

การวัดค่าอติโพไซเมตริกพารามิเตอร์ของพื้นผิวที่แตกต่างกันโดยใช้เทคนิคการมอดูเลตเฟส
ของแสงซึ่งมีเส้นใยแก้วนำแสงชนิดไฮไบร์ฟรินเจนซ์เป็นตัวกลาง

**The measurement of ellipsometric parameters of various surfaces using a highly
birefringent fiber polarization modulation technique.**

สืบตระกูล สุชาติ* และ รัชภักย์ จิตต์อารี**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการมอดูเลตเฟสของแสง ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการผลิตและควบคุมแสง ให้มีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการ มาใช้ในงานทางด้าน การวัดคุณสมบัติทางแสงของพื้นผิวที่สนใจ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดคริสตัลสถานะโพลาไรซ์ (Highly Birefringent Fiber) เป็นตัวกลางของแสง และทำการมอดูเลตเฟสของแสงโดยการยืดหดเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวยาวด้วยมอดูเลเตอร์ โดยใช้ความถี่ในการยืดหดคงที่ จากการทดลองนี้พบว่าสัญญาณแสงที่ได้จากการมอดูเลตเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีมุมอิมิมูท (azimuth) ควบคุมได้ ซึ่งสามารถนำสัญญาณแสงที่ได้นี้ไปทำการวัดคุณสมบัติทางแสง เช่น ค่าดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน ค่าอติโพไซเมตริกพารามิเตอร์ ฯลฯ ของพื้นผิวต่างชนิดกันได้ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับทฤษฎี แล้วพบว่า มีผลอยู่ในเกณฑ์ดี

* ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

** ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บทนำ

การสร้างและการควบคุมลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (linear polarization) ด้วยวิธีการมอดูเลตเฟสของแสงเป็นส่วนสำคัญในงานด้านการวัดคุณสมบัติทางแสง โดยเทคนิคการมอดูเลตนี้จะทำให้การวิเคราะห์สัญญาณแสงเป็นไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วขึ้น โดยสามารถนำไปใช้กับวิธีการวัดทางแสง เช่น ellipsometry และ polarimetry ซึ่งวิธีการทั้งสองอาศัยการวิเคราะห์สถานะของ polarization ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการหักเห การทะลุผ่าน และการกระเจิงเนื่องมาจากตัวกลางของแสง โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะเปลี่ยนแปลงตามค่าคงที่ทางแสง (optical parameters) เช่น ค่าดัชนีหักเห (index of refraction) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficients) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflection coefficients) ของตัวกลางที่กำลังตรวจสอบ

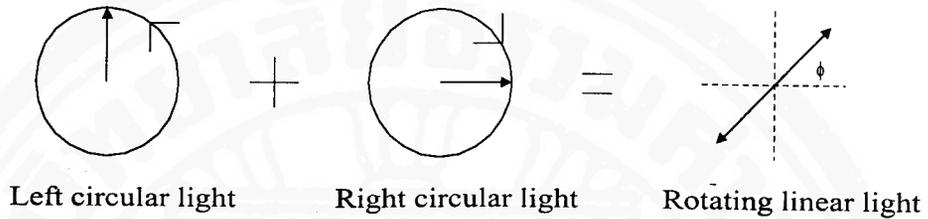
ตามปกติการควบคุมลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นจะทำโดยการปรับทางเชิงกล เช่นการหมุนอุปกรณ์ทางแสงด้วยมอเตอร์ ซึ่งจะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความเร็วในการวัดข้อมูลและส่งผลให้ขอบเขตของงานค่อนข้างจำกัด แต่ในกรณีการมอดูเลตเฟสทางแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ จะทำให้ข้อจำกัดต่างๆลดลงได้ และยังทำให้การวิเคราะห์สัญญาณทางแสงเป็นไปอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว

ทฤษฎี

เส้นใยแก้วนำแสงชนิด Highly Birefringence เป็นเส้นใยแก้วที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยมีความสมมาตรรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นในทางอุดมคติถ้าทำการฉายแสงที่มีสถานะทางโพลาไรซ์เป็นเส้นตรงหรือวงกลมหรือวงรีเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสง สถานะของแสงที่ได้จากปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงยังคงเป็นเช่นเดิม ในทางปฏิบัติสามารถนำความไม่สมบูรณ์ต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสง เช่น ความไม่สม่ำเสมอของแรงที่กระทำรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสง และความไม่สมมาตรรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้ประโยชน์ในการทำให้อสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่ปลายด้านออกเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสาเหตุก็เนื่องมาจากความต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบย่อยของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นใยแก้วนำแสงในแนวแกนหลัก (eigenaxes) มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างกันเพราะค่าดัชนีหักเหต่างกัน เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่าไบรฟรินเจนซ์ (Birefringence)

