

รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องวัดความหนาฟิล์มบางโปร่งแสงด้วยวิธีการแทรกสอดของแสงขาว Development of Transparent Thin-film Thickness Measurement using White Light Interferometric Method

ชื่อผู้วิจัย 1. ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์
2. วราวุฒิ เถาสัตตา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินหรือรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การพัฒนาเครื่องวัดความหนาฟิล์มบางโปร่งแสงด้วยวิธีการแทรกสอดของแสงขาว

Development of Transparent Thin-film Thickness Measurement using White Light Interferometric Method



ชื่อผู้วิจัย 1. ภูมิินทร์ จินดาจิชาวัฒน์
2. วราวุฒิ เถาสัตตา

RCH
ด.ค
176,82
ศ.663ก
ท. 2

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 115568
วัน,เดือน,ปี..... 21 ส.ค. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินหรือรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12312411
b.....
i.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553 คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

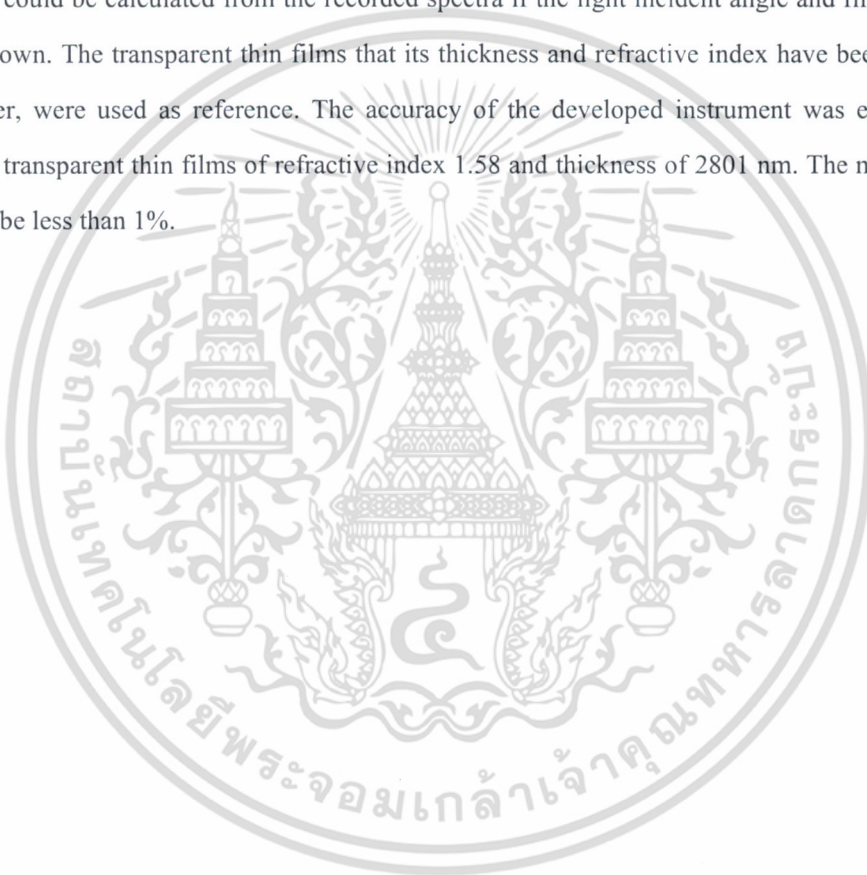
งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือวัดความหนาฟิล์มบางโปร่งแสง โดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงขาวที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างผิวหน้าของฟิล์มกับอากาศและแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างฟิล์มกับฐานรอง ผลต่างเฟสของแสงทั้งสองขึ้นกับ มุมตกกระทบของแสง ความยาวคลื่น ดัชนีหักเห และความหนาของฟิล์ม แสงที่สะท้อนจากฟิล์มบางจะถูกนำเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น HR4000 ของบริษัท Ocean Optics ผ่านทางใยแก้วนำแสง โดยการวิเคราะห์รูปแบบของการแทรกสอดที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ค่าความหนาของฟิล์มสามารถหาได้ การทดสอบความถูกต้องในการวัดความของฟิล์มบางโปร่งแสงทำโดยเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของฟิล์มกับผลการวัดจากเครื่อง Ellipsometer จากการวัดฟิล์มบางโปร่งแสงดัชนีหักเห 1.58 ความหนา 2801 นาโนเมตร พบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นให้ผลการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

In this research, the spectroscopic reflectometer was developed. The thickness of transparent thin film can be measured using the white light interference method. The interference patterns of reflected light from the air-film interface and film-substrate interface as a function of wavelength were recorded by spectrometer model HR4000 from Ocean Optics, Inc. via optical fiber. This white light interference patterns were dependent on light incident angle, wavelength, index of refraction and film thickness. The film thickness could be calculated from the recorded spectra if the light incident angle and film refractive index were known. The transparent thin films that its thickness and refractive index have been measured by ellipsometer, were used as reference. The accuracy of the developed instrument was examined by measuring the transparent thin films of refractive index 1.58 and thickness of 2801 nm. The measurement error found to be less than 1%.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	i
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iii
สารบัญเรื่อง.....	iv
สารบัญตาราง.....	v
สารบัญรูป.....	vi
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การแทรกสอด.....	3
2.2 การเปลี่ยนเฟสเนื่องจากการสะท้อน.....	4
2.3 การแทรกสอดในฟิล์มบาง.....	5
2.4 การแทรกสอดในฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจก.....	7
2.5 การคำนวณความหนาฟิล์มบาง.....	8
บทที่ 3 การออกแบบและดำเนินการสร้าง.....	12
3.1 การออกแบบและสร้าง Spectroscopic Reflectometer.....	12
บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	16
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน.....	22
ภาคผนวก.....	23
เอกสารอ้างอิง.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ความยาวคลื่นและส่วนกลับของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งจุดยอดคลื่น เมื่อแสงตกกระทบบำมุม 0°	18
2. ความยาวคลื่นและส่วนกลับของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งจุดยอดคลื่น เมื่อแสงตกกระทบบำมุม 15°	19
3. ความยาวคลื่นและส่วนกลับของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งจุดยอดคลื่น เมื่อแสงตกกระทบบำมุม 20°	19
4. ผลการวัดความหนาฟิล์มบาง โปร่งแสงและความคลาดเคลื่อน	20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 เฟสของคลื่น E_1 และ E_2	
(a) ผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ เท่ากับ $(2m+1)\pi$	4
(b) ผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ เท่ากับ $2m\pi$	4
2 การสะท้อนแสง	
(a) ถ้า $n_1 < n_2$ แสงสะท้อนจะกลับเฟส 180°	5
(b) ถ้า $n_1 > n_2$ แสงสะท้อนจะไม่กลับเฟส.....	5
3 การแทรกสอดจากการสะท้อนแสงของฟิล์มบาง.....	5
4 การแทรกสอดจากการสะท้อนแสงของฟิล์มบางที่เคลือบบนแก้ว.....	7
5 รีวแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบาง SiO_2	9
6 ความสัมพันธ์ระหว่างอันดับของยอดคลื่นและท้องคลื่นกับส่วนกลับของความยาวคลื่น.....	10
7 ไดอะแกรมแสดงเส้นทางเดินแสงของ Reflectometer.....	12
8 ชุดอุปกรณ์ Spectroscopic Reflectometer ที่สร้างขึ้น.....	13
9 การจัดระบบการวัดความหนาของฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้น.....	14
10 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ Spectroscopic Reflectometer ที่สร้างขึ้น.....	14
11 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ Spectroscopic Reflectometer ขณะทำการวัด โดยให้แสงตกกระทบตั้งฉาก (ซ้าย) และทำมุม 150 (ขวา) กับพื้นผิว.....	15
12 สเปกตรัมการสะท้อนของแสงที่มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ.....	17
13 %Reflection ของแสงที่มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ.....	18
14 อันดับของตำแหน่งยอดคลื่นกับส่วนกลับของความยาวคลื่นที่มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ความหนาของฟิล์มบางเป็นส่วนสำคัญที่ต้องทราบค่าสำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทสารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์เชิงแสง เช่น ฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ การเคลือบฟิล์มบางของสารไดอิเล็กตริกป้องกันการสะท้อนแสงของเลนส์ และช่วยการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการของกระจกเลเซอร์ การเคลือบแข็งป้องกันการขีดข่วน และการเคลือบป้องกันการเกาะของไอน้ำของเลนส์แว่นตา เป็นต้น การเคลือบฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการปั่น (spin coating) การระเหยไอในสุญญากาศ (vacuum evaporation) การสปัตเตอร์ (sputtering) และการจุ่ม (dip coating) เป็นต้น ความหนาของฟิล์มบางมีความแตกต่างกันขึ้นกับการใช้งาน ตั้งแต่ระดับ 2-3 ชั้นอะตอม (< 1 nm) จนถึงความหนาหลายร้อยไมครอน

การวัดความหนาของฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีเข็มตลก (Stylus), วิธีเอกซเรย์ (X-ray Techniques) และวิธีทางแสง (Optical Methods) การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยใช้วิธีการแทรกสอดของแสงขาว (White Light Interferometric Method) เป็นวิธีการวัดทางแสงวิธีหนึ่งที่สะดวกและสามารถสร้างได้ง่าย ราคาถูกเมื่อเทียบกับวิธีทางแสงอื่น ๆ เนื่องจากสามารถใช้แหล่งกำเนิดแสงทั่วไปได้ (ไม่ต้องใช้แสงเลเซอร์) การใช้งานทำได้สะดวก รวดเร็ว เนื่องจากไม่ต้องมีการเตรียมชิ้นงานแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังมีความแม่นยำสูงและเป็นวิธีมาตรฐานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมผลิตเลนส์และกระจก เป็นต้น

การวัดความหนาของฟิล์มบางโปร่งแสง (ซึ่งเกิดจากการเคลือบพื้นผิวใด ๆ ด้วยสารไดอิเล็กตริก) มีหลายวิธี การวัดโดยเทคนิคทางแสงเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส (non-contact) และไม่ทำลาย (non-destructive) เช่นการวัดด้วยเทคนิค ellipsometry และ Interferometry เป็นต้น เทคนิค ellipsometry ใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า ellipsometer โดยอาศัยหลักการที่ว่าแสงโพลาไรซ์ที่ตกกระทบลงบนฟิล์มบางด้วยมุมใด ๆ แสงที่มีแนวโพลาไรซ์สองแนวที่ตั้งฉากกันจะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่างกัน (สะท้อนแสงได้ไม่เท่ากัน) นอกจากนี้ยังทำให้เฟสของแสงโพลาไรซ์ทั้งสองเลื่อนไปไม่เท่ากันด้วย ขึ้นกับความหนาและดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับมุมตกกระทบอีกด้วย โดยการใช้เทคนิคนี้จะสามารถวัดค่าความหนาและสมบัติเชิงแสง (optical constant) ได้แก่ ดัชนีหักเห (refractive index) และ extinction coefficient (ดัชนีหักเหคือ ค่าประมาณที่บอกถึงความเร็วของแสงในตัวกลาง ดัชนีหักเหของตัวกลาง นิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเร็วแสงในสุญญากาศต่อความเร็วแสงในตัวกลาง ส่วน extinction coefficient เป็นปริมาณที่บอกถึงการดูดกลืนแสงของตัวกลาง) (Azzam and Bashara, 1987)

สำหรับเทคนิค Interferometry ใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า spectroscopic reflectometer ทำงานโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างผิวหน้าของฟิล์มกับอากาศ (film-air interface) และแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างฟิล์มกับฐานรอง (film-substrate interface) ผลต่างเฟสของแสงทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นกับ มุมตกกระทบ ความยาวคลื่น ดัชนีหักเห และ ความหนาของฟิล์ม โดยการวิเคราะห์รูปแบบของการแทรกสอดที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ความหนาของฟิล์มสามารถหาได้ถ้าทราบ มุมตกกระทบ ความยาวคลื่นของแสงและดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม (Floumoy et. al. 1972) ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง spectroscopic reflectometer รวมทั้งรายละเอียดของเทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มมีดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแทรกสอด

