



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 ซึ่งมีอยู่เพียงเครื่องเดียวให้สามารถใช้เคลือบฟิล์มบางของอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์บนผิวเส้นใยแก้วชนิดโหนดเดียวได้ ในการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมสำหรับชั้นอิเล็กโทรด จะสนใจที่ความหนาของชั้นฟิล์มน้อยกว่า 2 ไมครอน ลงมา เพื่อลดปัญหาการไหลดัดสัญญาณ ในขณะที่ฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าความถี่ทำงานของสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ จะมีความหนาประมาณ 2-5 ไมครอน ที่ผ่านมามีการวิจัยเกี่ยวกับการเคลือบชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์มาอย่างกว้างขวาง รายละเอียดของกระบวนการและการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในขณะทำการสปีดเดอริง จะขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบรวมทั้งการใช้เทคนิคพิเศษบางประการสำหรับงานแต่ละงาน เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีคุณสมบัติตามต้องการ โดยเฉพาะคุณสมบัติความเป็นสารเปียกซิงค์ออกไซด์ โครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเคลือบฟิล์มต่างๆ ในสภาวะที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม เช่น อัตราส่วนของก๊าซผสมในแคมเบอร์ 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 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นปามีค่า -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)

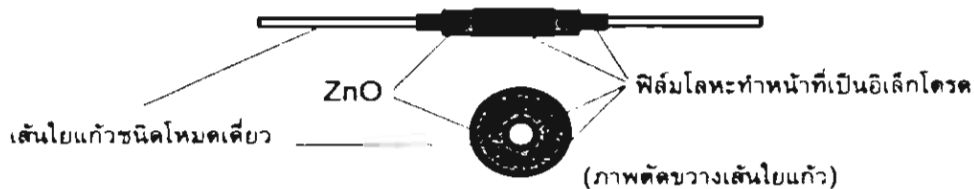
This research project studies the fabrication and design of a high frequency optical fiber acousto-optic transducer for optical phase modulation in both theory and experiment. The experiment is mainly focused to fabricate the transducer operating at microwave frequencies from a few hundred Megahertz 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 จะต้องสร้างทรานสดิวเซอร์ที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกบนผิวของเส้นใยแก้ว โดยทั่วไป ในการป้อนเสียงความถี่สูงตั้งแต่หลายร้อยเมกะเฮิร์ตขึ้นไป มักจะทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางของซิงค์ออกไซด์หรือ ZnO (Zinc Oxide) โดยรอบเส้นใยแก้ว เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริก 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 จะเกิดจากการทำงานของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกผลิตคลื่นออกมา จากสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปยังอิเล็กโทรดที่ติดกับผนังทั้งสองด้านของสารเพียโซอิเล็กทริก ในการทำงานที่ความถี่สูงหลายร้อยเมกะเฮิร์ตซ์ มักใช้สารเพียโซอิเล็กทริกที่เป็นซิงค์ออกไซด์ (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 ทำให้ซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติของการเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกได้ดี อย่างไรก็ตาม ในการเคลือบซิงค์ออกไซด์ให้มีคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกที่ดีตามต้องการ 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 เป็นพื้นที่ที่มีการกระจายพลังงานของคลื่นในระยะรัศมี 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)

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

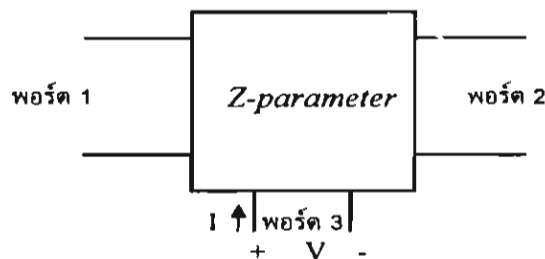
$$= Z_{21} v_1 + Z_{22} v_2 + \frac{h}{j\omega} I$$
(6)

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) มาพิจารณาสร้างเป็นวงจรสมมูลของชั้นฟิล์มทรงกระบอกที่ไม่ใช่สารเปียโซอิเล็กทริก 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

