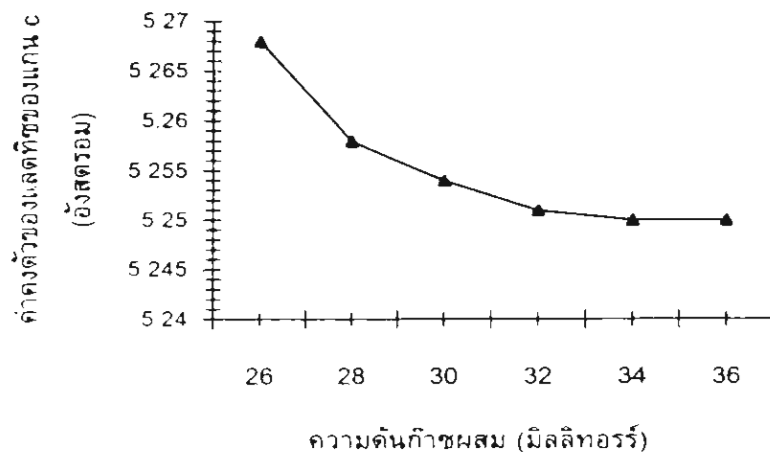
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการผลิตทรานสดิวเซอร์ จะต้องมีโครงสร้างของผลึกเป็นแบบแท่ง (columnar) และมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคในระนาบ (002) ซึ่งขนานกับผิวของแผ่นรองรับ การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบแบบแผนของอนุภาคจะทำให้เกิดเป็นระนาบที่มีระเบียบและห่างกันสม่ำเสมอ ระนาบนี้จะประพฤติตัวเป็นเกรตติง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามสมการของแบรกก์ $2d \sin \theta = n\lambda$ (โดยทั่วไปรังสีเอกซ์ที่ใช้ในทดสอบการเลี้ยวเบนจะกำหนดมาจากหลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้ทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) เป็นเป้า ซึ่งจะให้กำเนิดรังสีเอกซ์ที่มี



รูปที่ 12 แบบแผน XRD ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ที่เคลือบในความดันผสม (ก) 26 (ข) 30 (ค) 30 (ง) 34 และ (จ) 36 มิลลิทอร์

ความยาวคลื่นประมาณ 153.9 พิกะเมตร) ในงานวิจัยนี้ได้นำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ในความดันผสมตั้งแต่ 26-36 มิลลิทอร์ ไปตรวจสอบการจัดเรียงตัวของอนุภาค ด้วยเครื่องเอกเรย์ดิฟแฟกชันสเปกโตรมิ (X-ray diffractometer: XRD) ของบริษัทฟิลลิปส์ รุ่น PW1830 จากการตรวจสอบพบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในความดันบรรยากาศของก๊าซผสมทุกค่า มียอดของความเข้มเกิดขึ้นที่มุมประมาณ 34.0° ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในช่วงความดันผสม 26-30 มิลลิทอร์ จะมียอดของความเข้มที่กว้าง แสดงว่าเม็ดเกรนมีขนาดเล็กส่วนยอดความเข้มของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในความดันผสม 32 มิลลิทอร์ จะเริ่มแคบลงและมีขนาดแคบที่สุดสำหรับฟิล์มบางที่เคลือบในความดันผสม 34 มิลลิทอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดเกรนมีขนาดใหญ่ ส่วนฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในความดันผสม 36 มิลลิทอร์ จะมียอดความเข้มต่ำที่สุด แต่ก็มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคในระนาบ (002) เหมือนกับตัวอย่างอื่นเช่นกัน จากข้อมูลที่ได้ยังพบว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในช่วงความดันผสมต่ำๆ (26-30 มิลลิทอร์) จะมีค่า 2θ เข้าใกล้ 34.0° และมีค่าคงตัวของแลตทิซ (lattice) ของ

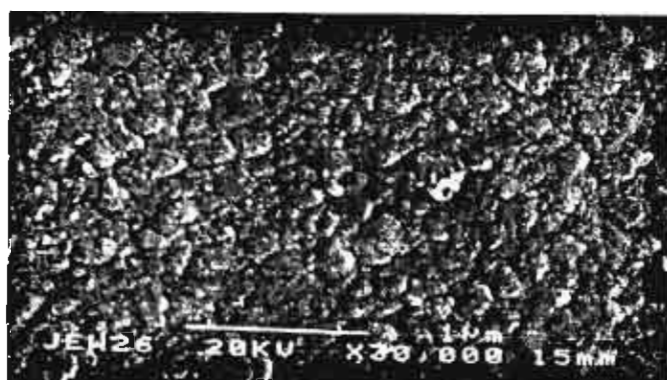
แกน c เบี่ยงเบนไปสูงถึง 1.3 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 13 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากทดสอบกับผงซิงค์ออกไซด์ซึ่งมีค่า $2\theta = 34.35^\circ$ $d = 2.602 \text{ \AA}$ และ $c = 2d = 5.20 \text{ \AA}$ ตามลำดับ ค่าคงตัวของแลตทิซของแกน c ที่เพิ่มขึ้นนี้ เป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคที่กระหน่ำชนฟิล์มบางขณะก่อตัวมีพลังงานสูง แล้วถ่ายเทพลังงานดังกล่าวให้กับอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ให้จับตัวกันแน่น ซึ่งจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวและทำให้เกิดความเค้นในฟิล์ม (intrinsic stress) มากขึ้น แต่เมื่อความดันผสมเพิ่มขึ้นมุม 2θ จะเข้าใกล้ 34.35° ยิ่งขึ้น แสดงว่าความเครียด (strain) ลดลงเนื่องมาจากที่ความดันบรรยากาศก๊าซผสมสูงๆ อนุภาคที่วิ่งมาถึงแผ่นรองรับจะมีพลังงานลดลง (เพราะเกิดการชนกับอนุภาคอื่นๆ ในแชมเบอร์สุญญากาศ) และค่าคงตัวของแลตทิซของแกน c ที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่าความเค้นในฟิล์มลดลงตามไปด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่า ความเครียดในแลตทิซจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันผสมในการเคลือบฟิล์มให้มากขึ้น



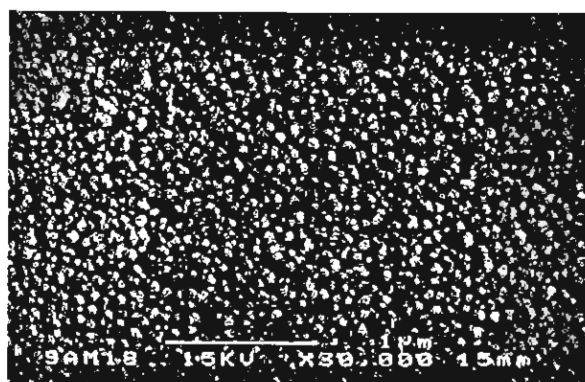
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันผสมและค่าคงตัวแลตทิซของแกน c ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