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นคลื่นตามขวาง ทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงแสดงได้ด้วย propagation vector, k ที่ตำแหน่งใด ๆ ที่บอกโดยเวกเตอร์ r และที่เวลา t ใด ๆ สนามไฟฟ้า, $E(t, r)$ ของแสงที่มีแอมพลิจูด E_0 และมีเฟส ϕ สามารถเขียนได้โดย $E(t, r) = E_0 \exp(i(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi))$ หรือ $E(t, r) = E_0 \sin(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi)$ เพื่อความสะดวก พิจารณาว่าแสงเดินทางใน 1 มิติ กำหนดให้เป็นที่ทิศทาง x ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n และมี extinction coefficient K สามารถเขียนสนามไฟฟ้าของแสงได้ว่า

$$E(t, r) = E_0 \cdot \exp[i\{\omega t + (n + iK)kx + \phi\}] = E_0 \cdot e^{-Kkx} \sin(\omega t + nkx + \phi) \quad (1)$$

เมื่อ k คือ เลขคลื่น (wave number) ของแสง มีค่าเท่ากับ $2\pi / \lambda$ โดย λ คือความยาวคลื่นแสงในอากาศ (ประมาณว่าดัชนีหักเหของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเท่ากับดัชนีหักเหของสุญญากาศ) เทอม e^{-Kkx} มีค่าลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง x แสดงว่าแอมพลิจูดของแสงลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทางที่แสงเดินทางในตัวกลาง ซึ่งหมายถึงการดูดกลืนแสงในตัวกลางนั่นเอง

คลื่นสองคลื่นหรือมากกว่าเมื่อมารวมกันที่ตำแหน่งใด ๆ จะเป็นไปตามหลักการทับซ้อน (principle of superposition) ซึ่งกล่าวว่าสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่เกิดจากคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal wave) ตั้งแต่สองคลื่นขึ้นไปมาซ้อนทับกันที่ตำแหน่ง และ เวลาใด ๆ จะเป็นผลรวมทางพีชคณิตของสนามไฟฟ้าของคลื่นแต่ละคลื่น นั่นคือ

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

เมื่อ E_1, E_2, E_3 คือ สนามไฟฟ้าของคลื่นแต่ละคลื่น ที่ตำแหน่งและเวลาหนึ่ง พิจารณาคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่เดียวกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน แต่มีเฟสต่างกัน ϕ_1 และ ϕ_2 คือ

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1) \quad \text{และ} \quad E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2)$$

คลื่นรวมคือ

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1) + E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2) \quad (2)$$

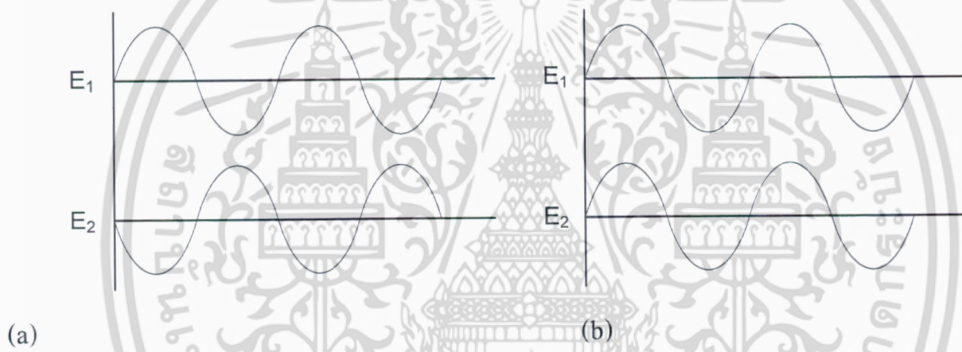
ความเข้มแสงของคลื่นรวมคือ

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าคลื่นทั้งสองมีการแทรกสอดกัน (interference) โดยคลื่นรวมที่เกิดจากการแทรกสอดจะมีความเข้มแสงดังสมการ (3) และเรียกเทอม $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2)$ ว่าเทอมแทรกสอด (interference term) โดยความสว่างของคลื่นรวมจะขึ้นกับเทอมแทรกสอดนี้

พิจารณาผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ ของคลื่นทั้งสอง ถ้า $(\phi_1 - \phi_2) = (2m+1)\pi$ เมื่อ $(m = 0, 1, 2, \dots)$ จะได้ว่า $\cos(\phi_1 - \phi_2) = -1$ ดังนั้น $I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ ซึ่งเป็นค่าความสว่างต่ำสุดของคลื่นรวม เกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน $(2m+1)\pi$ ซึ่งหมายถึงคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกันข้าม (anti phase) ดังรูปที่ 1 (a) เรียกว่าเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive Interference) แต่ถ้าผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2) = 2m\pi$ เมื่อ $(m = 0, 1, 2, \dots)$ จะได้ว่า $\cos(\phi_1 - \phi_2) = 1$ ดังนั้น $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ ซึ่งเป็นค่าความสว่างสูงสุดของคลื่นรวม เกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน $2m\pi$ ซึ่งหมายถึงคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน (inphase) ดังรูปที่ 1 (b) เรียกว่าเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive Interference)



รูปที่ 1 เฟสของคลื่น E_1 และ E_2

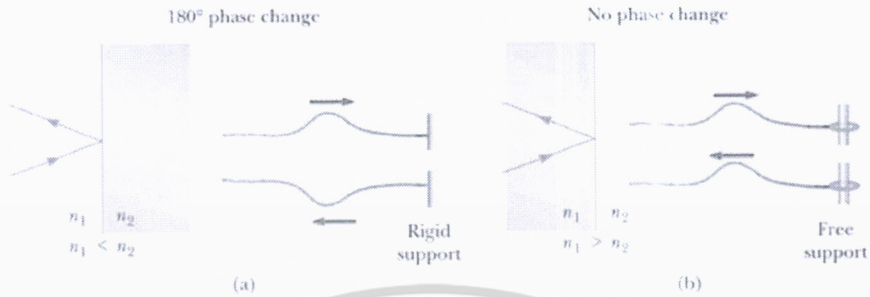
(a) ผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ เท่ากับ $(2m+1)\pi$

(b) ผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ เท่ากับ $2m\pi$

2.2 การเปลี่ยนเฟสเนื่องจากการสะท้อน

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่หนึ่งไปยังตัวกลางที่สองที่มีดัชนีหักเหต่างกัน แสงส่วนหนึ่งจะเดินทางผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่สองและแสงอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนที่รอยต่อระหว่างตัวกลางกลับเข้าสู่ตัวกลางที่หนึ่งเสมอ เฟสของแสงที่เดินทางเข้าสู่ตัวกลางที่สองจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่เฟสของแสงที่สะท้อนอาจมีค่าเปลี่ยนไปหรือไม่ขึ้นกับดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสอง ปรากฏการณ์นี้เป็นจริงกับคลื่นทุกชนิด เช่นคลื่นในเส้นเชือกในรูปที่ 2 คลื่นที่สะท้อนจากปลายที่ยึดแน่นกับผนังจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° ดังรูปที่ 2 (a) เทียบได้กับแสงสะท้อนซึ่งเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า จะกลับเฟส 180° รูปที่ 2 (b) แสดงให้เห็นว่าคลื่นที่สะท้อนจากปลายที่ปล่อยอิสระ จะไม่เปลี่ยนเฟส

เทียบได้กับแสงสะท้อนเมื่อเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า จะไม่เปลี่ยนเฟส



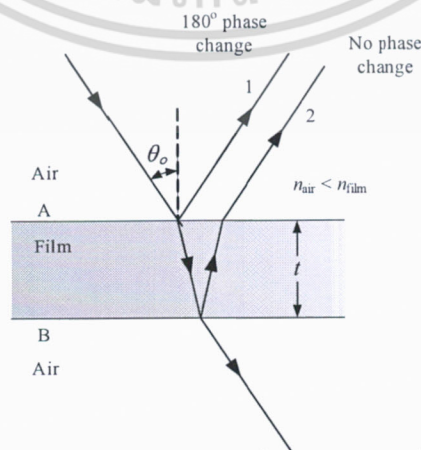
รูปที่ 2 การสะท้อนแสง

- (a) ถ้า $n_1 < n_2$ แสงสะท้อนจะกลับเฟส 180°
- (b) ถ้า $n_1 > n_2$ แสงสะท้อนจะไม่กลับเฟส

เมื่อคลื่นเดินทางถึงรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน นอกจากเกิดการสะท้อนแล้ว จะมีคลื่นส่วนหนึ่งสามารถเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองได้ คลื่นส่วนนี้จะไม่มีการเปลี่ยนเฟสไม่ว่าตัวกลางที่สองจะมีดัชนีหักเหสูงหรือต่ำกว่าก็ตาม

2.3 การแทรกสอดในฟิล์มบาง

การแทรกสอดของแสงอาจเกิดขึ้นได้ถ้าแสง 1 ลำถูกแยกออกเป็น 2 ลำแล้วเดินทางมารวมกันอีกครั้ง ตัวอย่างที่พบได้ในธรรมชาติ เช่น แสงที่สะท้อนจากฟิล์มของน้ำมันที่ลอยอยู่ที่ผิวน้ำหรือฟองสบู่จะเห็นเป็นสีรุ้ง เป็นต้น สีรุ้งนี้เกิดจากการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวหน้าและผิวด้านหลังของฟิล์ม



รูปที่ 3 การแทรกสอดจากการสะท้อนแสงของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอ t มีดัชนีหักเห n ดังรูปที่ 3 สมมติว่าแสงตกกระทบฟิล์มจากด้านบนทำมุมน้อย ๆ กับเส้นปกติ (ตกตั้งฉากกับพื้นผิวหรือมุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) แสงสะท้อนจะเกิดที่ผิวน้ำและผิวด้านหลังของฟิล์มซึ่งมีผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ $2t$ แสงสะท้อนทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกัน การแทรกสอดจะเป็นแบบเสริมหรือหักล้างต้องพิจารณาดังนี้

- เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 แสงสะท้อนจะมีมุมเปลี่ยนไป 180° ถ้า $n_2 > n_1$ และจะไม่มีมุมเปลี่ยนเฟสถ้า $n_2 < n_1$
- ความยาวคลื่นในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n คือ λ_n โดย

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (4)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

จากรูปที่ 3 รังสี 1 ซึ่งสะท้อนจากผิวด้านบน A จะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° เมื่อเทียบกับแสงที่ตกกระทบ ส่วนรังสี 2 ซึ่งสะท้อนจากผิวด้านล่าง (B) จะไม่มีการเปลี่ยนเฟสเมื่อเทียบกับแสงตกกระทบ จะเห็นว่าผลจากการสะท้อน แสงสะท้อนทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 180° อย่างไรก็ตาม เนื่องจากรังสี 2 เดินทางผ่านฟิล์มจึงเดินทางด้วยระยะทางที่ยาวกว่ารังสี 1 อยู่ ประมาณ $2t$ ถ้าระยะทาง $2t$ นี้มีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคี่ของ $\lambda_n/2$ (มีความต่างเฟสเนื่องจากผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ 180°) รังสี 1 และ รังสี 2 จะมีเฟสตรงกันและแสงทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ดังนั้น การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

และ เนื่องจาก $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ จึงทำให้การแทรกสอดแบบเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

ถ้าความหนาของฟิล์มมีค่าทำให้ $2t$ เท่ากับจำนวนเต็มของ λ_n (ผลต่างเฟสเนื่องจากความต่างของเส้นทางเดินแสงเท่ากับ 0) รังสี 1 และ รังสี 2 จะยังคงมีเฟสต่างกัน 180° เหมือนเดิม จึงเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ดังนั้นการแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดขึ้นเมื่อ

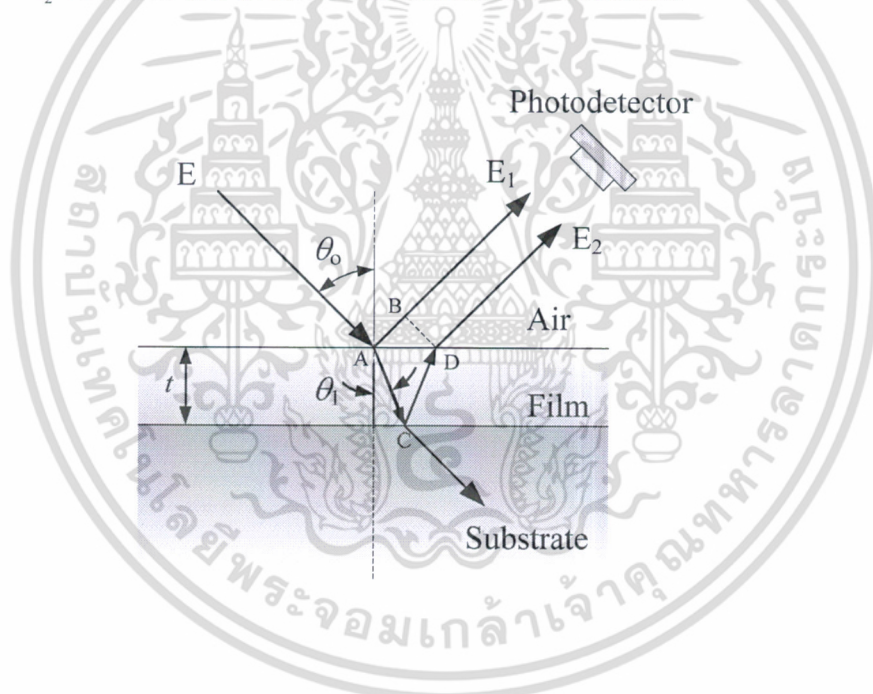
$$2nt = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างดังกล่าวข้างต้นนี้เป็นจริงเมื่อตัวกลางที่ด้านบนและด้านใต้ฟิล์มเป็นตัวกลางชนิดเดียวกัน ตัวกลางนี้อาจมีดัชนีหักเหสูงหรือต่ำกว่าดัชนีหักเหฟิล์ม ผลของการสะท้อนจะทำให้แสงสะท้อนทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° เสมอ