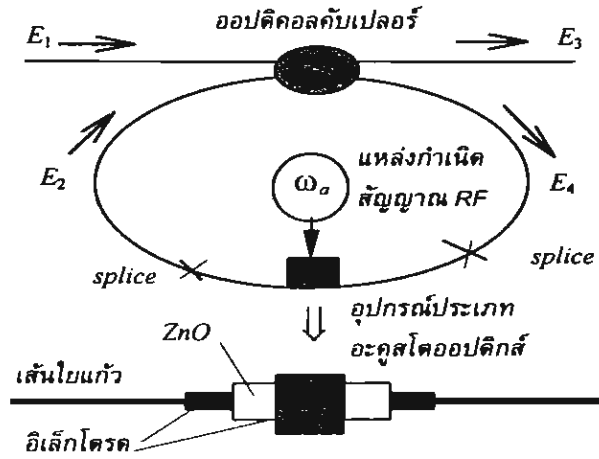
ก่อนหน้านี้ [7] ได้มีการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงบนเส้นใยแก้ว ประกอบเป็นส่วนหนึ่งในรูปของเรโซเนเตอร์วงแหวนเส้นใยแก้ว (optical fiber ring resonator) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่สูงจะถูกป้อนให้กับทรานสดิวเซอร์เพื่อสร้างคลื่นกลเดินทางภายในเส้นใยแก้ว ส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วในส่วนในส่วนของคลื่นเดินทาง 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 ค่าการคับปลิงสัญญาณของออปติคอลลับเพลอร์ 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]

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

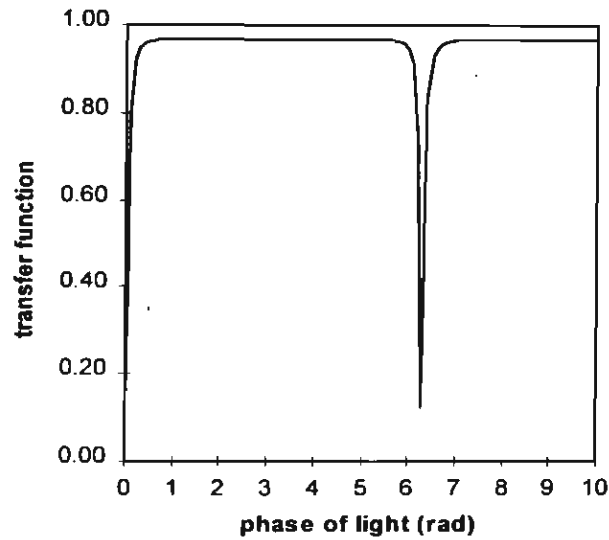
$$E_4 = \sqrt{1-\gamma} \cdot (j\sqrt{k} E_1 + \sqrt{1-k} E_2) \quad (20)$$

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 กราฟแสดงคุณสมบัติของเรโซแนนซ์วงแหวน เส้นใยแก้วโดดๆ ตามค่าของเฟสของแสงในลูบ

เมื่อทำการพล็อตกราฟจากสมการที่ (21) ดังรูปที่ 4 จะพบว่า ค่าของ I_3 ที่แสดงด้วยค่าของฟังก์ชันการส่งผ่าน (transfer function) H มีค่าแปรเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันของเฟสของแสง (phase of light) βL ภายในลูบวงแหวน โดยมีค่าต่ำสุดเมื่อพลังงานของแสงภายในลูบเกิดเรโซแนนซ์ นั่นคือ เมื่อเฟสของแสงมีค่า $\beta L = 2m\pi$ โดยที่ m เป็นเลขจำนวนนับ ในช่วงที่ใกล้กับการเกิดเรโซแนนซ์ 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 ที่ประกอบอยู่ภายในลูบของเรโซเนเตอร์ 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) จะมีค่าขึ้นกับเฟสของแสงภายในลูบที่เปลี่ยนไป ในขณะเดียวกัน หากกำหนดให้ขนาดความยาวของลูบมีค่าที่ทำให้ฟังก์ชันการส่งผ่านของเรโซเนเตอร์วงแหวนมีค่าคงที่ ตรงจุดกึ่งกลางระหว่างค่าความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุด จะทำให้สามารถควบคุมความเข้มแสงขาออกได้โดยการควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ โดยที่ตำแหน่งของเฟสในลูบ 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 :