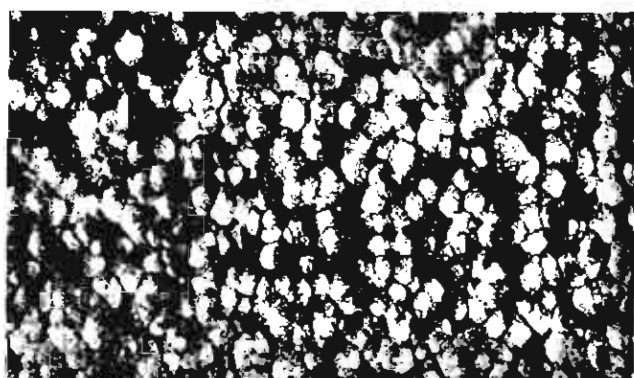
นอกเหนือจากการตรวจสอบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แล้ว การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ก็เป็นสิ่งจำเป็นอีกอย่างหนึ่ง เนื่องจากจะทำให้เห็นลักษณะผิวหน้า เม็ดเกรน โครงสร้างภาคตัดขวาง และความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับฟิล์ม จากการตรวจสอบพบว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในความดันบรรยากาศผสมต่างๆ (26-30 มิลลิทอร์) จะมีเม็ดเกรนที่ไม่เป็นระเบียบและโครงสร้างภาคตัดขวางของผลึกจะไม่มีลักษณะเป็นแท่ง (columnar) ดังผลที่ได้แสดงในรูปที่ 14 (ก) และรูปที่ 15 (ก) ส่วนผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบภายใต้ส่วนผสมของก๊าซที่มีความดัน 32 และ 34 มิลลิทอร์ จะมีลักษณะผิวของฟิล์มเรียบและมีโครงสร้างผลึกภาคตัดขวางเป็นแท่งตั้งฉากกับผิวของเส้นใยแก้วดังรูปที่ 14 (ข), (ค) และรูปที่ 15 (ข), (ค) ในกรณีที่ปรับอัตราการไหลของก๊าซมากไปจนความดันบรรยากาศก๊าซผสมมีค่าตั้งแต่ 36 มิลลิทอร์ ขึ้นไป ฟิล์มที่ได้จะมีขนาดเม็ดเกรนที่ไม่เป็นระเบียบ โครงสร้างผลึกในภาคตัดขวางจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและไม่เป็นแท่ง ดังรูปที่ 14 (ง) และรูปที่ 15 (ง) จากผลการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ความดันบรรยากาศของก๊าซผสมระหว่างก๊าซออกซิเจนและก๊าซอาร์กอนขณะเคลือบฟิล์มบางส่งผลอย่างยิ่งต่อคุณลักษณะทางกายภาพของฟิล์มซิงค์ออกไซด์สำหรับกระบวนการสร้างทรานซิสเตอร์ความถี่สูง โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มี การให้ความร้อนเพื่อลดความเค้นที่เกิดขึ้น



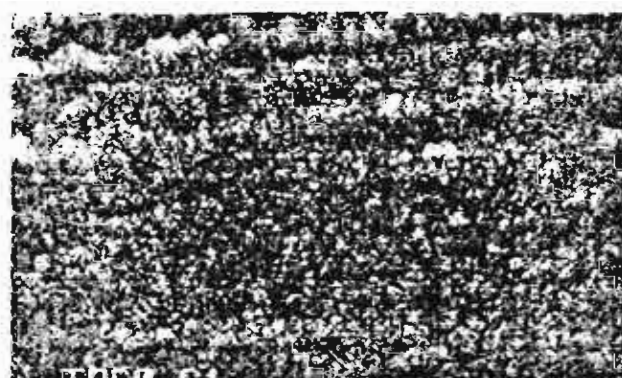
(ก) 26 มิลลิทอร์



(ข) 32 มิลลิทอร์



(ค) 34 มิลลิทอร์



(ง) 36 มิลลิทอร์

รูปที่ 14 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบภายใต้ความดันบรรยากาศก๊าซผสมที่ค่าต่างๆ



(ก) 26 มิลลิทอร์



(ข) 32 มิลลิทอร์



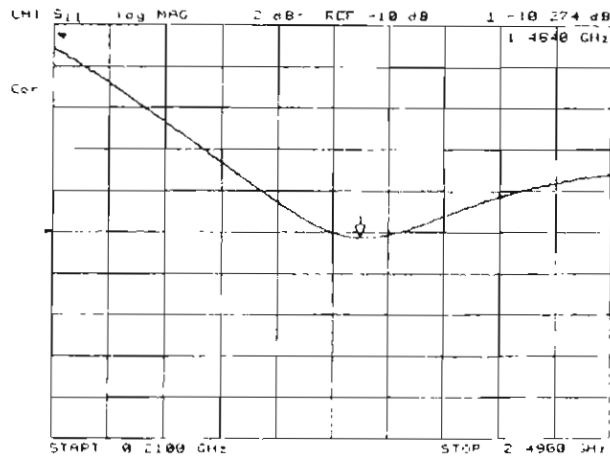
(ค) 34 มิลลิทอร์



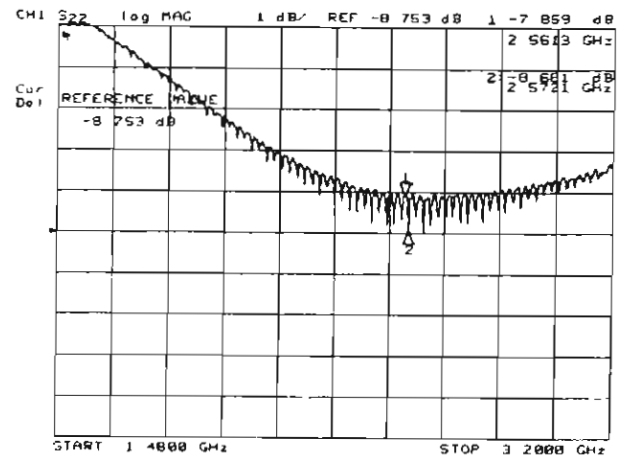
(ง) 36 มิลลิทอร์

รูปที่ 15 ภาพถ่าย SEM ด้านตัดขวางของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ ที่เคลือบภายใต้ความดันบรรยากาศก๊าซผสมที่ค่าต่างๆ

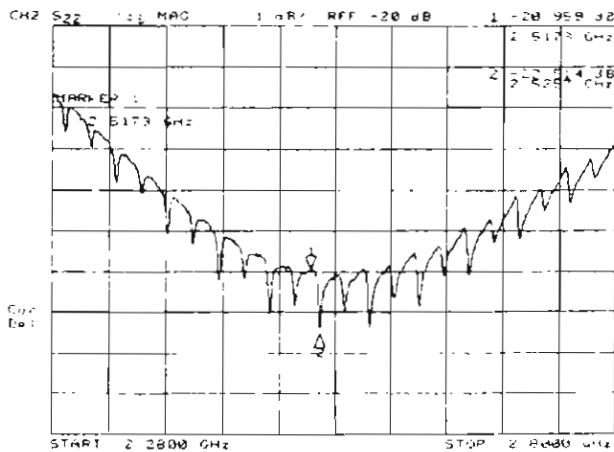
4.3 การตรวจสอบการเกิดคลื่นนิ่งของทรานสดิวเซอร์