2.4 การแทรกสอดในฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจก

ถ้าฟิล์มอยู่ในตัวกลางที่ด้านบนและด้านล่างมีดัชนีไม่เท่ากัน เช่น ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นแก้ว ดังรูป 4 โดยฟิล์มบางมีดัชนีหักเห (n_1) เท่ากับ 1.4 แผ่นแก้วมีดัชนีหักเห (n_2) เท่ากับ 1.5 และ อากาศมีดัชนีหักเห (n_0) เท่ากับ 1 ในกรณีนี้แสงสะท้อน E_1 จะกลับเฟส 180° เนื่องจากแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำ (อากาศ) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า (ฟิล์ม) ส่วนแสงที่สะท้อนที่จุด C ก็กลับเฟส 180° เช่นกัน เนื่องจากเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำ (ฟิล์ม) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า (แก้ว) นั่นคือ แสงสะท้อน E_1 และ E_2 จึงมีเฟสตรงกัน ดังนั้น การแทรกสอดแบบเสริมจึงเกิดเมื่อ



รูปที่ 4 การแทรกสอดจากการสะท้อนแสงของฟิล์มบางที่เคลือบบนแก้ว

$$2n_1t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

ในขณะที่การแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดเมื่อ

$$2n_1t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ฟิล์มมีดัชนีหักเหสูงกว่าแก้ว เช่น n_1 มีค่าเท่ากับ 1.6 สถานะการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างจะเกิดตรงข้ามกับกรณีข้างต้น

จากสมการ (3) พบว่าการแทรกสอดแบบเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อ $\cos(\phi_1 - \phi_2) = \cos \Delta\phi = +1$ และการแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดเมื่อ $\cos(\phi_1 - \phi_2) = \cos \Delta\phi = -1$ หมายความว่า การแทรกสอดจะเป็นแบบเสริมหรือแบบหักล้างขึ้นอยู่กับผลต่างเฟส $\Delta\phi$ ของแสงสะท้อน E_1 และ E_2 ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับผลต่างระหว่างเส้นทางเดินของแสงทั้งสอง คือ Δx โดยความสัมพันธ์ $\Delta\phi = k \cdot \Delta x$ (เมื่อ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$) จากรูปที่ 4 Δx คือ ผลต่างของเส้นทาง ACD กับเส้นทาง AB นั่นคือ

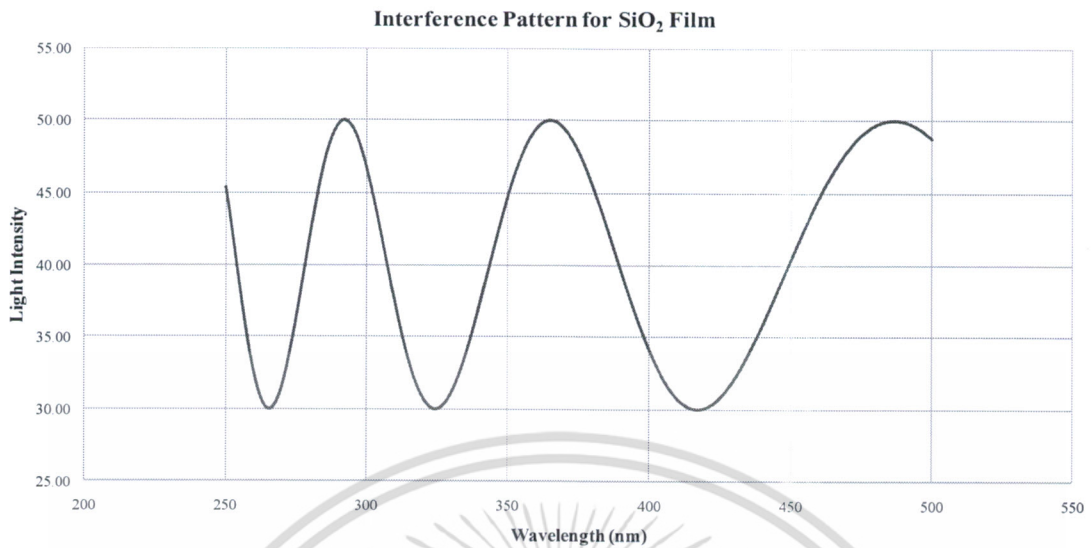
$$\Delta\phi = k \cdot \left(\frac{2n_1 t}{\cos \theta_1} - 2n_0 t \sin \theta_0 \tan \theta_1 \right)$$

จากแสงสะท้อน E_1 และ E_2 จะเกิดการแทรกสอด

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[(2kr) (n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

2.5 การคำนวณความหนาฟิล์มบาง

ในการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยใช้หลักการแทรกสอดนั้น ฟิล์มบางที่มีความหนาคงที่ค่าหนึ่งจะถูกฉายด้วยแสงขาว (แสงขาวคือแสงที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่อง) พบว่าการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างจะเกิดกับความยาวคลื่นที่เหมาะสมหลายความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง และ รี้วแทรกสอดนี้สามารถถูกวัดได้ด้วยสเปกโทรมิเตอร์ (สเปกโทรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ) โดยการจำลองการสะท้อนของแสงขาวจากฟิล์มบาง SiO_2 ที่เคลือบบนผิวแก้วด้วยคอมพิวเตอร์ตามสมการ (8) พบว่า จะมีความเข้มแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นรี้วแทรกสอดตามความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รีวแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบาง SiO₂

จากสมการ (8) พบว่าตำแหน่งที่ความเข้มแสงมีค่าสูงสุด (เกิดการแทรกสอดแบบเสริม) เกิดเมื่อ $\cos[(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)]$ มีค่าสูงสุดคือ +1 หรือมุม $[(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)]$ มีค่าเท่ากับ $2M\pi$ และตำแหน่งที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำสุด (เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง) เกิดเมื่อ $\cos[(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)]$ มีค่าต่ำสุดคือ -1 หรือมุม $(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)$ มีค่าเท่ากับ $(2M+1)\pi$ เมื่อ M คือเลขจำนวนเต็มใดๆ ซึ่งในกรณีนี้คือ ลำดับของยอดคลื่น (จุดสว่าง) หรือ ท้องคลื่น (จุดมืด) ในรูปของรีวแทรกสอดที่วัดได้จากรูปที่ 5 เริ่มจากซ้ายไปขวา เพื่อความสะดวกจะพิจารณากรณีที่แสงตกกระทบทำมุมศูนย์หรือตั้งฉากกับพื้นผิว นั่นคือ θ_0 เท่ากับ 0 ซึ่งจะทำให้ θ_1 เท่ากับ 0 ด้วย ซึ่งจะได้ว่า $(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1) = 2kn_1t$

พิจารณาจุดที่เป็นยอดคลื่น จะได้ว่า $2kn_1t = 2M\pi$ เมื่อแทนค่า $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้ว่า $\frac{1}{\lambda} = \frac{M}{2n_1t}$ เมื่อเทียบกับรูปทั่วไปของสมการเชิงเส้น $y = ax + c$ เมื่อ a คือความชัน และ c คือจุดตัดแกน y ในที่นี้ $\frac{1}{\lambda}$ คือ y และ M คือตัวแปร x ส่วนความชันของกราฟคือ $\frac{1}{2n_1t}$ และ $c = 0$ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาจุดที่เป็นท้องคลื่น จะได้ว่า $2kn_1t = (2M+1)\pi$ เมื่อแทนค่า $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้ว่า $\frac{1}{\lambda} = \frac{M}{2n_1t} + \frac{1}{2n_1t}$ ในที่นี้ ส่วนความชันของกราฟยังคงเป็น $\frac{1}{2n_1t}$ โดยที่ $c = \frac{1}{2n_1t}$

โดยการพล็อตกราฟอันดับของยอดคลื่น (Peak) และ อันดับของท้องคลื่น (Valley) กับส่วนกลับของความยาวคลื่นจุดที่เป็นยอดคลื่นและท้องคลื่นแยกกันจะได้กราฟเส้นตรงสองเส้นที่มีความชันเท่ากัน จากความชันของกราฟจะสามารถหาความหนาของฟิล์มบางได้ถ้าทราบดัชนีหักเหของฟิล์ม โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Film Thickness, } t = \frac{1}{2 \times n_1 \times \text{slope}} \tag{9}$$

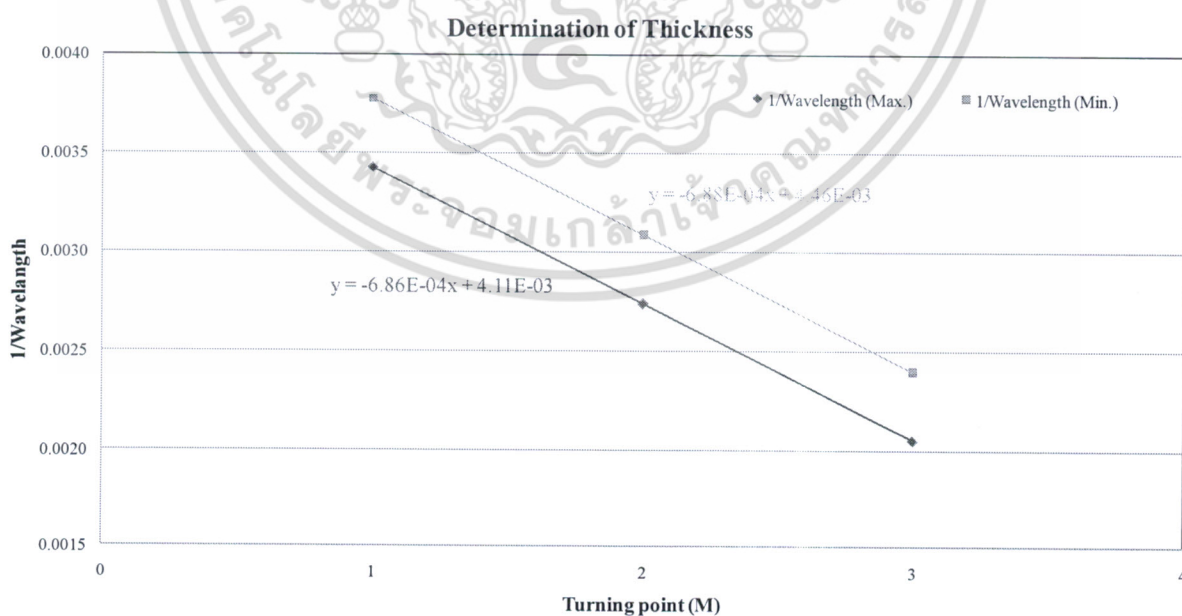
ในกรณีที่แสงตกกระทบทำมุม θ_0 ความหนาของฟิล์มบางสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{Film Thickness, } t = \frac{1}{2 \times n_1 \times \text{slope} \times [n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1]} \tag{10}$$

เมื่อ $\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_0}{n_1} \right)$

จากตัวอย่างในรูปที่ 5 จะได้ข้อมูลดังตารางต่อไปนี้ และจะได้กราฟดังรูปที่ 6

Turning point (M)	Wavelength at Peak (nm)	Wavelength at Valley (nm)	1/Wavelength at Peak (nm ⁻¹)	1/Wavelength at Valley (nm ⁻¹)
1	292	265	0.003424658	0.003773585
2	365	324	0.002739726	0.00308642
3	487	417	0.002053388	0.002398082