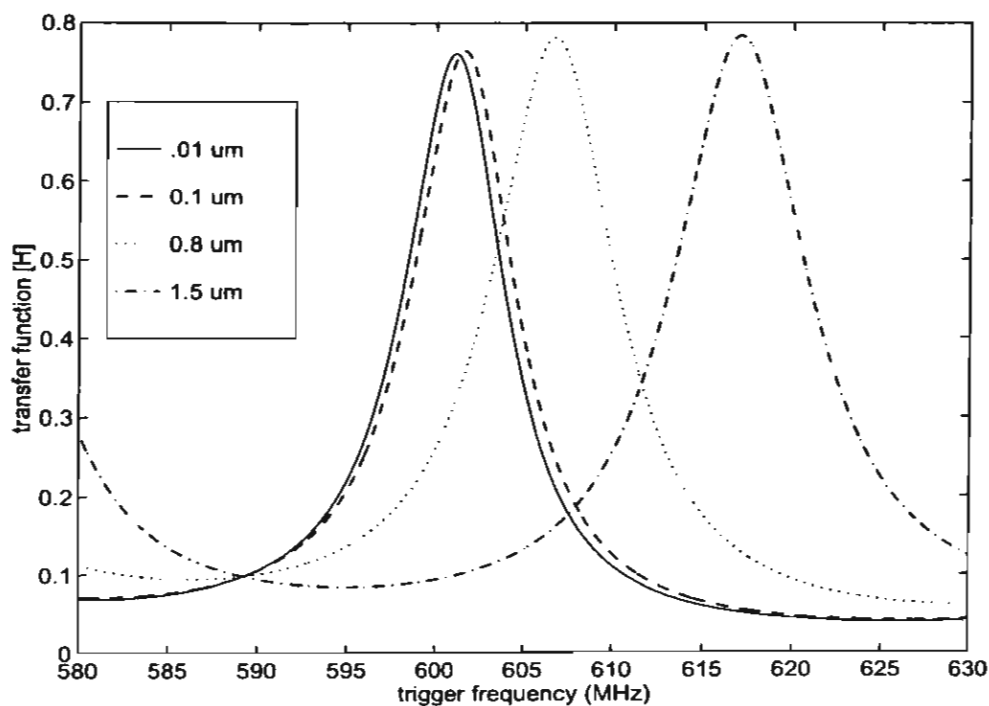
ความหนาชั้นฟิล์ม 5 μm
 ความต้านทานทางอะคูสติกส์ 36×10^6 kg/m²-s
 ความเร็วคลื่นกล 6300 m/s
 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 9.74×10^{-11}
 ค่าคงตัวการคับปลิงพลังงาน (k^2) 0.28

เส้นใยแก้ว :

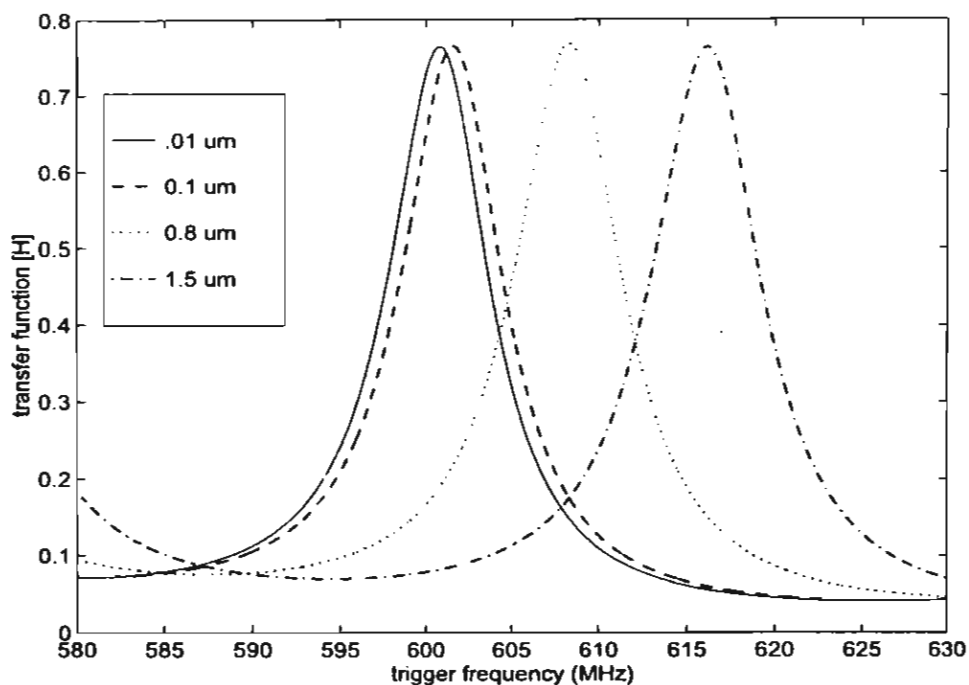
เส้นผ่านศูนย์กลาง 7/125 μm
 ความต้านทานทางอะคูสติกส์ 13.1×10^6 kg/m²-s
 ความเร็วคลื่นกล 5600 m/s
 การลดทอนสัญญาณคลื่นกล 5993.27 Np/m²
 ดัชนีหักเหของคอร์ 1.479
 สัมประสิทธิ์อิเล็กโตรออปติกส์ 0.121