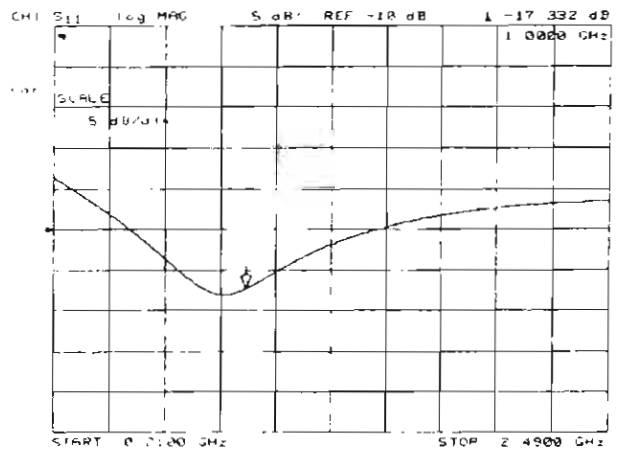
(ก) 26 มิลลิทอร์



(ข) 32 มิลลิทอร์



(ค) 34 มิลลิทอร์

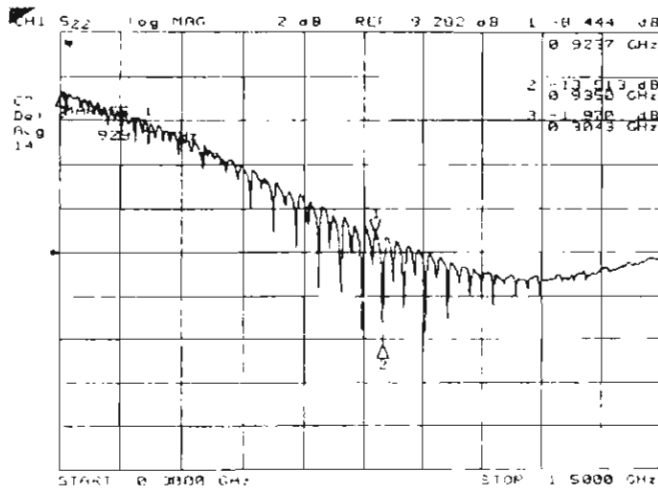


(ง) 36 มิลลิทอร์

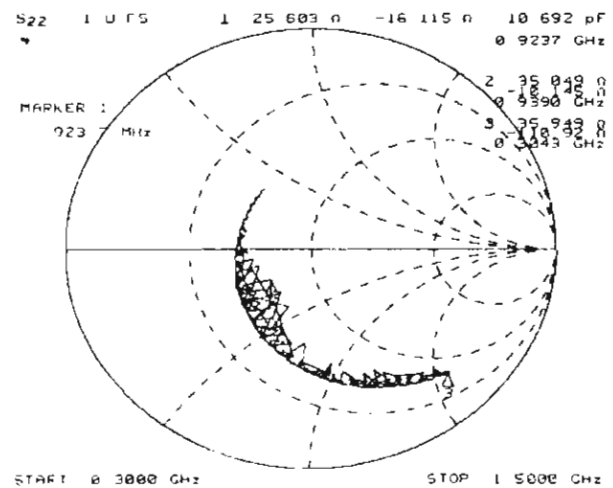
รูปที่ 16 กราฟการสูญเสียย้อนกลับ S11 ของทรานสดิวเซอร์ที่เคลือบภายใต้ความดันบรรยากาศก๊าซผสมที่ค่าต่างๆ

ในอุปกรณ์จำพวกอะคูสติกโพรเพกส์ทั่วไป มักจะหลีกเลี่ยงการเกิดคลื่นนิ่ง (standing wave) โดยใช้วัสดุดูดซับ (absorber) ที่ปลายอีกด้านหนึ่งตรงข้ามกับทรานสดิวเซอร์ แต่ในงานวิจัยนี้โครงสร้างของอุปกรณ์จะทำให้เกิดคลื่นนิ่งซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการประยุกต์ใช้เป็นมอดูเลเตอร์ทางเฟสของแสงในเส้นใยแก้ว [5] ดังนั้น ในการตรวจสอบการทำงานของทรานสดิวเซอร์ จะนำเส้นใยแก้วที่เคลือบฟิล์มบางทั้ง 3 ชั้นเรียบร้อยแล้ว ไปเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์แบบ SMA โดยใช้เงินเหลวเติมหัวไฟฟ้าด้านในให้ติดกับแผ่นฐานอลูมิเนียม และเติมหัวไฟฟ้าด้านนอกให้ติดกับหัวของคอนเนคเตอร์ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3 จากนั้นจะนำไปวัดการเกิดคลื่นนิ่งของทรานสดิวเซอร์ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้ารุ่น HP8720C โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของทรานสดิวเซอร์ จากขนาดความพลัว (ripple) ของ S11 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ และการเชื่อมต่อทรานสดิวเซอร์เข้ากับคอนเนคเตอร์ อุปกรณ์ที่ถูกทดสอบจะถูกออกแบบความหนาของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ให้อยู่ระหว่าง 2-5 ไมครอน เพื่อให้ทรานสดิวเซอร์ทำงานอยู่ในช่วงความถี่ไมโครเวฟระหว่าง 1000 ถึง 3000 เมกกะเฮิร์ตซ์ จากการทดลองพบว่า ทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตจากฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบในความดันผสมระหว่าง 26 ถึง 30 มิลลิทอร์ รวมทั้งในช่วงความดันบรรยากาศก๊าซผสมตั้งแต่ 36 มิลลิทอร์ขึ้นไป จะไม่เกิดคลื่นนิ่งเมื่อนำไปวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายไฟฟ้า ดังผลที่ได้ในรูปที่ 16 (ก) และ (ง) หรือในทำนองเดียวกันสามารถกล่าวได้ว่า ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่

เคลือบได้ไม่มีคุณสมบัติทางเปียโซอิเล็กทริก ในขณะที่ทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตจากฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เคลือบในความดันบรรยากาศก๊าซผสมระหว่าง 32-34 มิลลิทอร์ จะแสดงปรากฏการณ์คลื่นนิ่ง ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 16 (ข) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตจากฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เคลือบในความดันผสม 32 มิลลิทอร์ จะพบว่ามีขนาดความพลัวของการสูญเสียย้อนกลับ (ΔS_{11}) 0.82 dB รูปที่ 16 (ค) เป็นผลที่ได้จากการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตจากฟิล์มบางซิงโครไดต์ที่เคลือบในความดันผสม 34 มิลลิทอร์ ซึ่งจะเห็นว่ามีขนาดความพลัวของการสูญเสียย้อนกลับ 1.55 dB เมื่อทดลองปรับเวลาเคลือบให้ได้ความหนาของฟิล์มบางซิงโครไดต์สำหรับผลิตความถี่ที่ทำงานอยู่ในช่วง 1 กิกะเฮิรตซ์ โดยทำการเคลือบภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซผสมที่ 34 มิลลิทอร์ จะพบว่าขนาดความพลัวของการสูญเสียย้อนกลับมีค่าสูงถึง 5.069 dB ดังแสดงในรูปที่ 17



(ก)



(ข)

รูปที่ 17 (ก) กราฟการสูญเสียย้อนกลับ S_{11} และ (ข) อินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานสดิวเซอร์ที่เคลือบฟิล์มภายใต้ความดันบรรยากาศก๊าซผสมที่ 34 มิลลิทอร์

5. สรุปและวิจารณ์

โครงการวิจัยนี้ ได้นำเสนอการศึกษาและทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มบนเส้นใยแก้วเพื่อสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูง สำหรับการใช้งานเป็นมอดูเลเตอร์ทางเฟสของแสง โดยไม่มีการให้ความร้อนในกระบวนการ เพื่อทำให้ได้ทรานสดิวเซอร์ที่แข็งแรงและไม่เปราะหักง่ายเมื่อนำไปใช้งาน จากการศึกษาพบว่าการเคลือบฟิล์มอะลูมิเนียมไม่ค่อยมีปัญหามากนัก แม้ว่าจะกระทำภายใต้ระบบสเปคโตริงเพียงระบบเดียวก็ตาม โดยการเคลือบอะลูมิเนียมจะกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนอย่างเดียวที่ความดันประมาณ 22 มิลลิทอร์ ในขณะที่การเคลือบฟิล์มบางซิงโครไดต์ โดยไม่มีการให้ความร้อนขณะเคลือบ จะกระทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนในอัตราส่วน 80% ต่อ 20% โดยความดันบรรยากาศก๊าซผสมที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์มซิงโครไดต์คือ 32-34 มิลลิทอร์ เมื่อปรับเวลาเคลือบฟิล์มบางซิงโครไดต์ให้ชั้นฟิล์มมีความหนาอยู่ระหว่าง 2-5 ไมครอน เพื่อให้ทรานสดิวเซอร์ทำงานในช่วงความถี่ระหว่าง 1000-3000 เมกะเฮิรตซ์ จากการศึกษาวิจัย สามารถสร้างทรานสดิวเซอร์ที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง โดยวัดจากขนาดความพลัวของการสูญเสียย้อนกลับที่ได้อาศัยอยู่ในช่วง 1-5 dB ซึ่งถือเป็นผลลัพธ์ที่น่าพอใจ เพราะมีค่าสูงกว่าที่เคยมีการรายงานมา อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตทรานสดิวเซอร์แต่ละตัว จะใช้เวลาค่อนข้างมาก อีกทั้งมีอัตราส่วนในการประสบผลสำเร็จที่ค่อนข้างต่ำ จากการทดลองในช่วงเวลาประมาณ 2 ปี ที่ผ่านมา ได้ทำการทดลองกับเส้นใยแก้วไม่ต่ำกว่า 1000 ตัวอย่าง แต่สามารถประสบผลสำเร็จในการเคลือบฟิล์มซิงโครไดต์ที่มีคุณสมบัติเปียโซอิเล็กทริกเพียงประมาณ 50 ชิ้นงาน ซึ่งถือเป็นอัตราการประสบผลสำเร็จเพียงแค่ 5% เท่านั้น ซึ่งทั้งนี้คาดว่าสาเหตุหลักเกิดจากการใช้งานระบบสเปค