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอันดับของยอดคลื่นและท้องคลื่นกับส่วนกลับของความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่า กราฟมีความชัน เท่ากับ 6.86×10^{-4} จากความสัมพันธ์ในสมการ (9) และฟิล์มบาง SiO_2 มีดัชนีหักเห 1.46 สามารถคำนวณได้ว่าฟิล์มบางมีความหนา

$$t = \frac{1}{2(1.46)(6.86 \times 10^{-4})} = 499.22 \text{ nm}$$

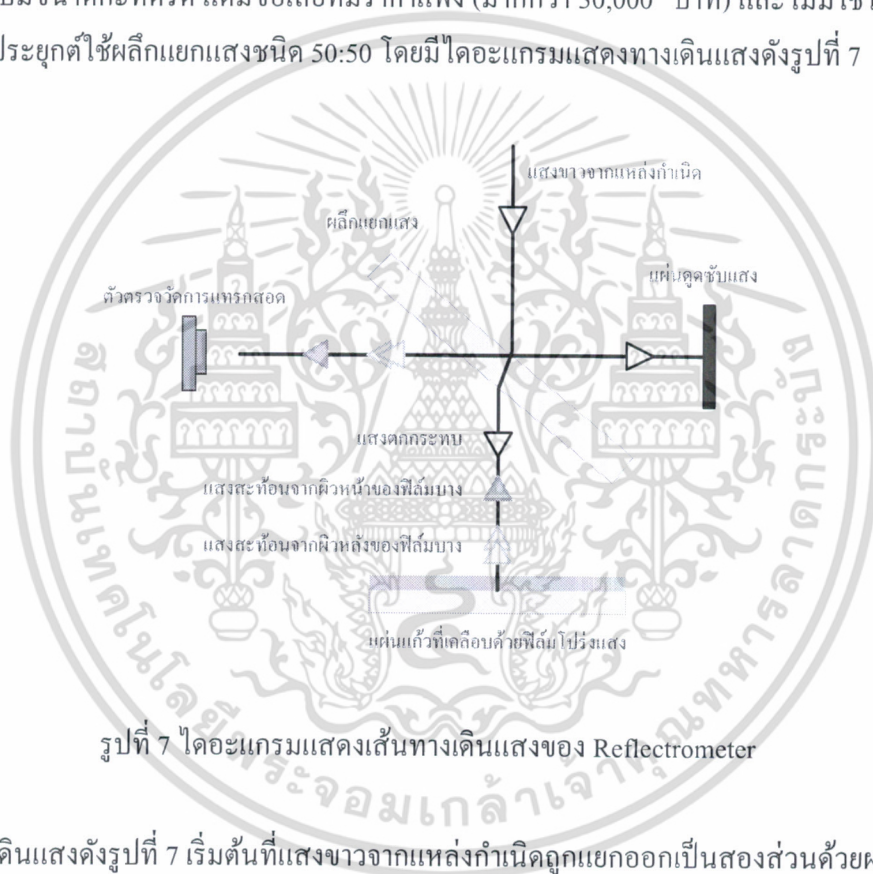


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบและดำเนินการสร้าง

3.1 การออกแบบและสร้าง Spectroscopic Reflectometer

การพัฒนาชุดอุปกรณ์ Optical Reflectometer ในงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์เป็นหลัก ซึ่งจะแตกต่างจากเครื่องมือที่สร้างเชิงการค้าอยู่บ้างแต่มีประสิทธิภาพการทำงานทัดเทียมกัน เช่น เครื่องมือทางการค้าจะใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษที่เรียกว่า Reflection Probe ซึ่งเป็นสายใยแก้วนำแสงที่มีหลายแกน (core) ที่สามารถใช้เป็นทั้งตัวส่งแสงและตัวรับแสงได้พร้อมกัน ซึ่งมีข้อดีคือทำให้ระบบมีขนาดกะทัดรัด แต่มีข้อเสียที่มีราคาแพง (มากกว่า 30,000 บาท) และไม่มีใช้ในภาควิชา ๑ งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ฟลักแยกแสงชนิด 50:50 โดยมีไดอะแกรมแสดงทางเดินแสงดังรูปที่ 7

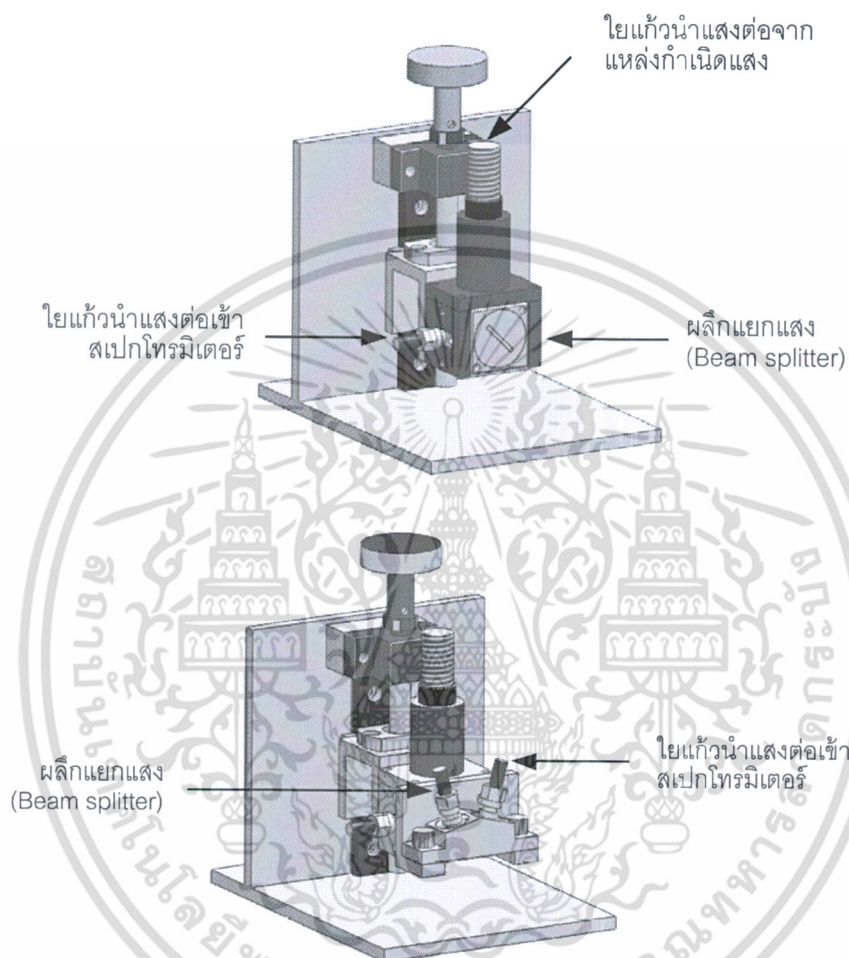


รูปที่ 7 ไดอะแกรมแสดงเส้นทางเดินแสงของ Reflectometer

เส้นทางเดินแสงดังรูปที่ 7 เริ่มต้นที่แสงขาจากแหล่งกำเนิดถูกแยกออกเป็นสองส่วนด้วยฟลักแยกแสง (แสดงด้วยลูกศรสีขาว) แสงครึ่งหนึ่งจะถูกแยกไปทางด้านขวาของฟลักแยกแสง (แสงส่วนนี้จะถูกดูดกลืนด้วยวัสดุดูดซับแสง) แสงอีกครึ่งหนึ่งจะตรงเข้ากระทบบนชิ้นงานซึ่งเป็นแผ่นแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์ม โปร่งแสงที่ต้องการวัดความหนา ทำมุมตกตั้งฉาก (มุมตกกระทบบเท่ากับศูนย์) กับพื้นผิว ดังรูปที่ 8 (บน) แสงสะท้อนประกอบด้วยสองส่วนคือ แสงที่สะท้อนจากผิวหน้าของฟิล์มบาง โปร่งแสงและแสงที่สะท้อนจากผิวหลังบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างฟิล์มบาง โปร่งแสงกับแผ่นแก้ว แสงสะท้อนทั้งสองส่วนนี้จะถูกหักเหโดยฟลักแยกแสงเข้าสู่ตัวตรวจวัดการแทรกสอดซึ่งในที่นี้คือเครื่องสเปกโทรมิเตอร์นั่นเอง นอกจากนี้ ยังได้ออกแบบและสร้างชุดติดตั้งสายใยแก้วนำแสงที่สามารถติดตั้งสายใยแก้วนำแสงได้สองเส้นทำมุมเอียงซึ่งกันและกัน เส้นหนึ่งใช้สำหรับนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกทำมุมกับแผ่นแก้ว โดยสามารถเลือกมุมตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทบได้สองค่าคือ ได้สองค่าคือ ทำมุม 15 องศา และ 20 องศา และใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งทำหน้าที่รับแสงสะท้อนจากฟิล์มบางและนำแสงเข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ชุดติดตั้งสายใยแก้วนำแสงนี้ออกแบบให้ยึดติดที่ด้านหน้าของผลึกแยกแสงบนชุดรางเลื่อนเดียวกัน ดังรูปที่ 8 (ล่าง)

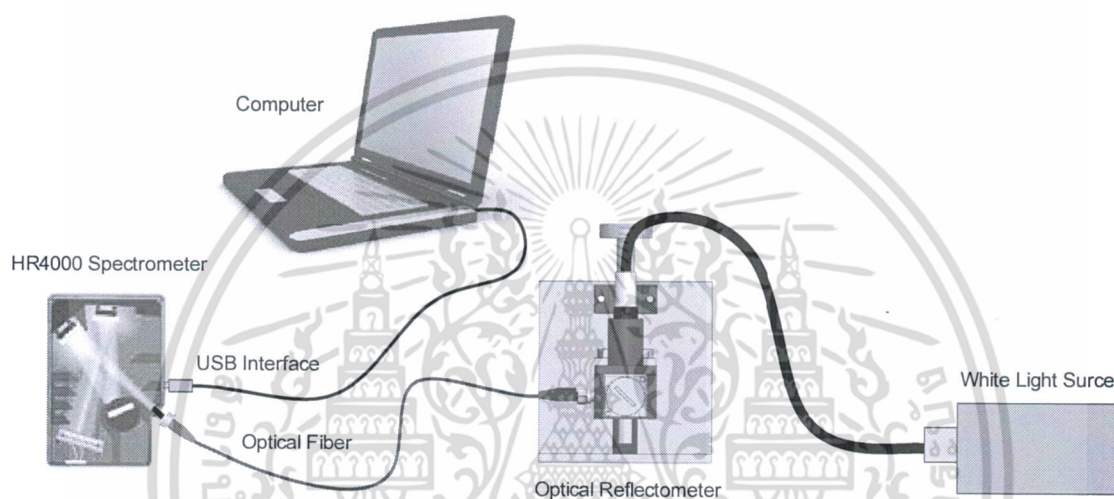


รูปที่ 8 ชุดอุปกรณ์ Spectroscopic Reflectometer ที่สร้างขึ้น

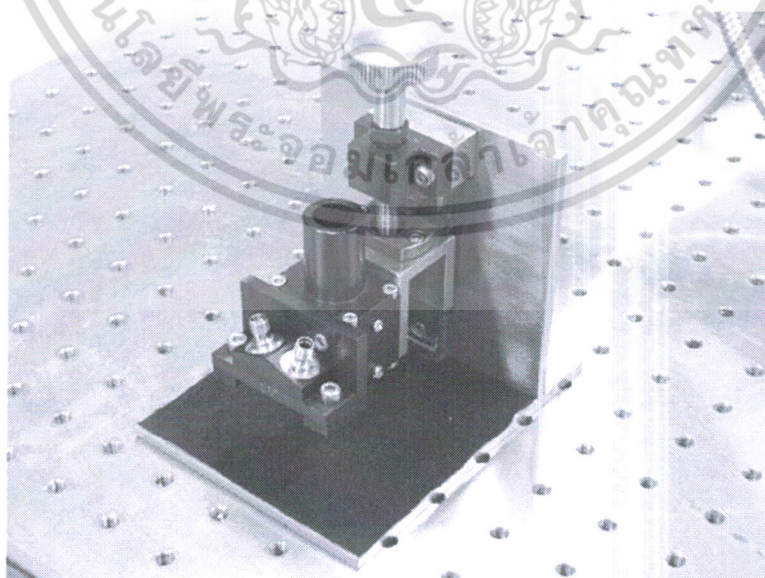
ในงานวิจัยนี้ ได้ติดตั้งผลึกแยกแสงกับรางเลื่อน ขับเคลื่อนด้วย lead screw ทำให้สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้ง แสงขาวซึ่งถูกส่งจากแหล่งกำเนิดแสงขาวผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง เข้าสู่ผลึกแยกแสงจากทางด้านบน แสงครึ่งหนึ่งจะถูกแยกออกไปทางด้านขวาของผลึกแยกแสง (แสงส่วนนี้จะถูกดูดกลืนด้วยวัสดุดูดซับแสง) ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะส่องผ่านออกทางด้านล่างซึ่งเป็นที่วางสารตัวอย่างที่ต้องการวัด แสงส่วนนี้จะตกตั้งฉาก (มุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) ลงบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง แสงที่สะท้อนจากสารตัวอย่างจะเข้าสู่ผลึกแยกแสงจากทางด้านล่าง แสงสะท้อนครึ่งหนึ่งจะส่องผ่านผลึกแยกแสงขึ้นสู่ด้านบน (แสงส่วนนี้ไม่ใช่ประโยชน์อะไร) แสงอีกครึ่งหนึ่งจะถูกแยกไปทางด้านซ้ายซึ่งมีเส้นใยแก้วนำแสงติดตั้งอยู่เพื่อนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนนี้เข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ รุ่น HR4000 ของบริษัท Ocean Optics ดังรูปที่ 9 สเปกโทรมิเตอร์ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB port จะทำหน้าที่แยกสเปกตรัมแสงและวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และส่งผลการวัดในรูปแบบของสเปกตรัมไปแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ สเปกตรัมนี้จะแสดงให้เห็นรีฟเลกทีวิตีหรือยอดคลื่นและท้องคลื่นที่เกิดจากฟิล์มบางปรากฏที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม โดยการวิเคราะห์ตำแหน่งของยอดคลื่นหรือท้องคลื่นโดยวิธีการที่กล่าวข้างต้น จะสามารถหาความหนาของฟิล์มบางที่ต้องการได้