ในการควบคุมสถานะโพลาไรซ์ของแสงสามารถทำได้หลายวิธีเช่นการทำให้เส้นใยแก้วนำแสงโค้งงอ (bending) การยืดเส้นใยแก้วนำแสง (stretching) หรือการให้ความร้อนกับเส้นใยแก้วนำแสง (heating) ในงานวิจัยนี้ใช้การยืดเส้นใยแก้วนำแสงตามยาว เพื่อทำให้แสงส่องผ่านเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวเปลี่ยนแปลงเฟสและทำให้แสงมีสถานะโพลาไรซ์ตามต้องการ

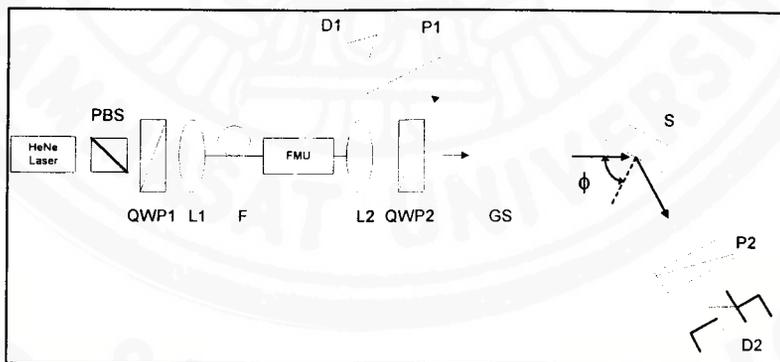
สำหรับการศึกษา เริ่มจาก ใช้หลักการรวมกันของแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลม ซึ่งมีปลายเวกเตอร์
 ลัพธ์ของสนามไฟฟ้ากวาดไปในทิศทางตรงกันข้าม (ทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา) ทำให้ได้ผลเป็น
 แสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น ซึ่งมีมุม azimuth ขึ้นกับความต่างเฟส ระหว่างสถานะวงกลมทั้งสอง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการรวมกันของแสงโพลาไรซ์วงกลมโดยให้ผลออกมาเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นซึ่งมีมุม azimuth เป็น ϕ

ในการมอดูเลตนี้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์เป็นตัวกลางของแสง โดยทำการมอดูเลตให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมทั้งสองซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมุม azimuth ของแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่เอาท์พุท (output) ซึ่งสามารถควบคุมได้

รูปแบบของการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางของแสงแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการจัดชุดการทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลาง P1,2 : Polarizers ; L1,2 : Lenses ; QWP1,2 : Quarter-Wave Plates; Gs : Glass Slide ; D1,2 : Detectors ; FMU : Fiber Modulation Unit ; F : HiBi Fiber ; S : Sample ; PBS : Polarizing Beam Splitter .

จากรูปที่ 2 ทางด้านอินพุต (input) แสงโพลาไรซ์วงกลมถูกส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงซึ่งได้รับการมอดูเลตทำให้ความต่างเฟสของแสงซึ่งเคลื่อนที่ใน eigenaxes ทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่เอาต์พุต แสงทั้งสองถูกเปลี่ยนให้มีสถานะโพลาไรซ์วงกลมหมุนทวนและตามเข็มนาฬิกา (ได้จากการปรับ QWP ให้มีทิศทางของ optic axis ที่เหมาะสม) ซึ่งเมื่อแสงวงกลมทั้งคู่รวมกันจะให้เป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น โดยการเปลี่ยนแปลงความต่างเฟสระหว่างลำแสงทั้งสองด้วย FMU ทำให้สามารถควบคุมมุม azimuth ของแสงเอาต์พุตได้

การพิจารณาโดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเสนอโดย Jones (Jones,1941) ของสัญญาณเอาต์พุต (\vec{E}_{output}) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_{output} = Q_{\theta} M \vec{E}_{input} \quad (1)$$