เตอร์จึงเพียงเครื่องเดียวที่ต้องใช้เคลือบทั้งอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์ อีกทั้งซิงค์มักจะทำให้ระบบเกิด contamination อยู่เสมอ เมื่อต้องเปลี่ยนสารเคลือบไปเป็นอย่างอื่น อย่างไรก็ตาม หากกระบวนการสร้างทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วนี้ กระทำภายใต้ระบบสเปคเตอร์ที่แยกออกจากกันแล้ว เชื่อว่าอัตราการประสบผลสำเร็จจะเพิ่มขึ้นมากหลายสิบเท่าเลยทีเดียว

นอกจากนี้ โครงการวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของทฤษฎี ในการนำทรานสดิวเซอร์เส้นใยแก้วไปประยุกต์ใช้งานเป็น Optical Fiber Frequency Decoder (OFD) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของความหนาของชั้นฟิล์มอิเล็กโตรด ต่อการทำงานของ OFD ซึ่งจากผลการจำลองระบบพบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มอิเล็กโตรดทำให้เกิดการเลื่อนของความถี่ทำงานของอุปกรณ์ ตั้งแต่ไม่กี่เมกะเฮิรตซ์จนถึงหลายสิบบิกะเฮิรตซ์ โดยอิเล็กโตรดด้านนอกจะส่งผลมากกว่าอิเล็กโตรดด้านใน

การประยุกต์ใช้งานทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว โดยการควบคุมการเปลี่ยนแปลงเฟสของแสงภายในเส้นใยแก้วเป็นเรื่องที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง โครงการนี้ได้แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างในการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ OFD เป็นต้น นอกจากนี้ เรายังมีแนวความคิดที่จะนำทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้วนี้ ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับเกรตติงเส้นใยแก้ว (Fiber Grating) หรือการนำไปใส่ไว้ในเอทาลอนเส้นใยแก้ว (Fiber Etalon) ที่มีคุณสมบัติเป็นอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ชนิดเพบริเพอร์ (Fabry-Perot Interferometer) อีกด้วย ซึ่งเหล่านี้ ล้วนเป็นงานวิจัยที่กำลังจะดำเนินการต่อไปอย่างต่อเนื่องในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. S. Kino, *Acoustic Waves Devices, Imaging, & Analog Signal Processing*, Prentice-Hall, ch. 1-2, 1988.
- [2] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "Design of High-Frequency ZnO-Coated Optical Fiber Acoustooptic Phase Modulators", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 7, pp. 1203-1211, July 1998.
- [3] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "400-1000 MHz Microwave Response of an Optical Fiber Acousto-Optic Phase Modulator Coated with ZnO", *The 3rd Pacific Conference on Optical Fiber Technology*, pp. 623-627, Dec 1997.
- [4] N. H. Ky, H. G. Limberger, R. P. Salathe, and G. R. Fox, "Optical Performance of Miniature All-Fiber Phase Modulators with ZnO Coating," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 1, pp 23-26, Jan 1996.
- [5] A. P. Goutzoulis and D. R. Pape, *Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices*, Marcel Dekker, New York, 1994.
- [6] G. R. Fox, C. A. P. Muller, N. Setter, N. H. Ky, and H. G. Limberger, "Sputter deposited piezoelectric fiber coating for acousto-optic modulators," *J. Vac. Sci. Technol.*, pp. 800-805, May/Jun 1996.
- [7] A. Roeksabutr, *Optical fiber acousto-optic phase modulators*, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia, Aug 1997.
- [8] F. S. Hickernell, "Zinc-oxide thin-film surface-wave transducer," *Proc. Of IEEE*, vol. 64, no.5, pp. 631-635, May 1976.
- [9] B. L. Heffner and B. T. Khuri-Yakub, "Deposition of oriented zinc oxide on an optical fiber," *Phys. Lett.*, vol. 48, no.21, pp. 1422-1423, May 1986.
- [10] A. A. Godil, D. B. Patterson, B. L. Heffner, G. S. Kino, and B. T. Khuri-Yakub, "All-fiber acousto-optic phase modulators using zinc oxide films on glass fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol.6, no.10, pp. 1586-1590, 1988.

- [11] M. Hossain and P. L. Chu, "High speed optical fiber phase modulation using acousto-optic technique," *18th Australian Conf. Optic. Fibre Technol.*, pp. 314-317, Dec 1993.

ผลงานที่นำเสนอ (Publications)

1. A. Roeksabutr, "Electrode Effect of an Optical Fiber Acousto-Optic Resonator for Microwave Optoelectronics Frequency Decoder," 1998 *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems* (APCCAS98), pp. 209-211, Chiang Mai, Thailand, 24-27 November 1998.
2. A. Roeksabutr, R. Phromluangsri, and P. L. Chu , " Fabrication of High Efficiency ZnO-Coated Fiber Using Sputter Without Heat Treatment", to be presented at the 6th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2000), Seoul, Korea, 30 Oct – 2 Nov 2000.
3. ระวี พรหมหลวงศรี และ อธิคม ฤกษ์บุตร, "ผลของออกซิเจนต่อคุณภาพฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เคลือบบนเส้นใยแก้วโดยไม่มีการให้ความร้อนขณะเคลือบฟิล์ม" เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 22, พฤศจิกายน 2543, เชียงใหม่
4. A. Roeksabutr, R. Phomluangsri, and P. Chu, "Pressure Condition for Fabrication of High Efficiency ZnO-coated Fiber Transducer Using Sputter Without Heat Treatment," กำลังอยู่ในระหว่างการเขียนบทความ คาดว่าจะนำเสนอไปยังวารสาร IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control หรือ IEEE Photonics Letters หรือ Optics Letters ภายในเดือนธันวาคม นี้

ภาคผนวก

สำเนาบทความวิชาการที่น่าเสนอ



IEEE

IEEE
APCCAS

1998



NECTEC



The 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems

Theme : Microelectronics and Integrating Systems

PROCEEDINGS

November 24-27, 1998

Chiangmai, Thailand

IEEE Catalog Number 98EX242

Electrode Effect of an Optical Fiber Acousto-Optic Resonator for Microwave Optoelectronics Frequency Decoder

Athikom Roeksabutr

Telecommunication Engineering Department, Mahanakorn University of Technology

51 Cheum-Sampan Rd., Nong Chok, Bangkok 10530, Thailand

Phone (+662) 9883655 ext. 220, 232, Fax (+662) 9883687, Email: athikom@mut.ac.th

Abstract

We report a further theoretical study on the effect of electrode thickness of an acousto-optic resonator using ZnO-coated on a fiber surface inserted in a fiber ring resonator to decode the microwave frequency. For the results, changing the electrode thickness can shift the frequency and the top electrode has more effect than the bottom one.

Optical fiber acousto-optic phase modulators at very high frequency using zinc oxide (ZnO), sandwiched between the top and bottom thin-film metal electrode, circumferentially coated on the standard fiber surfaces have been widely demonstrated [1] -[3]. By making use of this device, we have theoretically proposed a novel optoelectronic tone and frequency decoder, which will give an optical output signal only when an electrical trigger-signal has the same frequency as desired [4],[5]. The optoelectronic frequency decoder is a hybrid system consisting of optical and electrical parts as shown in Fig. 1 (a). The optical part is composed of an ordinary fiber ring resonator with an acousto-optic fiber phase modulator, shown in Fig. 1 (b), in its close loop. The fiber phase modulator is controlled by an electrical trigger signal. The electrical part is an electronics feedback system that supplies the DC voltage to a cylindrical PZT, which is wrapped by one part of the fiber in the loop. This technique is to set up the ring resonator at the phase resonance condition and also to compensate the ring resonator from the environment sensitivity [4]. The key to lock up the desired electrical frequency arises from the structure of the phase modulator. By employing the theory of the acousto-optic resonator [6] as well as of the fiber ring resonator, the device performance at one particular desired frequency, defined from the thickness of ZnO layer, has been investigated [4]. The effects of resonator length and piezoelectric thickness of the resonator was proposed in Reference [7]. In this paper, we report a further study on the effect of electrode thickness of the acousto-optic resonator on the operation of microwave optoelectronic frequency decoder.