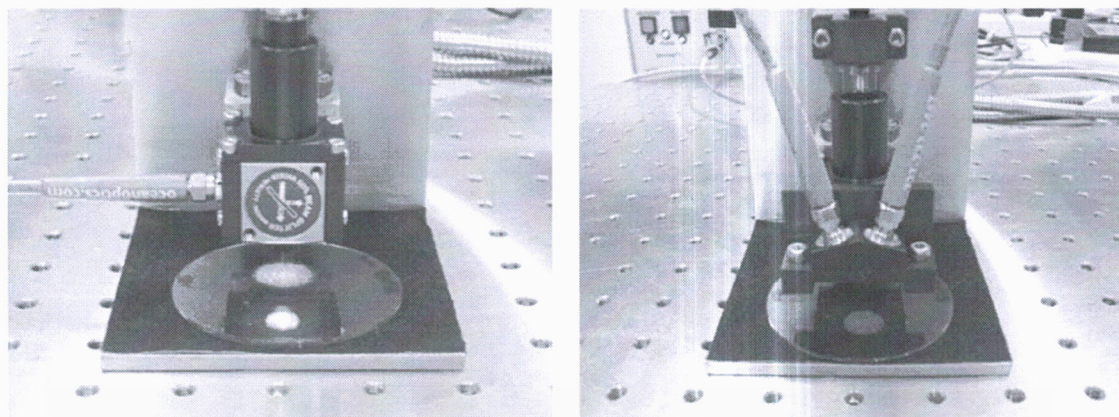


รูปที่ 9 การจัดระบบการวัดความหนาของฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 10 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ Spectroscopic Reflectometer ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ Spectroscopic Reflectometer ขณะทำการวัดโดยใช้แสงตกกระทบตั้งฉาก (ซ้าย) และทำมุม 15° (ขวา) กับพื้นผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การทดสอบ ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ในการทดสอบและประเมินผลการทำงานของระบบวัดความหนาฟิล์มบาง โปร่งแสงด้วยวิธีการแทรกสอดของแสงขาวที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดลองดังนี้

วัตถุประสงค์ เพื่อประเมินความแม่นยำของเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยการวัดความหนาของฟิล์มบาง โปร่งแสงที่ทราบค่าดัชนีหักเหและความหนา

- อุปกรณ์**
1. Spectrometer รุ่น HR4000 ของบริษัท Ocean Optics
 2. ชุดอุปกรณ์ Optical Reflectometer ที่พัฒนาขึ้น
 3. แหล่งกำเนิดแสงขาว
 4. แผ่นแก้วที่ทราบค่าดัชนีหักเห
 5. แผ่นแก้วที่เคลือบฟิล์มบางที่ทราบค่าดัชนีหักเหและความหนา

ในการทดสอบนี้ ได้ใช้แผ่นแก้วที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง โปร่งแสงที่ใช้เป็นฟิล์มเคลือบแข็งป้องกันการขีดข่วนของเลนส์แว่นตา ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มที่เคลือบถูกวัดโดยเครื่อง Ellipsometer เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง จากการวัดพบว่า ฟิล์มมีความหนา 2801 nm และมีดัชนีหักเห 1.58

วิธีการทดลอง

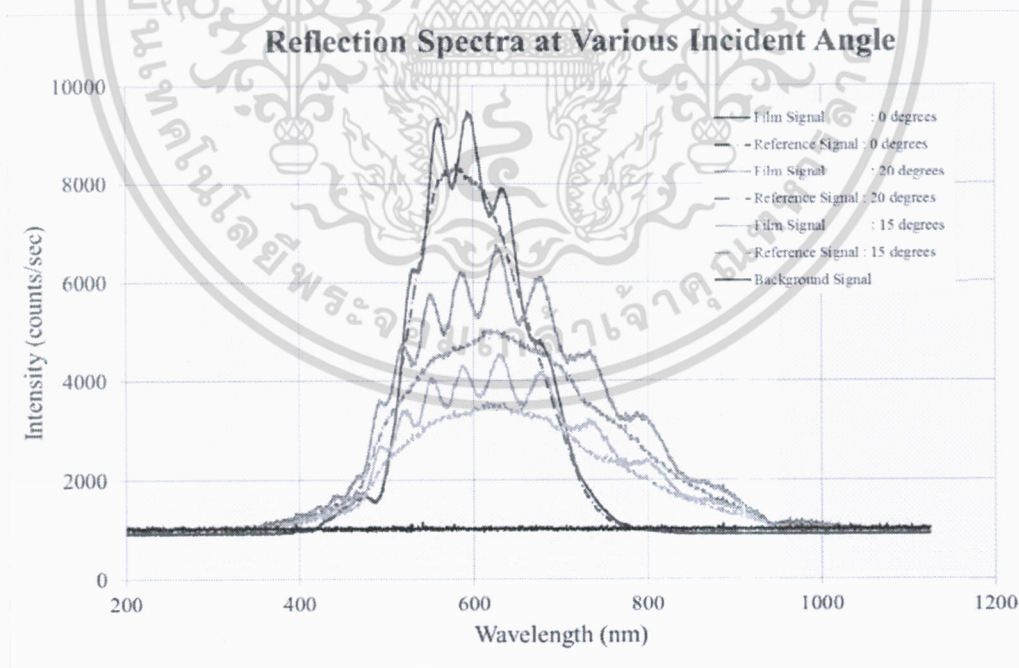
1. จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 9 โดยจัดระบบการวัดให้แสงตกกระทบบนทำมุมตั้งฉาก (0°) กับพื้นผิว
2. วัดสเปกตรัมของแสงที่มีอยู่ภายในห้อง (Background)
3. วัดสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนจากกระจก (Reference) ที่ไม่ได้ทำการเคลือบฟิล์มใด ๆ ซึ่งมีค่า $n_{\text{glass}} = 1.512$
4. วัดสเปกตรัมของแสงจากกระจกที่ได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง โปร่งแสงที่มีความหนา 2801 nm และดัชนีหักเห $n_{\text{film}} = 1.58$ โดยทำการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 3 ตำแหน่ง
5. นำค่าสเปกตรัมของ Reference ที่ได้จากข้อ 3 ลบด้วยสเปกตรัมของ Background ที่ได้จากข้อ 2 (Reference – Background)
6. นำค่าสเปกตรัมของ Film ที่ได้จากข้อ 4 ลบออกจากสเปกตรัมของ Background ที่ได้จากข้อ 2 (Film – Background)
7. หา %Reflectance จากผลการวัดในข้อ 5 และ 6 ซึ่งเป็นความสามารถในการสะท้อนแสงของฟิล์มบางเมื่อเทียบกับฐานรอง (%Reflectance = (Film – Background) / (Reference – Background) x 100%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของยอดคลื่น (peak) ของ %Reflectance กับความยาวคลื่น
9. ทำการหาความหนาของฟิล์มบางจากผลที่ได้จากข้อ 8
10. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1 ถึง 9 แต่จัดระบบให้แสงตกกระทบทำมุม 15° และ 20° กับพื้นผิว

ผลการทดลอง

ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของแสงที่มีอยู่ภายในห้อง (Background) สเปกตรัมของแสงที่สะท้อนจากกระจก (Reference) ที่ไม่ได้ทำการเคลือบฟิล์มและสเปกตรัมของแสงจากกระจกที่ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางโปร่งแสงที่มีความหนา 2801 nm และดัชนีหักเห $n_{\text{film}} = 1.58$ แสดงดังรูปที่ 12 ซึ่งเป็นตัวอย่างผลการวัดฟิล์มบางเพียงหนึ่งตำแหน่ง โดยสเปกตรัมของแสงภายในห้อง (Background) แสดงด้วยเส้นสีดำ ส่วนสเปกตรัมของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มและที่สะท้อนจากกระจกอ้างอิง (Reference) ซึ่งไม่มีฟิล์ม เส้นทึบและเส้นประตามลำดับ โดยสีน้ำเงินเป็นการวัดเมื่อแสงตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว ในขณะที่สีเขียวและสีเหลืองเป็นผลการวัดเมื่อแสงตกกระทบทำมุม 15° และ 20° ตามลำดับ จากผลการวัดพบว่าแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบางจะเห็นริ้วแทรกสอดอย่างชัดเจน ในขณะที่แสงสะท้อนจากกระจกอ้างอิง (Reference) ไม่ปรากฏริ้วแทรกสอดแต่อย่างใด



รูปที่ 12 สเปกตรัมการสะท้อนของแสงที่มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ

นำค่าสเปกตรัมของกระจกอ้างอิงลบด้วยสเปกตรัมของ Background และนำสเปกตรัมของฟิล์มบางลบด้วยสเปกตรัมของ Background จากนั้นนำมาคำนวณ %Reflectance แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %Reflectance กับความยาวคลื่นจะได้ผลดังรูปที่ 13 ทำการพล็อตกราฟอันดับของยอดคลื่น (Peak) กับส่วนกลับของความยาวคลื่นของจุดที่เป็นยอดคลื่น จากตัวอย่างข้อมูลผลการวัดที่ทำมุมตกกระทบต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 ถึง 3 จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 14 จากนั้นหาความชันของกราฟแต่ละเส้นมาคำนวณ จะได้ความหนาของฟิล์มบางสำหรับการวัดโดยใช้มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ ได้แก่ 0° , 15° และ 20° ตามลำดับ



รูปที่ 13 %Reflection ของแสงที่มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ความยาวคลื่นและส่วนกลับของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งจุดยอดคลื่น เมื่อแสงตกกระทบทำมุม 0°

Turning point (M)	Wavelength at Peak (nm)	1/Wavelength at Peak (nm^{-1})
1	446.18	0.00224
2	471.61	0.00212
3	497.03	0.00201
4	526.69	0.00189
5	556.35	0.00179
6	594.49	0.00168
7	641.10	0.00155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