เมื่อ \vec{E}_{input} แสดงเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของลำแสงอินพุต M แสดง modulator matrix และ Q_{θ} เป็น Jones matrix สำหรับ quarter-wave plate ซึ่งทำมุม θ กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง

กำหนดให้แสงจาก HeNe laser เขียนแทนได้ด้วย Jones vector ดังนี้

$$\vec{E}_{input} = \frac{E_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i\omega_0 t} \quad (2)$$

โดยที่

E_0 คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า

ω_0 คือ ความถี่เชิงมุม

t คือ เวลา

โดยลำแสงเคลื่อนที่ผ่านส่วนประกอบต่างๆ ตามลำดับ (ตามรูปที่ 2) ในที่นี้ QWP2 ทำมุม 45° กับแกนของเส้นใยนำแสง และจากสมการที่ (1) แสงเอาต์พุต สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_{output} &= Q_{+45^\circ} (M) (\vec{E}_{input}) \\ &= \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \frac{E_0}{2} e^{i\omega_0 t} \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ

$\begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$ คือ Jones matrix สำหรับ Quarter-wave plate ซึ่งมี fast axis ทำ

มุม 45° กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\Delta} \end{bmatrix}$ คือ Pseudo Jones matrix (Tatam et al. (1987)) สำหรับ

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดรักษาสถานะโพลาไรซ์ ซึ่งถูกมอดูเลต

ทำให้เฟสของแสงในแนวแกนที่ตั้งฉากกันมีความแตกต่างเท่ากับ Δ

ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เอาท์พุท เขียนได้ดังนี้

$$\vec{E}_{\text{output}} = \begin{bmatrix} \cos \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) \\ \sin \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} ; \gamma = \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

ซึ่งเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้น ที่สามารถควบคุมมุม azimuth ผ่านการเปลี่ยนแปลงของ Δ เนื่องจากการมอดูเลต

เอาท์พุทของแสงที่ออกมาจะถูกวัดออกมาในรูปของความเข้มแสงโดยใช้อุปกรณ์รับแสง (photodetector) ความเข้มของเอาท์พุทหาได้จาก

$$I_{\text{output}} = (\vec{E}_{\text{output}}) \cdot (\vec{E}_{\text{output}})^* \\ = I_0 \quad (5)$$

เมื่อ $I_0 = |E_0|^2$ ค่าคงที่ และ $(\vec{E}_{\text{output}})^*$ คือคอนจูเกต (conjugate) ของ $(\vec{E}_{\text{output}})$

ดังนั้นการวัดสัญญาณเอาท์พุทหลังจาก Quarter-wave plate จะได้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ถ้านำ Analyzer เข้ามาร่วมก่อน Photodetector การส่งผ่านสนามไฟฟ้าจะกลายเป็น

$$\vec{E}_{\text{analyzer}} = A_\theta \vec{E}_{\text{output}} \\ = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta \cos \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) + \cos \theta \sin \theta \sin \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) \\ \cos \theta \sin \theta \cos \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) + \sin^2 \theta \sin \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right) \end{bmatrix} E_0 e^{i(\omega_0 t + \gamma)} \quad (6)$$

เมื่อ

A_θ คือ Jones matrix สำหรับ analyzer ที่ทำมุม θ ใดกับแกนอ้างอิง

$$= \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

ดังนั้น ความเข้มหลังจากผ่าน analyzer เขียนได้เป็น

$$I_{\text{analyzer}} = (\vec{E}_{\text{analyzer}}) \cdot (\vec{E}_{\text{analyzer}})^* \\ = \frac{I_0}{2} [1 + \cos \{2\theta - (\Delta + \frac{\pi}{2})\}] \quad (7)$$

สัญญาณเอาท์พุทที่แสดงนี้เป็นฟังก์ชันของมุมที่ทำกับ analyzer (θ) และ modulation phase (Δ) จากสมการที่ (7) สังเกตได้ว่าแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณคงที่ในขณะที่เฟสของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไป และผลที่ได้ตามมาก็คือสามารถควบคุมทิศทาง (orientation) ของแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นได้ตามต้องการ