Assuming the unit optical input power ($I_i = 1$) and the phase resonance condition of the fiber ring resonator is reached, the optical output power I_o (in

terms of the transfer function) of a microwave optoelectronic frequency decoder can be obtained as [4]:

$$I_o = (1 - \gamma) \cdot \left[1 - \frac{k(1 - k - A)}{(1 - k)(1 + A - 2\sqrt{A} \cos(\Delta\theta))} \right] \quad (1)$$

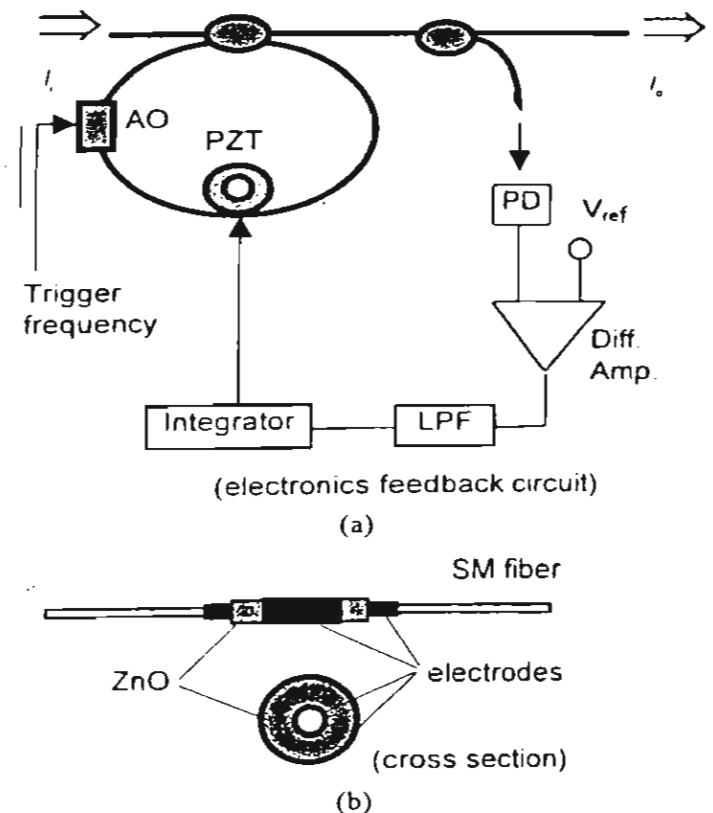


Fig. 1 (a) Schematic of an optoelectronic frequency decoder and (b) an optical fiber acousto-optic (AO) phase modulator.

where k is the intensity coupling coefficient of the coupler, γ is the coupler insertion loss, $A = (1 - k)(1 - \gamma)(1 - a)\exp(-2\alpha L)$ with a the splice intensity loss in the loop, α the fiber attenuation per unit length, and L the fiber loop length. $\Delta\theta$ is optical phase modulation depth producing at the acousto-optic resonator and can be obtained from [6] as:

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{\lambda} n^3 p \sqrt{\frac{P_e l}{\bar{Z} v^2 \pi \rho}} \cdot \xi \quad (2)$$

where

$$\xi = \frac{4R_{so} \operatorname{Re}(Z_m)}{(R_{so} + \operatorname{Re}(Z_{se}) + \operatorname{Re}(Z_m))^2 + (\operatorname{Im}(Z_{se}) + \operatorname{Im}(Z_m))^2}$$

λ is the optical wavelength, n is the refractive of fiber core, p is the strain-optical coefficient of the glass fiber, P_e is the electrical drive power, l is the resonator length, ρ is the core radius, $\bar{Z}$ and v are the acoustic impedance and the acoustic velocity of the glass fiber, respectively, R_{so} is the impedance of an electrical input source, Z_m is the electrical input impedance of the phase modulator, Z_{se} is the series impedance occurring between the resonator and the source, and the $\operatorname{Re}(\cdot)$ and $\operatorname{Im}(\cdot)$ indicate the real part and imaginary part, respectively.

It is obviously shown in eq.(2) that the electrical input impedance Z_m plays an important role on the phase modulation and consequently on the desired frequency of the optoelectronic frequency decoder. In general, piezoelectric thickness is carefully designed to define the modulating frequency and the thickness of electrodes must be kept very thin, i.e. less than $0.1 \mu\text{m}$, to avoid the loading effect. However, it is hard to practically control the uniform thickness of thin electrode since the tolerance in fabricating a metal coating onto the fiber is several tens of nanometre. Therefore, the effect of the electrode thickness must be investigated for the design purpose.

By theoretically calculating the output signal in terms of the transfer function, the result of changing the top electrode thickness, while fixing the bottom electrode thickness, is shown in Fig. 2. It is noted that the real acoustic properties for the practical acousto-optic device are employed as the following parameters:

Electrode: aluminium
thickness $0.1 \mu\text{m}$ (if not stated elsewhere)
top electrode length 2 mm
piezoelectric: ZnO
thickness $6 \mu\text{m}$
permittivity 9.74×10^{-11}
glass fiber: fiber diameter $120 \mu\text{m}$
core diameter $6 \mu\text{m}$
refractive index of core 1.479
strain-optic coefficient 0.121

The parameters used for the fiber ring resonator are as follows: $k=0.05$, $\gamma=0.03$, $a=0.01$, $n=1.479$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, and $L=m\lambda/n$ with $m=3 \times 10^6$. It can be seen from Fig. 2 that when the thickness of the top electrode increases, the trigger frequency is high-shifted. However, if the

thickness is less than $0.1 \mu\text{m}$, only little frequency shift occurs and this can be ignored. At the thickness beyond $0.1 \mu\text{m}$, the effect is significant and the shift of trigger frequency is directly proportional to the thickness value up to a few tens of MHz.

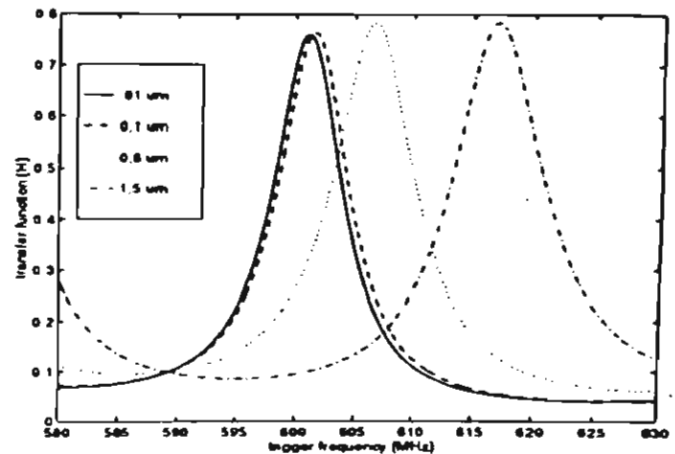


Fig. 2 Plots of frequency shifts when the thickness of the top electrode is varied.

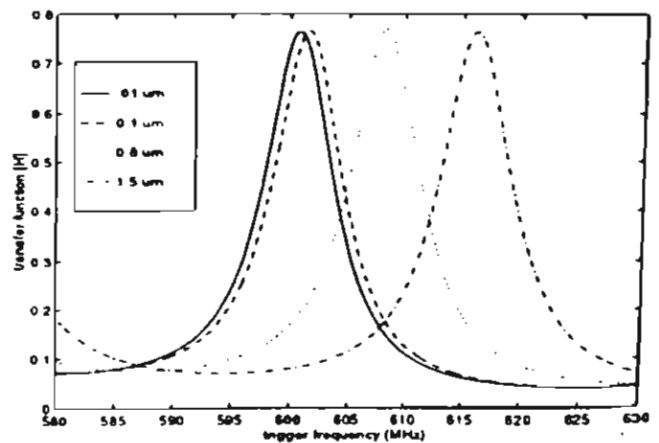


Fig. 3 Plots of frequency shifts when the thickness of the bottom electrode is varied.