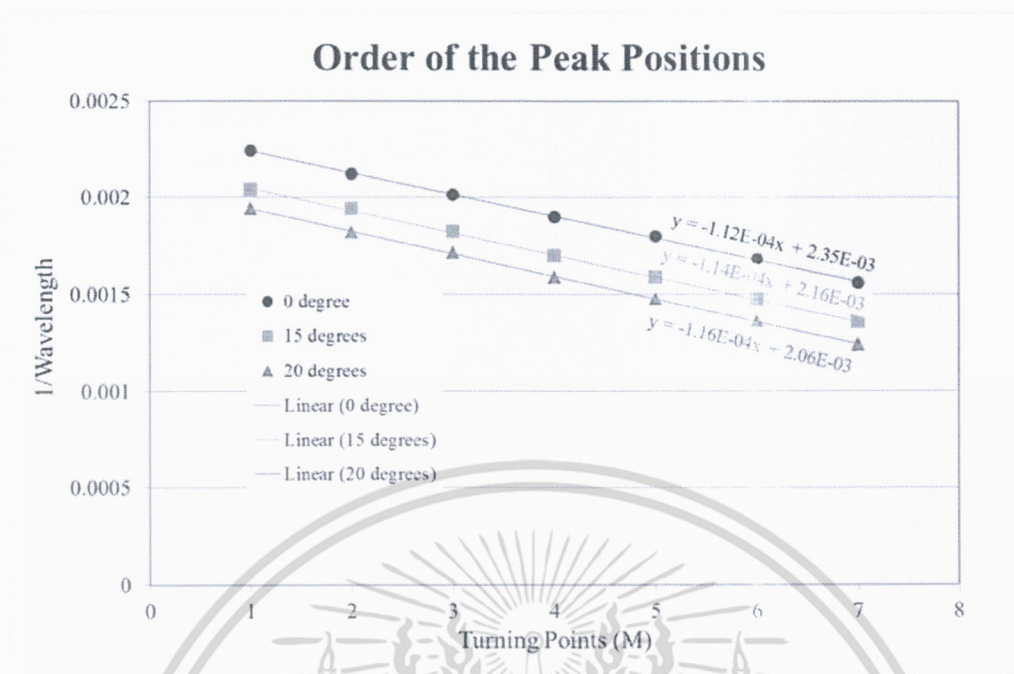
ตารางที่ 2 ความยาวคลื่นและส่วนกลับของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งจุดยอดคลื่น
เมื่อแสงตกกระทบบนทำมุม 15°

Turning point (M)	Wavelength at Peak (nm)	1/Wavelength at Peak (nm^{-1})
1	491.32	0.00196
2	515.81	0.00187
3	548.46	0.00177
4	589.28	0.00165
5	630.10	0.00152
6	679.08	0.00140
7	736.22	0.00130

ตารางที่ 3 ความยาวคลื่นและส่วนกลับของความยาวคลื่นที่ตำแหน่งจุดยอดคลื่น
เมื่อแสงตกกระทบบนทำมุม 20°

Turning point (M)	Wavelength at Peak (nm)	1/Wavelength at Peak (nm^{-1})
1	515.67	0.00188
2	549.57	0.00175
3	583.47	0.00163
4	630.93	0.00153
5	678.38	0.00141
6	732.62	0.00130
7	807.20	0.00117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 อันดับของตำแหน่งยอดคลื่นกับส่วนกลับของความยาวคลื่นที่มุมตกกระทบค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 4 ผลการวัดความหนาฟิล์มบาง โปร่งแสงและความคลาดเคลื่อน

แผ่นฟิล์มบาง	ความหนา (nm)	ดัชนีหักเห	มุมตกกระทบ (องศา)	ความชัน	ความหนาที่ได้จาก การทดลอง (nm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	2801	1.58	0	1.12×10^{-4}	2826	0.89
			15	1.14×10^{-4}	2788	-0.46
			20	1.16×10^{-4}	2792	-0.32

ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการวัดความหนาของฟิล์มบาง โปร่งแสงที่เคลือบบนผิวของแผ่นแก้ว หมายเลข 1 ความหนาและดัชนีหักเหของฟิล์มนี้ถูกวัดด้วยเครื่อง Ellipsometer ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐาน พบว่ามีค่า 2801 nm และ 1.58 ตามลำดับ ค่านี้ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการทดลองนี้ ผลการทดลองพบว่า เมื่อแสงตกกระทบทำมุม 0° 15° และ 20° กราฟความสัมพันธ์ระหว่างลำดับของจุดยอดของคลื่นกับส่วนกลับของความยาวคลื่นที่เป็นตำแหน่งของจุดยอดของคลื่น เป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชัน 1.12×10^{-4} 1.14×10^{-4} และ 1.16×10^{-4} ตามลำดับ และจากการคำนวณความหนาของฟิล์มด้วยสมการ (9) และ (10) พบว่าความหนาของฟิล์ม โปร่งแสงมีค่า 2826 nm 2788 nm และ 2792 nm ตามลำดับ

โดยการเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของฟิล์มกับค่าอ้างอิงพบว่า เมื่อใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นวัดความหนา โดยให้แสงตกกระทบทำมุม 0° ให้ผลการวัดความหนามากกว่าค่าอ้างอิงเล็กน้อย โดยมีความคลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ 0.89 % ในขณะที่เมื่อทำการวัดความหนาโดยใช้แสงตกกระทบทำมุม 15° และ 20° ให้ผลการวัดความหนาน้อยกว่าค่าอ้างอิงเล็กน้อย โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ 0.46 % และ 0.32 % ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสำหรับการวัดโดยใช้แสงมุมตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวของฟิล์มบาง จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการวัดเมื่อแสงตกทำมุม 15° และ 20° เล็กน้อย ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการวัดโดยทำมุมตกตั้งฉากกับฟิล์มบางนั้น ต้องทำโดยให้แสงผ่านผลึกแยกแสง จากผลการวัดสเปกตรัมการสะท้อนในรูปที่ 12 จะเห็นว่า มีช่วงของสเปกตรัมที่แคบกว่ากรณีที่แสงตกทำมุม 15° และ 20° แสดงว่าผลึกแยกแสงมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 500 nm และสูงกว่า 700 nm สูงมาก เมื่อกำจัดสเปกตรัม Background ออกจึงได้สัญญาณที่ไม่ชัดเจน ทำให้การอ่านตำแหน่งของยอดคลื่นในช่วงความยาวคลื่นนี้ทำได้ยากและอาจมีความคลาดเคลื่อนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องวัดความหนาฟิล์มบางโปร่งแสง ที่เรียกว่า spectroscopic reflectometer ทำงานโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงขาวที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างผิวหน้าของฟิล์มกับอากาศ (film-air interface) และแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างฟิล์มกับฐานรอง (film-substrate interface) ผลต่างเฟสของแสงทั้งสองขึ้นกับ มุมตกกระทบ ความยาวคลื่น ดัชนีหักเห และ ความหนาของฟิล์ม โดยการวิเคราะห์รูปแบบของการแทรกสอดที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ความหนาของฟิล์มสามารถหาได้ถ้าทราบ มุมตกกระทบ ความยาวคลื่นของแสงและดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม

เครื่องมือที่สร้างขึ้นประกอบด้วยผลึกแยกแสงที่ติดตั้งบนรางเลื่อน ขับเคลื่อนด้วย lead screw ทำให้สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้ง แสงขาวซึ่งถูกส่งจากแหล่งกำเนิดแสงขาวผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง เข้าสู่ผลึกแยกแสงจากทางด้านบน แสงส่วนนี้จะตกตั้งฉาก (มุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) ลงบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง นอกจากนี้ ยังได้ออกแบบและสร้างชุดติดตั้งสายใยแก้วนำแสงที่สามารถติดตั้งสายใยแก้วนำแสงได้สองเส้นทำมุมเอียงซึ่งกันและกัน เส้นหนึ่งใช้สำหรับนำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกทำมุมกับแผ่นแก้ว โดยสามารถเลือกมุมตกกระทบได้สองค่าคือ ได้สองค่าคือ ทำมุม 15 องศา และ 20 องศา แสงที่สะท้อนจากฟิล์มบางจะถูกนำเข้าสู่เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น HR4000 ของบริษัท Ocean Optics ผ่านทางใยแก้วนำแสง

การทดสอบความถูกต้องในการวัดความหนาของฟิล์มบางโปร่งแสงทำโดยเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของฟิล์มกับผลการวัดจากเครื่อง Ellipsometer ผลการทดสอบพบว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นให้ผลการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% สำหรับการวัด โดยใช้แสงมุมตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวของฟิล์มบาง จะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการวัดเมื่อแสงตกทำมุม 15° และ 20° เล็กน้อย ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการวัดโดยทำมุมตกตั้งฉากกับฟิล์มบางนั้น ต้องทำโดยให้แสงผ่านผลึกแยกแสง จากผลการวัดสเปกตรัมการสะท้อนในรูปที่ 11 จะเห็นว่า มีช่วงของสเปกตรัมที่แคบกว่ากรณีที่แสงตกทำมุม 15° และ 20° แสดงว่าผลึกแยกแสงมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 500 nm และสูงกว่า 700 nm สูงมาก ทำให้การอ่านตำแหน่งของยอดคลื่นในช่วงความยาวคลื่นนี้ทำได้ยากและอาจมีความคลาดเคลื่อนได้

การทดลอง

Measurement of Thin Film Thickness with Optical Reflectometer

- วัตถุประสงค์**
1. เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่อง Optical Reflectometer
 2. เพื่อศึกษาการสะท้อนแสงของแก้ว กระจกและฟิล์มบาง
 3. เพื่อศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มบางโปร่งแสง

- อุปกรณ์**
1. Spectrometer
 6. ชุดอุปกรณ์ Optical Reflectometer
 7. แหล่งกำเนิดแสงขาว
 8. แผ่นกระจก
 9. แผ่นแก้ว
 10. แผ่นแก้วที่เคลือบฟิล์มบาง

ทฤษฎี

ความหนาของฟิล์มบางเป็นส่วนสำคัญที่ต้องทราบค่าสำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทสารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์เชิงแสง เช่น ฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ การเคลือบฟิล์มบางของสารไดอิเล็กทริกป้องกันการสะท้อนแสงของเลนส์และช่วยการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการของกระจกเลเซอร์ การเคลือบเชิงป้องกันการขีดข่วนและการเคลือบป้องกันการเกาะของไอน้ำของเลนส์แว่นตา เป็นต้น การเคลือบฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการปั่น (spin coating) การระเหยไอในสุญญากาศ (vacuum evaporation) การสเปตเตอร์ (sputtering) และการจุ่ม (dip coating) เป็นต้น ความหนาของฟิล์มบางมีความแตกต่างกันขึ้นกับการใช้งาน ตั้งแต่ระดับ 2-3 ชั้นอะตอม ($< 1 \text{ nm}$) จนถึงความหนาหลายร้อยไมครอน

การวัดความหนาของฟิล์มบางโปร่งแสง (ซึ่งเกิดจากการเคลือบพื้นผิวใด ๆ ด้วยสารไดอิเล็กทริก) มีหลายวิธี การวัดโดยเทคนิคทางแสงเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส (non-contact) และไม่ทำลาย (non-destructive) เช่นการวัดด้วยเทคนิค ellipsometry และ reflectometry เป็นต้น เทคนิค ellipsometry ใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า ellipsometer โดยอาศัยหลักการที่ว่าแสงโพลาไรซ์ที่ตกกระทบลงบนฟิล์มบางด้วยมุมใด ๆ แสงที่มีแนวโพลาไรซ์สองแนวที่ตั้งฉากกันจะมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่างกัน (สะท้อนแสงได้ไม่เท่ากัน) นอกจากนี้ยังทำให้เฟสของแสงโพลาไรซ์ทั้งสองเลื่อนไปไม่เท่ากันด้วย ขึ้นกับความหนาและดัชนีหักเหแสงของฟิล์มบาง นอกจากนี้ยังขึ้นกับมุมตกกระทบอีกด้วย โดยการใช้เทคนิคนี้จะสามารถวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาและสมบัติเชิงแสง (optical constant) ได้แก่ ดัชนีหักเห (refractive index) และ extinction coefficient (ดัชนีหักเห คือ ค่าประมาณที่บอกถึงความเร็วของแสงในตัวกลาง ดัชนีหักเหของตัวกลาง นิยามว่าเป็นอัตราส่วนของความเร็วแสงในสุญญากาศต่อความเร็วแสงในตัวกลาง ส่วน extinction coefficient เป็นปริมาณที่บอกถึงการดูดกลืนแสงของตัวกลาง)

สำหรับเทคนิค reflectometry ใช้เครื่องวัดที่เรียกว่า reflectometer ทำงานโดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างผิวน้ำของฟิล์มกับอากาศ (film-air interface) และแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างฟิล์มกับฐานรอง (film-substrate interface) ผลต่างเฟสของแสงทั้งสองขึ้นกับมุมตกกระทบ ความยาวคลื่น ดัชนีหักเห และ ความหนาของฟิล์ม โดยการวิเคราะห์รูปแบบของการแทรกสอดที่เป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ความหนาของฟิล์มสามารถหาได้ถ้าทราบ มุมตกกระทบ ความยาวคลื่นของแสงและดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง reflectometer รวมทั้งรายละเอียดของเทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มมีดังต่อไปนี้

การแทรกสอด (Interference)