เมื่อนำสัญญาณทางแสงที่ได้ไปวัดค่าทางแสงของพื้นผิวตัวอย่างโดยวัดออกมาในเทอมของ ellipsometric parameters Ψ และ Δ (Azzam, 1977) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Psi = \tan^{-1} \left[\frac{|r_p|}{|r_s|} \right] \quad (8)$$

$$\Delta = \delta_p - \delta_s \quad (9)$$

เมื่อ r_p และ r_s เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบ Fresnel ในแนวขนาน (p) และแนวตั้งฉาก (s) กับระนาบอ้างอิงตามลำดับ เมื่อ δ_p และ δ_s เป็นการเปลี่ยนเฟสของแสงในแนวขนาน (p) และแนวตั้งฉาก (s) จากการสะท้อนที่พื้นผิวของตัวกลางที่นำมาวัดค่า ในการวัดค่าจะเริ่มจากการจัดอุปกรณ์ในการมอดูเลตเฟสของแสงตามรูปที่ 2 โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นเลเซอร์แบบฮีเลียมนีออน ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) สัญญาณเอ๊าท์พุทที่ผ่าน QWP2 จะถูกแยกออกเป็นสองส่วนโดยส่วนหนึ่งนำไปใช้เป็นลำแสงสำหรับอ้างอิง (reference) และอีกส่วนหนึ่งนำไปใช้วัดคุณสมบัติของพื้นผิว การแยกลำแสงดังกล่าวทำได้โดยใช้แผ่นแก้วสไลด์บาง (GS) โดยจัดให้แผ่นแก้วสไลด์ทำมุมประมาณ 3° กับลำแสงที่ตกกระทบ แสงที่สะท้อนจากแผ่นแก้วสไลด์นี้ถูกจัดให้ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ (P1) ไปยังตัวรับแสงตัวที่ 1 (photodetector: D1) โดยสัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงตัวที่ 1 ถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง (reference signal) ส่วนลำแสงหลักที่ทะลุผ่านแผ่นแก้วสไลด์บางไปยังพื้นผิวของ sample ถูกจัดให้มีมุมตกกระทบ (ϕ) เมื่อเกิดการสะท้อนแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวของ sample ถูกส่งผ่านไปยังโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 2 (P2) ซึ่งจัดให้ทำมุม 45° กับระนาบของการตกกระทบและผ่านต่อไปยังตัวรับแสงตัวที่ 2 (photodetector: D2) โดยสัญญาณที่ได้จาก D2 นี้กำหนดให้เป็น สัญญาณเอ๊าท์พุท การวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงทฤษฎีสามารถดำเนินการได้โดยอาศัย Jones matrix จากสมการที่ (4)

$$\vec{E}_1 = \begin{bmatrix} \cos \phi' \\ \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \quad (10)$$

เมื่อ $\phi' = \frac{1}{2} \left(\Delta + \frac{\pi}{2} \right)$ และ $\epsilon = \omega_0 t + \gamma$ เมื่อแสงตกกระทบ sample Jones vector \vec{E}_2 เขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_2 &= S \vec{E}_1 \\ &= \begin{bmatrix} r_p \cos \phi' \\ r_s \sin \phi' \end{bmatrix} E_0 e^{i\epsilon} \end{aligned} \quad (11)$$

เมื่อ Jones matrix ของ sample (s) เขียนได้โดย (Singher, 1990)

$$S = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

ดังนั้นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ผ่าน sample ไปยังโพลาริซเซอร์ที่ทำมุม θ สัมพันธ์กับระนาบของการตกกระทบสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{E}_{3,\theta} &= P_0 \vec{E}_2 \\ &= \begin{bmatrix} r_p \cos\phi' \cos^2\theta - r_s \sin\phi' \cos\theta \sin\theta \\ r_p \cos\phi' \cos\theta \sin\theta - r_s \sin\phi' \sin^2\theta \end{bmatrix} E_0 e^{ic} \end{aligned} \quad (13)$$

เมื่อโพลาริซเซอร์ทำมุม 45° กับระนาบของการตกกระทบจะเขียนสมการที่ (13) ได้เป็น

$$\vec{E}_{3,45^\circ} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} (r_p \cos\phi' - r_s \sin\phi') \frac{E_0}{2} e^{ic} \quad (14)$$