In similar, by using the same condition we investigated the effect of changing the thickness of the bottom electrode while remaining the thickness of the top electrode at $0.1 \mu\text{m}$. The results are shown in Fig. 3. As can be seen, the result is the same as above when the thickness of the bottom electrode is less than $0.1 \mu\text{m}$. At the thickness above this value, the trigger frequency is also high-shifted. However, in comparison with the top electrode, the bottom electrode has less effect due to its air-backed structure [1],[2].

According to the standing waves of acoustic waves occurred along the cross section of a resonator, several peaks of decoded frequency signal from the device will take place when the resonator diameter is

equal to a multiple integer of an acoustic wavelength Λ . For instance, when $2(a+d_{et}+d_{eb}+d_p)=m\Lambda$, where m is an integer, a is the core radius, and d_{et} , d_{eb} and d_p are the thickness of the top electrode, bottom electrode, and the ZnO layer, respectively. This is shown in Fig. 5. The peak separation is about 45 MHz for standard fiber as expected. Although the output light intensity is reduced at higher frequencies than the fundamental frequency due to high acoustic loss at high frequency, the shift of decoded frequency remains as the electrode thickness increases.

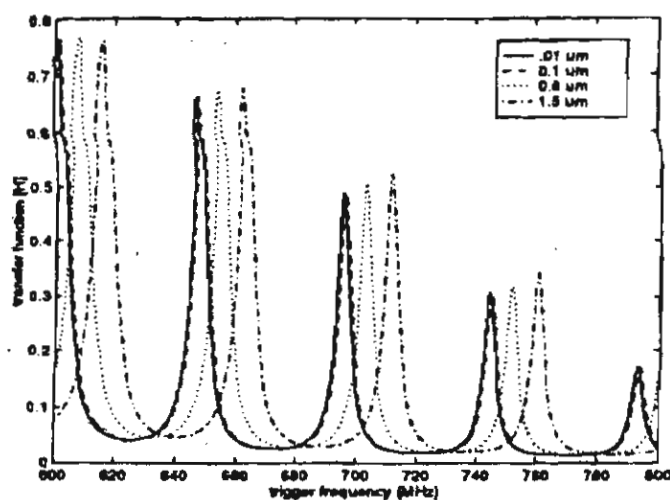


Fig. 4 Peaks of frequency decoded at the output of the device.

We have theoretically investigated the effect of electrode thickness of an optical fiber acousto-optic resonator for microwave optoelectronic frequency decoder. It is shown that slightly changing of the electrode thickness in terms of a few tens of nanometre can shift the frequency of a few tens of MHz. We also found that the thickness of the bottom electrode has less effect than the top one due to the characteristic of air-backed at the top electrode.

This work was partially supported by the Thailand Research Fund.

References

- [1] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "Broad-band Frequency Response of a ZnO-Coated Fiber Acousto-Optic Phase Modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 5, pp. 613-615, May 1997.
- [2] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "400-1000 MHz Microwave response of an Optical Fiber Acousto-Optic Phase Modulator Coated with ZnO," *3rd Pacific Conf. On Comm.*, Sydney, Australia, pp. 623-627, Dec 1997.
- [3] N. H. Ky, H. G. Limberger, R. P. Salathe, and G. R. Fox, "Optical Performance of Miniature All-Fiber Phase Modulators with ZnO Coating," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 23-26, Jan 1996.
- [4] A. Roeksabutr, "Microwave Frequency Optoelectronics Tone Decoder," *20th Electrical Engineering Conference*, Bangkok, Thailand, pp. 228-231, Nov 1997.
- [5] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "All-Fiber PM-IM Conversion at High Frequency using Acoustooptic Technique in a Fiber Ring Resonator," in *Guided-wave propagation and devices Meeting*, Canberra, 3-5 July 1996.
- [6] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "Modelling of High Frequency Acousto-Optic Fiber Phase Modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 2362-2366, Oct 1996.
- [7] A. Roeksabutr and P. L. Chu, "Optimum Length and Piezoelectric thickness of a ZnO-Coated Optical Fiber Acousto-Optic Microwave Modulator," *IEEE/LEOS 10th Annual Meeting*, San Francisco, USA, pp. 124-125, Nov 1997.

APCC 2000

The 6th Asia-Pacific Conference on Communications

30 October - 2 November, 2000

Sheraton Walker Hill Hotel, Seoul, Korea

Organized by: Korean Institute of Communication Science

Sponsored by: Korea Telecom

Korea Telecom Free Call

LG Cable

SAMSUNG Electronics

SK Telecom

Supported by: Electronics and Telecommunications Research Institute

IEEE Communications Society

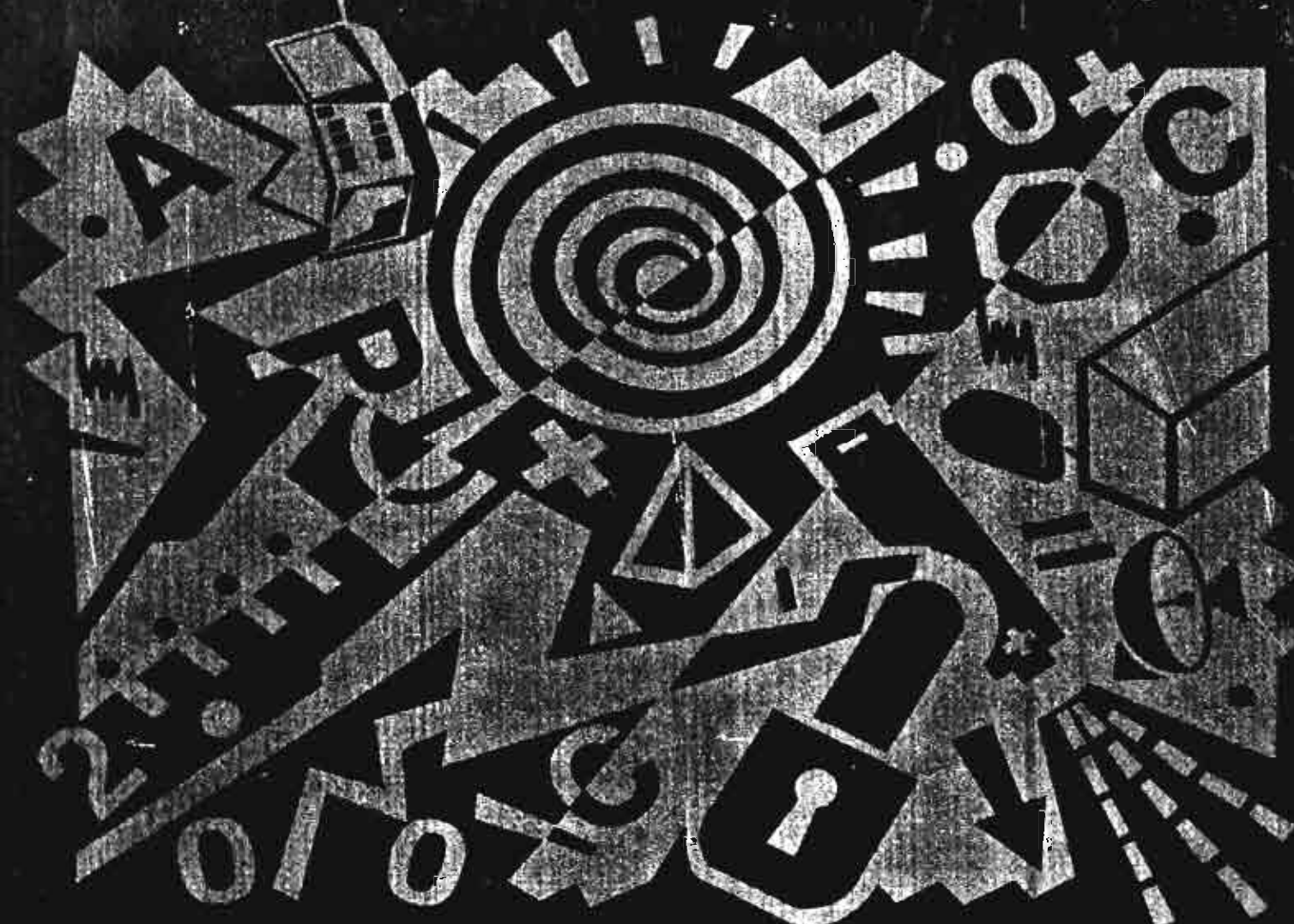
Korea Information Science Society

Open Standards and Internet Association

The Institute of Electronics Engineers of Korea

Ministry of Information and Communication

Proceedings I



Fabrication of High Efficiency ZnO-Coated Fiber Using Sputter Without Heat Treatment