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

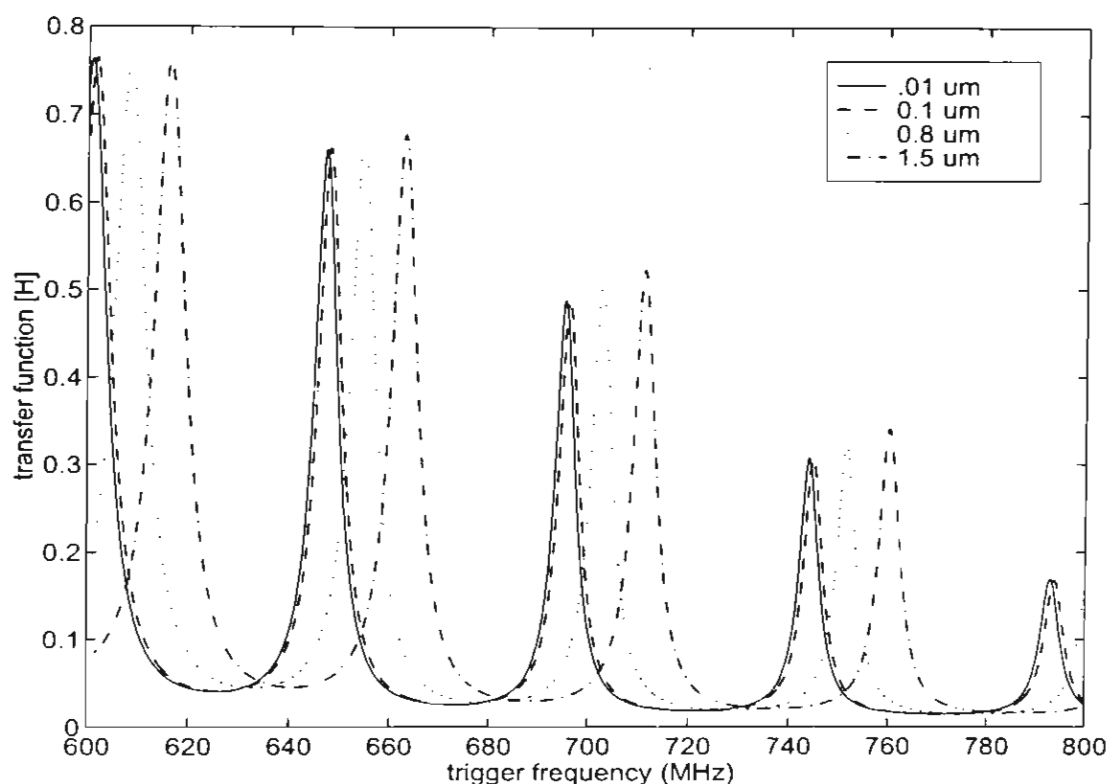


รูปที่ 5 ค่าความถี่ถูกเลื่อนไปเมื่อความหนาของอิเล็กทรอนิกส์ด้านนอกเปลี่ยนแปลง



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) โดยจะใช้ระบบสปัตเตอร์ริง (sputtering) ในกระบวนการเคลือบฟิล์มทั้งสองชนิด สำหรับระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้ในโครงการนี้เป็นเครื่องยี่ห้อ DYNAVAC โมเดลรุ่น SC100MS ซึ่งเป็นระบบสปัตเตอร์ริงแบบระนาบที่ใช้ไฟตรงและมีการเพิ่มสนามแม่เหล็กเพื่อดักจับอนุภาค หรือที่เรียกว่าระบบ DC planar magnetron sputtering ดังแสดงในรูปที่ 8 ข้อจำกัดในการวิจัยนี้ก็คือ กระบวนการเคลือบฟิล์มทุกชนิดต้องกระทำด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริงเพียงเครื่องเดียว ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบสปัตเตอร์ริงเพียงเครื่องเดียวที่สามารถหาได้ (โดยปรกติเครื่องสปัตเตอร์ริงมีราคาแพงมาก) นอกจากนี้ การสปัตเตอร์สารประกอบของซิงค์ มักทำให้ระบบเกิด contamination อยู่เสมอ ส่งผลให้ระบบไม่สมดุลย์และสามารถปรับใช้เครื่องกับงานอื่นได้ยาก ผู้ใช้ส่วนใหญ่จึงมักไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้เครื่องร่วมด้วย



รูปที่ 8 ภาพถ่ายแสดงระบบสปัตเตอร์ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้