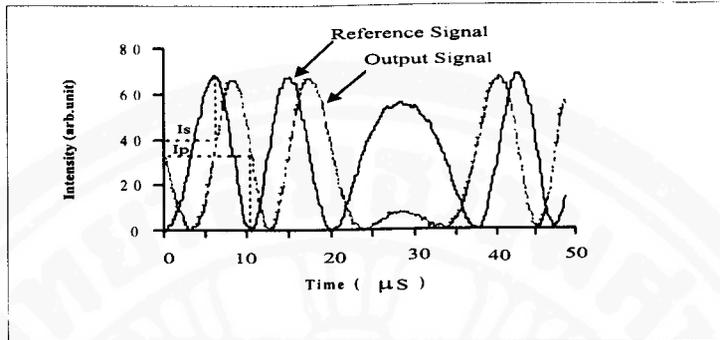
ดังนั้นความเข้มของแสงที่ได้จาก photodetector (D2) คือ

$$\begin{aligned} I_{45} &= \vec{E}_{3,45^\circ} \cdot \vec{E}_{3,45^\circ} \\ I_{45} &= \frac{I_0}{2} \left[R_p \cos^2\phi' + R_s \sin^2\phi' - \sqrt{R_p R_s} \sin 2\phi' \cos\Delta \right] \end{aligned} \quad (15)$$

เมื่อ I_0 เป็นค่าคงที่, R_p และ R_s เป็นสัมประสิทธิ์ความเข้มของแสงสะท้อนแบบ Fresnel โดยที่ $R_p = |r_p|^2$, $R_s = |r_s|^2$ และ ϕ' เป็นมุม azimuth ของแสงโพลาริซซ์ที่ขึ้นกับเวลาของแสงที่ตกกระทบ

ในการศึกษานี้ sample ที่นำมาใช้แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติทางพื้นผิวที่แตกต่างกันในการดูดกลืนแสงที่ $\lambda=632.8$ nm ตัวแรกคือ BK7 เป็นแก้วที่มีคุณสมบัติไม่ดูดกลืนแสง และมีค่าดัชนีหักเหเป็น $1.51-i0.00$ (คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของ sample แสดงได้ด้วยค่าดัชนีหักเหในส่วนของจำนวนจินตภาพ) ส่วนแผ่น Gallium Arsenide (GaAs) เป็นสารกึ่งตัวนำมีค่าการดูดกลืนทางแสงต่ำ ซึ่งค่าดัชนีหักเหและสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงคือ $3.86-i0.20$ มีประโยชน์ในการทำชิปเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ และทอง (Au) มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงสูงซึ่งมีค่าดัชนีหักเหคือ $0.18-i3.10$ ซึ่ง sample ทั้งสามนี้เมื่อทำการทดลองวัดค่าและเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีแล้วจะพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก

โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเขียนขึ้นมาเฉพาะสำหรับการทดลองนี้ ทำให้สามารถหาค่า I_p และ I_s ออกมาได้ ซึ่งหลักการโดยย่อแสดงได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงสัญญาณที่ได้จากการทดลอง สัญญาณอ้างอิง (reference signal) และสัญญาณเอาต์พุต (output signal) และการหาค่า I_p และ I_s โดยอาศัยการพิจารณาเวลา ณ จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดของสัญญาณอ้างอิง ซึ่งแสดงถึงเวลาที่ทั้งสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุต อยู่ในแนวขนานและตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ

การทดลอง

จัดชุดทดลองการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงตามรูปที่ 2 ในชุดทดลองจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ซึ่งให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร ส่องผ่านผลึกแยก/รวมลำแสงชนิดโพลาไรซ์ (PBS : polarizing Beam Splitter) เพื่อให้คุณภาพโพลาไรซ์ของแสงดีขึ้น แผ่นผลึกหน่วงเฟส (Quarter-Wave plate: QWP1) (ทำมาจากผลึก quartz และมี retardation tolerance เท่ากับ $\lambda/500$) ถูกจัดให้แกนของผลึกอยู่ในทิศทางที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ลำแสงก่อนที่จะผ่านเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงมีสถานะของแสงเป็นโพลาไรซ์วงกลมโดยสถานะนี้จะทำให้ปริมาณของแสงที่ผ่านเข้าไปในแกนของเส้นใยแก้วนำแสง (eigenaxes) มีค่าเท่ากัน เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในงานนี้เป็นชนิดที่สามารถรักษาสถานะโพลาไรซ์ของแสงได้ กล่าวคือค่าไบร์พรีนเจนซ์ของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าประมาณ 10^{-4} และมีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตร การมอดูเลตกระทำได้โดยการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงตามแนวแกนของเส้นใยแก้ว ตามจังหวะของสัญญาณขับที่ป้อนให้กับตัวมอดูเลเตอร์ (modulator) สัญญาณที่ใช้ขับตัวมอดูเลเตอร์นี้เป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ประมาณ 20 เฮิร์ตซ์ (ตัวมอดูเลเตอร์นี้ใช้หลักการของสนามแม่เหล็ก ผลักให้แกนเหล็กที่ยึดกับเส้นใยแก้วนำแสงเคลื่อนที่ตามแนวยาวของเส้นใยแก้วนำแสงตามจังหวะการมอดูเลตที่เป็นสัญญาณรูปไซน์) ทางด้าน output แสงที่อยู่ในแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสแผ่นที่สอง (QWP2) ซึ่งถูกจัดให้แกนของแผ่นผลึกทำมุม 45° กับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง มีผลทำให้แสงที่อยู่ในแต่ละแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสงถูกเปลี่ยนเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมที่มีทิศทางการกวาดของเวกเตอร์สวนทางกันดัง

รูปที่ 1 ณ ตรงจุดนี้แสงโพลาไรซ์สถานะวงกลมดังกล่าวก็จะรวมกันทำให้เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์สถานะเชิงเส้นซึ่งมีแนวแกนของแสงทำมุม azimuth ค่าหนึ่งกับแกนของเส้นใยแก้วนำแสง และโดยการมอดูเลตเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไบร์พรีนเจนซ์ (ค่าความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหในแนวแกนของเส้นใยแก้วนำแสง) และความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเทียบกับเวลา ส่งผลให้เกิดความต่างเฟสระหว่างแสงโพลาไรซ์วงกลมทั้งสองและทำให้แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ได้มีทิศทางเปลี่ยนแปลงไปตามจังหวะการมอดูเลต เกิดเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นซึ่งสามารถควบคุมได้ จากนั้นลำแสงที่ผ่านแผ่นผลึกหน่วงเฟสอันดับที่ 2 ออกมาจะถูกนำไปแยกลำแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นส่วนหนึ่งออกจากลำแสงหลัก เพื่อใช้เป็นสัญญาณทางแสงสำหรับอ้างอิง ส่วนลำแสงหลักจะนำไปใช้ในการวัดค่าโดยกำหนดให้เป็นสัญญาณเอทัพูทในการแยกลำแสงนี้จะใช้แผ่นแก้วสไลด์บาง (GS) เป็นตัวแยก โดยจัดให้แผ่นแก้วสไลด์ทำมุมตกกระทบประมาณ 3° กับระนาบของแสงที่ตกกระทบ แสงที่สะท้อนจากแผ่นแก้วสไลด์ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 1 (P1) และตกลงบนตัวรับแสงตัวที่ 1 (D1) ซึ่งสัญญาณที่ได้จากจุดนี้จะกำหนดให้เป็นสัญญาณอ้างอิง ส่วนลำแสงที่ทะลุผ่านแผ่นแก้วสไลด์ไปตกกระทบพื้นผิวของ sample โดยที่กำหนดให้มุมตกกระทบ (ϕ) เปลี่ยนไปที่ละ 5° จาก $0-90^\circ$ ส่วนแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวของ sample ผ่านโพลาไรซ์เซอร์ตัวที่ 2 (P2) และตกลงบนตัวรับแสงตัวที่ 2 (D2) โดยกำหนดให้เป็นสัญญาณเอทัพูท สัญญาณที่ได้จากตัวรับแสงทั้งสอง (สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเอทัพูท) ถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