Athikom Roeksabutr, Ravee Phomluangsri

Optical Communication Research Lab, Mahanakorn University of Technology

51 Cheum-Sampan Rd., Nong Chok, Bangkok, Thailand 10530

Phone (+662) 9883655 ext 232, Fax 9884040, E-Mail: athikom@mut.ac.th

and Pak L. Chu

Optical Communications Group, School of Electrical Engineering, University of New South Wales

Sydney, Australia 2052, Phone (+612) 93855993

Abstract - We report updated experimental results for the fabrication of a ZnO-coated acousto-optic fiber transducer using sputtering without heat treatment to the fiber. The process is simple but can produce high efficiency power coupling. These fiber transducers can operate at a high fundamental frequency of about 820 MHz with a high peak resonance of more than 6 dB.

I. Introduction

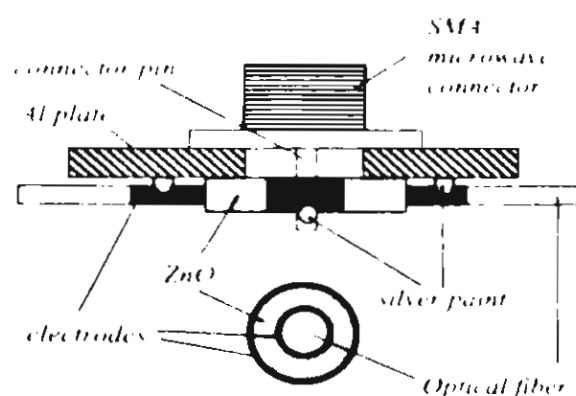


Fig. 1 The schematic of ZnO-coated fiber transducer mounted on an aluminum plate with SMA connector.

One of the more promising optical fiber acousto-optic phase modulators operating at high frequencies up to the Gigahertz region makes use of zinc oxide (ZnO) as a piezoelectric material for a transducer in the

structure as shown in Fig. 1. Sputtering is the preferable technique for the deposition of the thin ZnO film sandwiched between thin film electrodes onto the fiber surface, since the c-axis orientation of a ZnO film can be easily arranged to be normal to the fiber surface. This property proportionally determines the performance of the piezoelectric layer to produce strong acoustic wave energy into the fiber core. Due to the structure of the device, acoustic resonance caused by the presence of a standing wave across the fiber always occurs. The peak resonance (S_{11}), the difference between the peak and the adjacent bottom valley of the characteristic impedance curve in terms of the S_{11} parameter of the device, directly indicates the electrical to acoustic power coupling efficiency and hence the quality of the ZnO transducer. There are many reports on transducer fabrication for phase modulation at a center (fundamental) frequency less than 600 MHz but most of them involve fiber heating during ZnO sputtering to minimize the residual stress that can cause cracks on the thin ZnO film. This applied heating also causes fiber fragility. Consequently, the fiber transducer is difficult to be bonded and is not reliable in use. By contrast, there are only few reports on transducer fabrication without fiber heating and these claim an operating center frequency of less than 400 MHz.¹⁻³

This paper describes the method of ZnO-coated fiber fabrication using sputtering without heat treatment to the fiber. The present method gives new experimental results on the fabrication of an optical fiber acousto-optic transducer. The transducer can operate at a fundamental frequency of about 820 MHz with peak resonance more than 6 dB, very much higher than the 1.2 dB recently reported ⁴.

II. Device Fabrication

Although deposition of ZnO film using sputtering has been extensively investigated for more than a decade, only routine processes are normally followed with additional special techniques for particular applications. It is also necessary to optimized appropriate conditions through experiment.

In the present method, an acousto-optic transducer was fabricated in the middle section of a 10/125 μm standard optical fiber about 50 meters long. The 4 cm long fiber jacket at the middle section was manually stripped and cleansed by wiping methanol along the fiber a few times. The fiber was laid on an aluminum substrate plate 30-40 mm distance away from the target. The shadow mask was made from aluminum foil covered on top of the sample fibers. Fig. 2 illustrates the schematic of the fiber holding. For rotating system as shown in Fig. 2 (a), two fiber samples can be coated simultaneously. For non-rotating system, 3-5 fibers can be arranged as depicted in Fig. 2 (b).

For every coating process, DC planar magnetron sputtering, DYNAVAC model SC100MS with chamber dimensions 200mm O.D. (185mm I.D.) $\times$ 150mm high, was employed. The targets were an aluminum sheet (99.5% pure) and a zinc sheet (99.995% pure). To deposit aluminum thin-film electrodes, the chamber was evacuated to reach a background pressure of less than 2.5×10^{-5} Torr. Pure argon gas was introduced into the chamber until the

pressure reached 22 mTorr. Under these conditions, an electrical voltage of -460 V with current of 135 mA applied for sputtering for 3-7 minutes yields a film of less than 1000 $\text{\AA}$ film thickness. The fiber was fixed while coating the bottom electrode but rotated at a speed of 6 rpm for the top electrode. The ZnO coating process was done under a background pressure less than 8×10^{-6} Torr. The sputter pressure was 32 mTorr. ZnO was sputtered for about 6 hours under an atmosphere of oxygen and argon in the ratio 80% to 20%, by applying an electrical voltage of -380 V with current of 110 mA. The deposition rate for ZnO was approximately 500 nm per hour.

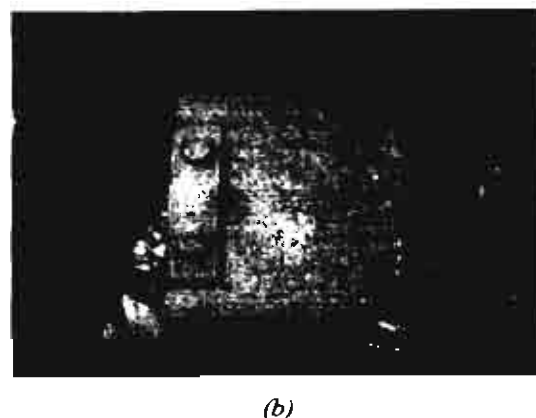
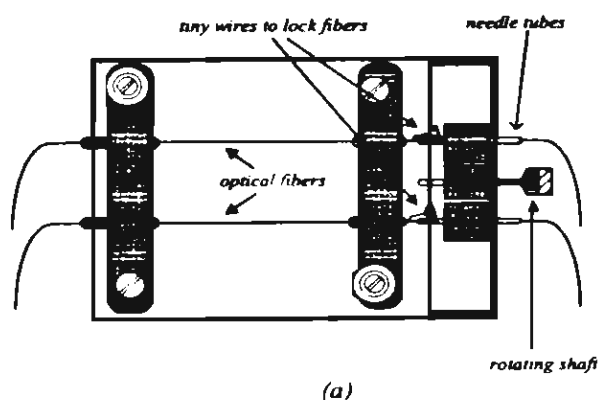


Fig. 2 Fiber holding system in (a) was set up to rotate two fibers simultaneously and in (b) is the photograph of the system in the chamber for fixing fiber samples.

We have experimentally found that the appropriate sputter pressure for ZnO is about 31-33

mTorr. If the pressure is lower the ZnO film tends to act as in the metallic mode and if the pressure is higher the film is porous and the columnar grains become large. The latter can limit high frequency operation. In practice, we firstly set up the ratio for argon and oxygen at 80% to 20%. After that, we throttle the gas flow rate to satisfy the appropriate pressure condition. The ZnO-coated fiber transducer was bonded to an SMA microwave connector as shown in Fig. 1.