3.1 การดัดแปลงระบบและการออกแบบระบบหน้ากาก

ระบบสปัตเตอร์ของ DYNAVAC รุ่น SC100MS ที่ใช้ในโครงการนี้ มีขนาดของหม้อสุญญากาศหรือแชมเบอร์ (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

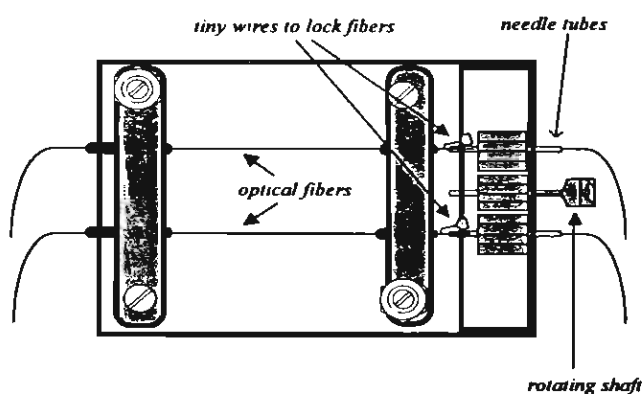
ในการออกแบบแท่นยึดสำหรับเคลือบฟิล์มบางบนเส้นใยแก้วด้านเดียว (เส้นใยแก้วไม่หมุน) จะใช้ปลายเข็มฉีดยาที่มีขนาดเล็กตัดเป็นหลอดกลม เพื่อให้สามารถสอดเส้นใยแก้วเข้าไปได้อย่างสะดวก แล้วจัดเรียงกันสองด้านที่

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 ในที่นี้จะใช้อะซีโตนหรือของเหลวประเภทเมททานอลทำความสะอาด ด้วยการเช็ดแชมเบอร์และส่วนประกอบของอุปกรณ์ทุกชนิดภายในแชมเบอร์ก่อนทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการระหว่างการเคลือบอะลูมิเนียมและซิงค์ออกไซด์ หลังจากนั้นจะดูดอากาศภายในแชมเบอร์ให้มีสภาพเป็นสุญญากาศอยู่ที่ความดันประมาณต่ำกว่า 10^{-5} ทอร์ (Torr) อยู่ประมาณ 2-5 วันๆ ละ 4-20 ชั่วโมง ขึ้นกับสภาพการใช้งานของแชมเบอร์ก่อนหน้า จากนั้น ทำการจัดระบบให้คล้ายกับกระบวนการสปัตเตอริง เรียกว่า ปริสปัตเตอริง (pre-sputtering) เพื่อเป็นการทำให้ระบบโดยเฉพาะแผ่นเป้า (target) มีสภาพเข้าสู่สมดุลสำหรับการเคลือบก่อนทำการเคลือบจริง นอกจากนี้ การเกิดพลาสมาในขณะที่ทำการปริสปัตเตอริงนี้ 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. ในการเตรียมชิ้นงานจะต้องทำความสะอาดเส้นใยแก้วเปลือยอย่างดีด้วยเมททานอล แล้วติดตั้งเข้ากับแท่นยึดยึดฐานรองโดยสอดใส่เส้นใยแก้วผ่านแกนเข็มฉีดยา แท่นยึดนี้จะถูกวางในแชมเบอร์ โดยจัดให้ห่างจากแผ่นเป้าสารเคลือบ (target) ประมาณ 40-50 มม. สำหรับแผ่นเป้าสารเคลือบในที่นี้ เป็นแผ่นอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. และมีความหนา 1 มม.

ในการเคลือบฟิล์มจะต้องทำการดูดอากาศออกจากแชมเบอร์ จนกระทั่งความดันอากาศลดลงต่ำที่สุด ซึ่งระบบที่ทำวิจัยนี้สามารถดูดอากาศให้มีความดันต่ำสุด 7.5×10^{-7} ทอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งปลอมปนเหลืออยู่ภายในแชมเบอร์หรือถ้าจะมีก็ต้องมีน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม จากการทดลองหลายครั้งพบว่า ในการเคลือบอะลูมิเนียมไม่จำเป็นต้องรอให้ถึงความดันอากาศต่ำขนาดนี้ก็ได้ หากความดันอากาศมีค่าต่ำกว่า 2.5×10^{-5} ทอร์ ก็จะสามารถใช้งานได้ ซึ่งระบบจะใช้เวลาดูดอากาศลงไปจนถึงระดับความดันนี้ได้ภายในเวลาประมาณ 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 ภายใต้อัตราความดันบรรยากาศของอาร์กอน 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