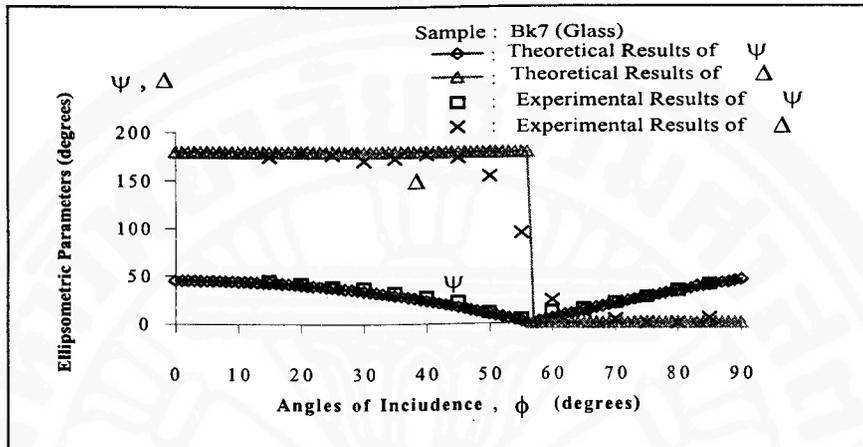
ในส่วนของการทดลองได้ทำการวัดค่า Ψ และ Δ สำหรับ sample ต่างชนิดกันซึ่งประกอบไปด้วย แผ่นแก้ว BK7 แผ่น Gallium Arsenide (GaAs) และแผ่นทอง (Au) นอกจากนั้นยังได้นำค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ดังกล่าว ไปคำนวณค่าดัชนีหักเห N_1 (Tompkins,1993) ของแต่ละsample ดังแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า Ψ , Δ และ N_1 ระหว่างผลการทดลองและทฤษฎีสำหรับมุม

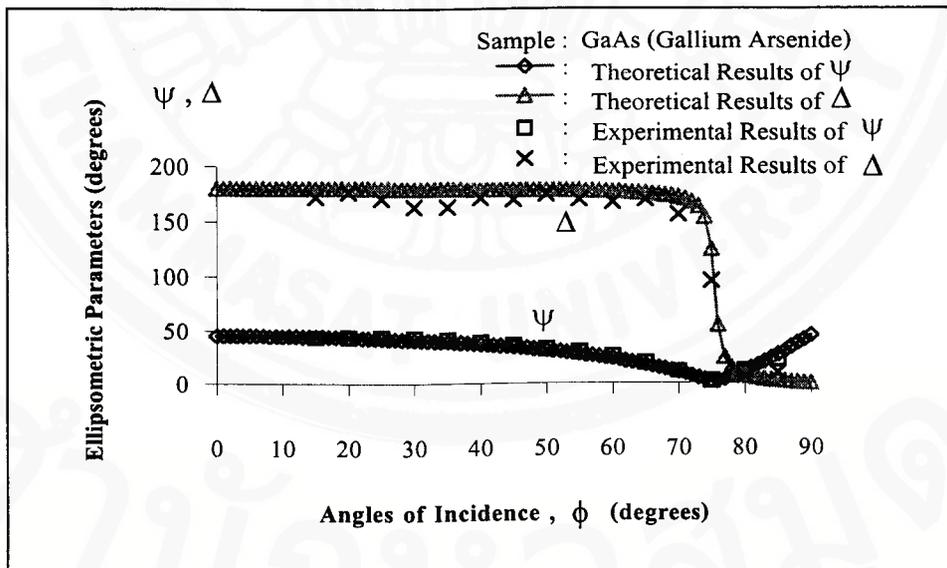
$$\text{ตกกระทบ } (\phi) = 75^\circ$$

SAMPLE	BK7		GaAs		Au	
	ทฤษฎี	การทดลอง	ทฤษฎี	การทดลอง	ทฤษฎี	การทดลอง
Ψ	26.98	27.09	1.91	2.22	41.63	42.73
Δ	0	0	124.32	95.51	72.53	81.14
N_1	1.51-i0.00	1.51-i0.00	3.86-i0.20	3.74-i0.27	0.18-i3.10	0.26-i2.92