III. Results And Discussion

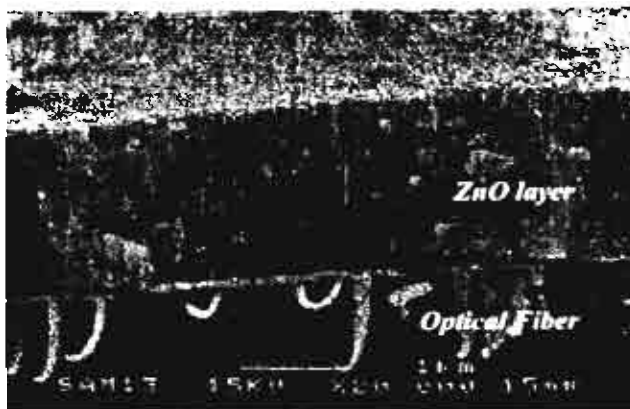
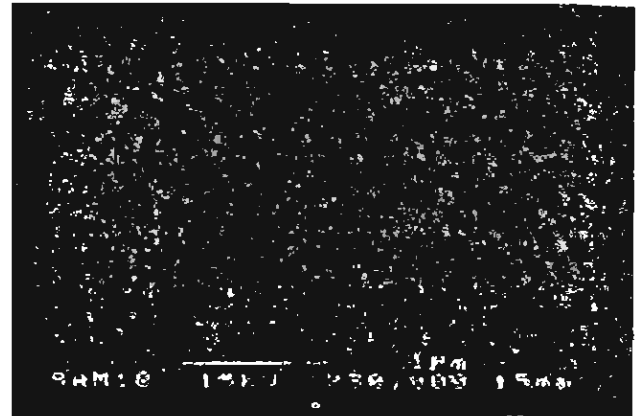


Fig. 3 SEM image of ZnO crystal on the fiber surface.

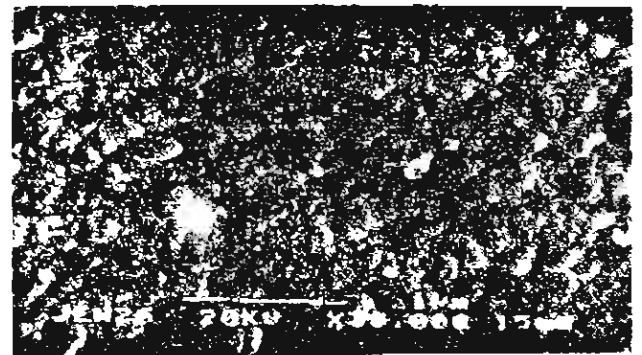
SEM images were observed after ZnO deposition. One image is shown in Fig. 3. The ZnO layer of about 1.5 μm thick was investigated. It is seen that the grain structure of ZnO crystal is well aligned. This confirms that the sputtering technique makes the c-axis orientation of ZnO film to be normal to the fiber surface. In addition, the ZnO film has a large and dense grain that indicates good film quality. As a result, the electrical film resistance, dc resistance, is very high as many few tens up to hundred ohm.

Fig. 4 (a) shows the image of grains observed at the surface of ZnO film coating when the sputter pressure for ZnO was 32 mTorr. As can be seen, the columnar grains are uniform. If the ratio of oxygen is not appropriate, the ZnO crystal may not well aligned

and the grains are not uniform as shown in Fig. 4 (b) when the ratio of oxygen is less than 20%.



(a)



(b)

Fig. 4 SEM images showing the grains observed at the surface of film coating in the conditions: (a) when the sputter pressure was 32 mTorr, and (b) when the ratio of oxygen is less than 20%.

Since the electrical performance for phase modulation is of interest, the completed acousto-optic devices with 1-2 mm transducer length were tested by means of a microwave network analyzer (HP 8720C) to measure the electrical reflection coefficient, S11. One of the results of the S11 parameter displayed on a Smith Chart in the region of fundamental frequency is shown in Fig. 5 (a) whereas the $\log|S11|$ in terms of dB is shown in Fig. 5 (b). The Smith chart shows the dominant capacitance behavior due to the structure of ZnO film sandwiched between metal electrodes. The

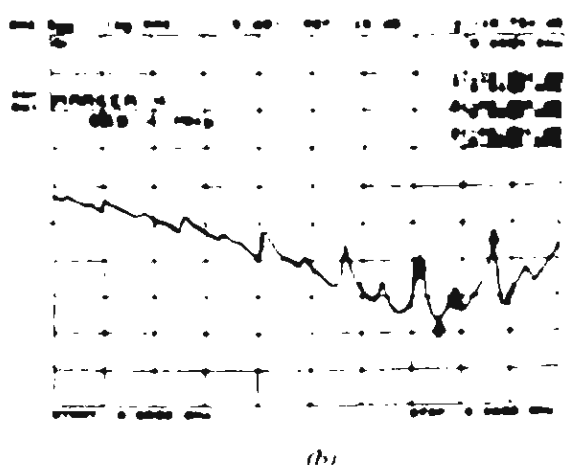
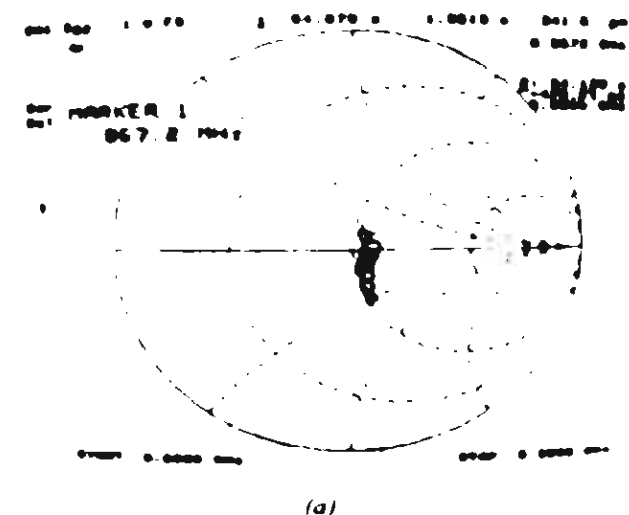


Fig. 5 S_{11} measurement of the ZnO-coated acousto-optic device (a) on Smith Chart and (b) Γ in dB term

loop resonance represents the piezoelectric property of ZnO film in the frequency vicinity of 800 MHz since standing waves exist over the cross section of the fiber. At the fundamental frequency of 820 MHz, the device impedance is close to 50 Ω , and the peak resonance δS is about 7 dB. This value varies linearly with the loop radius on the Smith chart and it represents the coupling efficiency of the electrical to acoustical power. The best coupling efficiency recently reported, to our knowledge, was obtained when δS is 1.2 dB⁴. (It should be noted that the impedance of the device includes the series impedance

occurred after device fabrication.)

IV. Conclusions

We have experimentally demonstrated that a simple fabrication process without heat treatment of a ZnO-coated fiber transducer can offer high efficiency optical fiber acousto-optic phase modulation. The peak resonance over 6 dB with fundamental frequency about 820 MHz makes this the best fiber transducer reported so far.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank Dr. David Wheeler from the Physics Department, Mahanakorn University of Technology for useful discussion. The work was financially supported by the Thailand Research Fund (TRF).

REFERENCES

1. A. Roeksabutr and P. L. Chu, "Modeling of high frequency acousto-optic fiber phase modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 2362-2366, Oct. 1996.
2. G. R. Fox, N. Setter, and H. G. Limberger, "Fabrication and structural analysis of ZnO-coated fiber optic phase modulator," *J. Mater. Res.*, vol. 11, no. 8, pp. 2051-2061, Aug. 1996.
3. A. Gurasov, N. H. Ky, H. G. Limberger, R. P. Salathe, and G. R. Fox, "High-performance optical phase modulation using piezoelectric ZnO-coated standard telecommunication fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 12, pp. 2771-2777, Dec. 1996.
4. A. Roeksabutr and P. L. Chu, "Design of high-frequency ZnO-coated optical fiber acoustooptic phase modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 7, pp. 1203-1211, Jul. 1998.