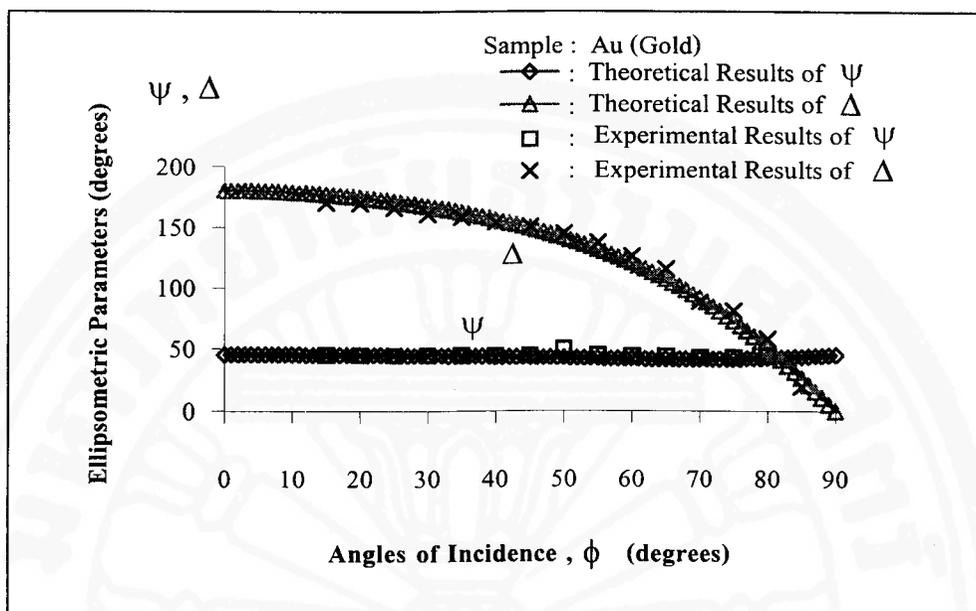
ผลการทดลอง



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า Ψ และ Δ ของแผ่น BK7 ระหว่างค่าจากการทดลองและทฤษฎี



รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่า Ψ และ Δ ของแผ่น GaAs ระหว่างค่าจากการทดลองและทฤษฎี



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่า Ψ และ Δ ของแผ่น Au ระหว่างค่าจากการทดลองและทฤษฎี

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าเทคนิคการมอดูเลตเฟสทางแสงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าทางแสงสำหรับพื้นผิวที่ต่างชนิดกันได้ โดยแสดงค่าทางแสงออกมาในเทอมของ ellipsometric parameters Ψ และ Δ

จากการศึกษาพบว่ายังมีความแตกต่างกันอยู่บ้างระหว่างผลการทดลองและค่าในทางทฤษฎี ซึ่งอาจมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น คุณภาพของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้ การปรับมุมของอุปกรณ์ต่างๆ ไม่สามารถปรับได้ละเอียดพอเนื่องมาจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ ตลอดจนการวิเคราะห์สัญญาณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการอ่านค่าได้น้อย จึงเป็นสิ่งที่จะต้องปรับปรุงต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับก็คือ สามารถที่จะนำเทคนิคการมอดูเลตเฟสของแสงโดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการวัดทางแสงอื่นๆ ได้ หรือนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensing device applications) โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบสถานะโพลาไรซ์ของแสงที่แตกต่างกันก่อนและหลังการตรวจวัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tatam, R. P., Pannell, C. N., Jones, J. D. C. and Jackson, D. A. 1987. Full Polarisation State Control Utilizing Linearly Birefringent Monomode Optical Fibre, Journal of Lightwave Technology (LT-5) : pp980-985.
- [2] Jones, R.C. 1941. A New Calculus for the Treatment of Optical System. Journal of the Optical Society of America (31) : pp488-493.
- [3] Singher, L., Brunfeld, A. and Shamir, J. 1990. Ellipsometry with a Stabilised Zeeman Laser. Applied Optics (29) : pp2405-2408.
- [4] Harland G. Tompkins. 1993. A User's Guide to Ellipsometry (New York : Academic Press)
- [5] Azzam, RMA and Bashara, NM. 1977. Ellipsometry and Polarised Light (Amsterdam: North Holland)

The measurement of ellipsometric parameters of various surfaces using a highly birefringent fiber polarization modulation technique

Suebtakul Suchat^{*} Ratchapak Chitaree^{**}

^{*} Physic Department, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Rangsit Campus, Pathumtani 12121

^{**} Applied Physics Department, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Ladkrabang District, Bangkok 10520

Abstract

The polarization modulation technique, which is considered as a technique for controlling the state of polarization of light, was studied for a potential of the optical measurement on surfaces of interest. In this research, a length of highly birefringent optical fiber was used as light medium. The modulation method was performed by stretching the fiber longitudinally by a modulator with a constant drive frequency. In this study, optical data such as index of refraction, reflection coefficients and ellipsometric parameters of surfaces under study were obtained. The experimental results gained were in good agreement to the corresponding theoretical analysis.