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นคลื่นตามขวาง ทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงแสดงได้ด้วย propagation vector, \mathbf{k} ที่ตำแหน่งใด ๆ ที่บอกโดยเวกเตอร์ \mathbf{r} และที่เวลา t ใด ๆ สนามไฟฟ้า, $E(\mathbf{r}, t)$ ของแสงที่มีแอมพลิจูด E_0 และมีเฟส ϕ สามารถเขียนได้โดย $E(\mathbf{r}, t) = E_0 \exp(i(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi))$ หรือ $E(\mathbf{r}, t) = E_0 \sin(\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \phi)$ เพื่อความสะดวก พิจารณาว่าแสงเดินทางใน 1 มิติ กำหนดให้เป็นทิศทาง x ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n และมี extinction coefficient κ สามารถเขียนสนามไฟฟ้าของแสงได้ว่า

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 \cdot \exp[i\{\omega t + (n + i\kappa)kx + \phi\}] = E_0 \cdot e^{-\kappa kx} \sin(\omega t + nkx + \phi) \quad (1)$$

เมื่อ k คือ เลขคลื่น (wave number) ของแสง มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ โดย λ คือความยาวคลื่นแสงในอากาศ (ประมาณว่าดัชนีหักเหของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเท่ากับดัชนีหักเหของสุญญากาศ) เทอม $e^{-\kappa kx}$ มีค่าลดลงอย่างเอกซโพเนนเชียลตามระยะทาง x แสดงว่าแอมพลิจูดของแสงลดลงอย่างเอกซโพเนนเชียลตามระยะทางที่แสงเดินทางในตัวกลาง ซึ่งหมายถึงการดูดกลืนแสงในตัวกลางนั่นเอง

คลื่นสองคลื่นหรือมากกว่าเมื่อมารวมกันที่ตำแหน่งใด ๆ จะจะเป็นไปตามหลักการทับซ้อน (principle of superposition) ซึ่งกล่าวว่าสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่เกิดจากคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal wave) ตั้งแต่สองคลื่นขึ้นไปมาซ้อนทับกันที่ตำแหน่ง และ เวลาใด ๆ จะเป็นผลรวมทางพีชคณิตของสนามไฟฟ้าของคลื่นแต่ละคลื่น นั่นคือ

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

เมื่อ E_1 , E_2 , E_3 คือ สนามไฟฟ้าของคลื่นแต่ละคลื่น ที่ตำแหน่งและเวลาหนึ่ง พิจารณาคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่เดียวกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน แต่มีเฟสต่างกัน ϕ_1 และ ϕ_2 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1) \quad \text{และ} \quad E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2)$$

คลื่นรวมคือ

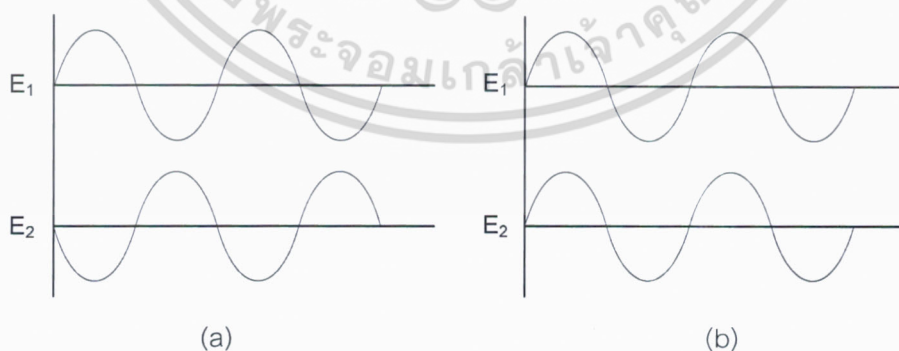
$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \sin(\omega t - kx + \phi_1) + E_{02} \sin(\omega t - kx + \phi_2) \quad (2)$$

ความเข้มแสงของคลื่นรวมคือ

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (3)$$

จากสมการข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่าคลื่นทั้งสองมีการแทรกสอดกัน (interference) โดยคลื่นรวมที่เกิดจากการแทรกสอดจะมีความเข้มแสงดังสมการ (3) และเรียกเทอม $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2)$ ว่าเทอมแทรกสอด (interference term) โดยความสว่างของคลื่นรวมจะขึ้นกับเทอมแทรกสอดนี้

พิจารณาผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ ของคลื่นทั้งสอง ถ้า $(\phi_1 - \phi_2) = (2m+1)\pi$ เมื่อ $(m = 0, 1, 2, \dots)$ จะได้ว่า $\cos(\phi_1 - \phi_2) = -1$ ดังนั้น $I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$ ซึ่งเป็นค่าความสว่างต่ำสุดของคลื่นรวม เกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน $(2n+1)\pi$ ซึ่งหมายถึงคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกันข้าม (anti phase) ดังรูปที่ 1 (a) เรียกว่าเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) แต่ถ้าผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2) = 2m\pi$ เมื่อ $(m = 0, 1, 2, \dots)$ จะได้ว่า $\cos(\phi_1 - \phi_2) = 1$ ดังนั้น $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$ ซึ่งเป็นค่าความสว่างสูงสุดของคลื่นรวม เกิดเมื่อคลื่นทั้งสองมีเฟสต่างกัน $2m\pi$ ซึ่งหมายถึงคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน (inphase) ดังรูปที่ 1 (b) เรียกว่าเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference)



รูปที่ 1 เฟสของคลื่น E_1 และ E_2

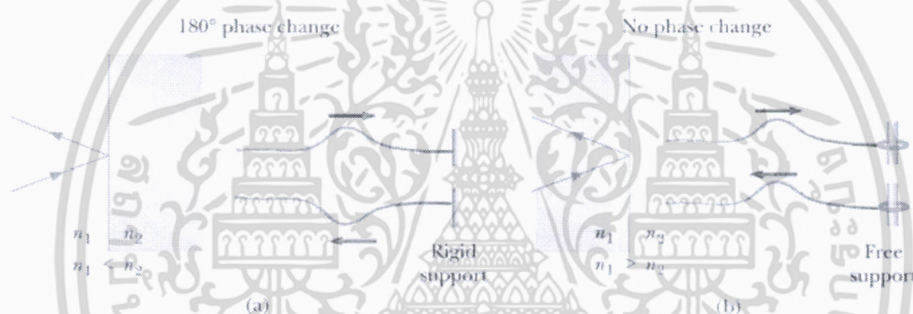
(a) ผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ เท่ากับ $(2m+1)\pi$

(b) ผลต่างเฟส $(\phi_1 - \phi_2)$ เท่ากับ $2m\pi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนเฟสเนื่องจากการสะท้อน

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่หนึ่งไปยังตัวกลางที่สองที่มีดัชนีหักเหต่างกัน แสงส่วนหนึ่งจะเดินทางผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่สองและแสงอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนที่รอยต่อระหว่างตัวกลางกลับเข้าสู่ตัวกลางที่หนึ่งเสมอ เฟสของแสงที่เดินทางเข้าสู่ตัวกลางที่สองจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง แต่เฟสของแสงที่สะท้อนอาจมีค่าเปลี่ยนไปหรือไม่ขึ้นกับดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสอง ปรัชญาการณนี้เป็นจริงกับคลื่นทุกชนิด เช่นคลื่นในเส้นเชือกในรูปที่ 2 คลื่นที่สะท้อนจากปลายที่ยึดแน่นกับผนังจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° ดังรูปที่ 2 (a) เทียบได้กับแสงสะท้อนซึ่งเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า จะกลับเฟส 180° รูปที่ 2 (b) แสดงให้เห็นว่าคลื่นที่สะท้อนจากปลายที่ปล่อยอิสระจะไม่เปลี่ยนเฟส เทียบได้กับแสงสะท้อนเมื่อเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า จะไม่เปลี่ยนเฟส

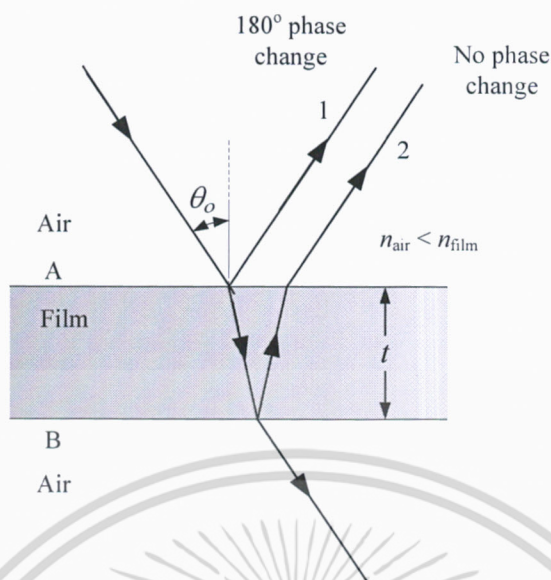


รูปที่ 2 (a) ถ้า $n_1 < n_2$ แสงสะท้อนจะกลับเฟส 180°
 (b) ถ้า $n_1 > n_2$ แสงสะท้อนจะไม่กลับเฟส

เมื่อคลื่นเดินทางถึงรอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่มีดัชนีหักเหต่างกัน นอกจากเกิดการสะท้อนแล้วจะมีคลื่นส่วนหนึ่งสามารถเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองได้ คลื่นส่วนนี้จะไม่มีการเปลี่ยนเฟสไม่ว่าตัวกลางที่สองจะมีดัชนีหักเหสูงหรือต่ำกว่าก็ตาม

การแทรกสอดในฟิล์มบาง

การแทรกสอดของแสงอาจเกิดขึ้นได้ถ้าแสง 1 ลำถูกแยกออกเป็น 2 ลำแล้วเดินทางมารวมกันอีกครั้ง ตัวอย่างที่พบได้ในธรรมชาติ เช่น แสงที่สะท้อนจากฟิล์มของน้ำมันที่ลอยอยู่ที่ผิวน้ำหรือฟองสบู่จะเห็นเป็นสีรุ้ง เป็นต้น สีรุ้งนี้เกิดจากการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวน้ำและผิวด้านหลังของฟิล์ม



รูปที่ 3 การแทรกสอดจากการสะท้อนแสงของฟิล์มบาง

พิจารณาฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอ t มีดัชนีหักเห n ดังรูปที่ 3 สมมติว่าแสงตกกระทบฟิล์มจากด้านบนทำมุมน้อย ๆ กับเส้นปกติ (ตกตั้งฉากกับพื้นผิวหรือมุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) แสงสะท้อนจะเกิดที่ผิวหน้าและผิวด้านหลังของฟิล์มซึ่งมีผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ $2t$ แสงสะท้อนทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกัน การแทรกสอดจะเป็นแบบเสริมหรือหักล้างต้องพิจารณาดังนี้

- เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 แสงสะท้อนจะมีมุมเปลี่ยนไป 180° ถ้า $n_2 > n_1$ และจะไม่มีมุมเปลี่ยนเฟสถ้า $n_2 < n_1$
- ความยาวคลื่นในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n คือ λ_n โดย

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (4)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

จากรูปที่ 3 รังสี 1 ซึ่งสะท้อนจากผิวด้านบน A จะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° เมื่อเทียบกับแสงที่ตกกระทบ ส่วนรังสี 2 ซึ่งสะท้อนจากผิวด้านล่าง (B) จะไม่มีการเปลี่ยนเฟสเมื่อเทียบกับแสงตกกระทบ จะเห็นว่าผลจากการสะท้อน แสงสะท้อนทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน 180° อย่างไรก็ตาม เนื่องจากรังสี 2 เดินทางผ่านฟิล์มจึงเดินทางด้วยระยะทางที่ยาวกว่ารังสี 1 อยู่ ประมาณ $2t$ ถ้าระยะทาง $2t$ นี้มีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคี่ของ $\lambda_n/2$ (มีความต่างเฟสเนื่องจากผลต่างทางเดินแสงเท่ากับ 180°) รังสี 1 และ รังสี 2 จะมีเฟสตรงกัน และแสงทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ดังนั้น การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

และเนื่องจาก $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$ จึงทำให้การแทรกสอดแบบเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

ถ้าความหนาของฟิล์มมีค่าทำให้ $2t$ เท่ากับจำนวนเต็มของ λ_n (ผลต่างเฟสเนื่องจากความต่างของเส้นทางเดินแสงเท่ากับ 0) รังสี 1 และ รังสี 2 จะยังคงมีเฟสต่างกัน 180° เหมือนเดิม จึงเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ดังนั้นการแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2nt = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7)$$

การแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างดังกล่าวข้างต้นนี้เป็นจริงเมื่อตัวกลางที่ด้านบนและด้านใต้ฟิล์มเป็นตัวกลางชนิดเดียวกัน ตัวกลางนี้อาจมีดัชนีหักเหสูงหรือต่ำกว่าดัชนีหักเหฟิล์ม ผลของการสะท้อนจะทำให้แสงสะท้อนทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° เสมอ

การแทรกสอดในฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจก

ถ้าฟิล์มอยู่ในตัวกลางที่ด้านบนและด้านล่างมีดัชนีไม่เท่ากัน เช่น ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นแก้ว ดังรูป 4 โดยฟิล์มบางมีดัชนีหักเห (n_1) เท่ากับ 1.4 แผ่นแก้วมีดัชนีหักเห (n_2) เท่ากับ 1.5 และ อากาศมีดัชนีหักเห (n_0) เท่ากับ 1 ในกรณีนี้แสงสะท้อน E_1 จะกลับเฟส 180° เนื่องจากแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำ (อากาศ) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า (ฟิล์ม) ส่วนแสงที่สะท้อนที่จุด C ก็กลับเฟส 180° เช่นกัน เนื่องจากเดินทางจะตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำ (ฟิล์ม) ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า (แก้ว) นั่นคือ แสงสะท้อน E_1 และ E_2 จึงมีเฟสตรงกัน ดังนั้น การแทรกสอดแบบเสริมจึงเกิดเมื่อ

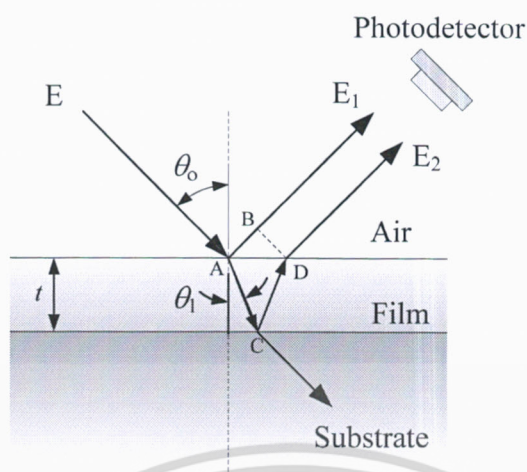
$$2n_1 t = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

ในขณะที่การแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดเมื่อ

$$2n_1 t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

ในกรณีที่ฟิล์มมีดัชนีหักเหสูงกว่าแก้ว เช่น n_1 มีค่าเท่ากับ 1.6 สถานะการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างจะเกิดตรงข้ามกับกรณีข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 การแทรกสอดจากการสะท้อนแสงของฟิล์มบางที่เคลือบบนแก้ว

จากสมการ (3) พบว่าการแทรกสอดแบบเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อ $\cos(\phi_1 - \phi_2) = \cos \Delta\phi = +1$ และการแทรกสอดแบบหักล้างจะเกิดเมื่อ $\cos(\phi_1 - \phi_2) = \cos \Delta\phi = -1$ หมายความว่า การแทรกสอดจะเป็นแบบเสริมหรือแบบหักล้างขึ้นอยู่กับผลต่างเฟส $\Delta\phi$ ของแสงสะท้อน E_1 และ E_2 ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับผลต่างระหว่างเส้นทางการเดินทางของแสงทั้งสอง คือ Δx โดยความสัมพันธ์ $\Delta\phi = k \cdot \Delta x$ (เมื่อ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$) จากรูปที่ 4 Δx คือ ผลต่างของเส้นทาง ACD กับเส้นทาง AB นั่นคือ

$$\Delta\phi = k \cdot \left(\frac{2n_1 t}{\cos \theta_1} - 2n_0 t \sin \theta_0 \tan \theta_1 \right)$$

จากแสงสะท้อน E_1 และ E_2 จะเกิดการแทรกสอด

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[(2kt) (n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ในการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยใช้หลักการแทรกสอดนั้น ฟิล์มบางที่มีความหนาคงที่ค่าหนึ่ง จะถูกฉายด้วยแสงขาว (แสงขาวคือแสงที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่อง) พบว่าการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างจะเกิดกับความยาวคลื่นที่เหมาะสมหลายความยาวคลื่นอย่างต่อเนื่อง และ รุ้งแทรกสอดนี้สามารถถูกวัดได้ด้วยสเปกโทรมิเตอร์ (สเปกโทรมิเตอร์เป็นคือมือที่ใช้วัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ) โดยการจำลองการสะท้อนของแสงขาวจากฟิล์มบาง SiO_2 ที่เคลือบบนผิวแก้วด้วยคอมพิวเตอร์ตามสมการ (8) พบว่าจะมีความเข้มแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นรุ้งแทรกสอดตามความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 รีวแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบาง SiO₂

การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มบางจากรีวแทรกสอด

จากสมการ (8) พบว่าตำแหน่งที่ความเข้มแสงมีค่าสูงสุด (เกิดการแทรกสอดแบบเสริม) เกิดเมื่อ $\cos[(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)]$ มีค่าสูงสุดคือ $+1$ หรือมุม $[(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)]$ มีค่าเท่ากับ $2M\pi$ และตำแหน่งที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำสุด (เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง) เกิดเมื่อ $\cos[(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)]$ มีค่าต่ำสุดคือ -1 หรือมุม $(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1)$ มีค่าเท่ากับ $(2M+1)\pi$ เมื่อ M คือเลขจำนวนเต็มใด ๆ ซึ่งในกรณีนี้ คือ ลำดับของยอดคลื่น (จุดสว่าง) หรือ ท้องคลื่น (จุดมืด) ในรูปของรีวแทรกสอดที่วัดได้จากรูปที่ 5 เริ่มจากซ้ายไปขวา เพื่อความสะดวกจะพิจารณากรณีที่แสงตกกระทบบนมุมศูนย์องศาหรือตั้งฉากกับพื้นผิว นั่นคือ θ_0 เท่ากับ 0 ซึ่งจะทำให้ θ_1 เท่ากับ 0 ด้วย ซึ่งจะได้ว่า $(2kt)(n_1 \sec \theta_1 - n_0 \sin \theta_0 \tan \theta_1) = 2kn_1 t$

พิจารณาจุดที่เป็นยอดคลื่น จะได้ว่า $2kn_1 t = 2M\pi$ เมื่อแทนค่า $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้ว่า $\frac{1}{\lambda} = \frac{M}{2n_1 t}$ เมื่อ

เทียบกับรูปทั่วไปของสมการเชิงเส้น $y = ax + c$ เมื่อ a คือความชัน และ c คือจุดตัดแกน y ในที่นี้ $\frac{1}{\lambda}$ คือ y และ M คือตัวแปร x ส่วนความชันของกราฟคือ $\frac{1}{2n_1 t}$ และ $c = 0$ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาจุดที่

เป็นท้องคลื่น จะได้ว่า $2kn_1 t = (2M+1)\pi$ เมื่อแทนค่า $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้ว่า $\frac{1}{\lambda} = \frac{M}{2n_1 t} + \frac{1}{2n_1 t}$ ในที่นี้ ส่วน

ความชันของกราฟยังคงเป็น $\frac{1}{2n_1 t}$ โดยที่ $c = \frac{1}{2n_1 t}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการพล็อตกราฟอันดับของยอดคลื่น (Peak) และ อันดับของท้องคลื่น (Valley) กับส่วนกลับของความยาวคลื่นจุดที่เป็นยอดคลื่นและท้องคลื่นแยกกันจะได้กราฟเส้นตรงสองเส้นที่มีความชันเท่ากัน จากความชันของกราฟจะสามารถหาความหนาของฟิล์มบางได้ถ้าทราบดัชนีหักเหของฟิล์มโดย

$$\text{Film Thickness, } t = \frac{1}{2 \times n_f \times \text{slope}} \quad (9)$$

จากตัวอย่างในรูปที่ 5 จะได้ข้อมูลดังตารางต่อไปนี้ และจะได้กราฟดังรูปที่ 6

Turning point (M)	Wavelength at Peak (nm)	Wavelength at Valley (nm)	1/Wavelength at Peak (nm ⁻¹)	1/Wavelength at Valley (nm ⁻¹)
1	292	265	0.003424658	0.003773585
2	365	324	0.002739726	0.00308642
3	487	417	0.002053388	0.002398082

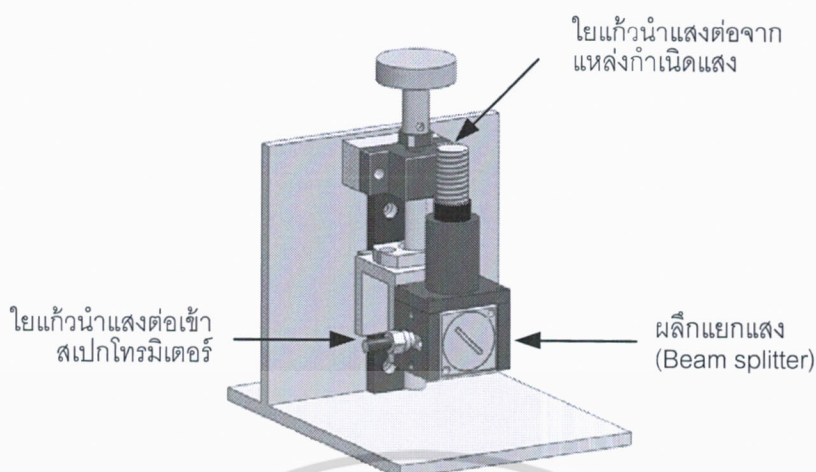


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอันดับของยอดคลื่นและท้องคลื่นกับส่วนกลับของความยาวคลื่น

จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่า กราฟมีความชัน เท่ากับ 6.86×10^{-4} จากความสัมพันธ์ในสมการ (9) และฟิล์มบาง SiO_2 มีดัชนีหักเห 1.46 สามารถคำนวณได้ว่าฟิล์มบางมีความหนา

$$t = \frac{1}{2(1.46)(6.86 \times 10^{-4})} = 499.22 \text{ nm}$$

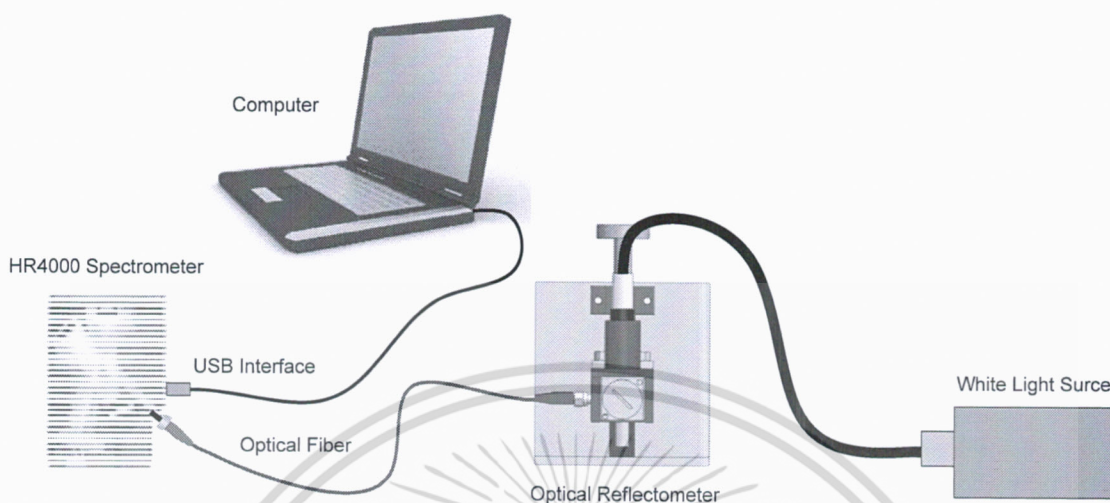
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ชุดอุปกรณ์ Optical Reflectometer

ชุดอุปกรณ์ Optical Reflectometer ประกอบด้วยผลึกแยกแสงชนิด 50:50 ที่ติดตั้งอยู่กับรางเลื่อนที่สามารถเลื่อนขึ้นลงได้ในแนวดิ่ง แสงขาวซึ่งถูกส่งจากแหล่งกำเนิดแสงขาวผ่านทางเส้นใยแก้วนำแสง เข้าสู่ผลึกแยกแสงจากทางด้านบน แสงครึ่งหนึ่งจะถูกแยกออกไปทางด้านขวาของผลึกแยกแสง (แสงส่วนนี้จะถูกดูดกลืนด้วยวัสดุดูดซับแสง) ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะส่องผ่านออกทางด้านล่างซึ่งเป็นที่วางสารตัวอย่างที่ต้องการวัด แสงส่วนนี้จะตกตั้งฉาก (มุมตกกระทบเท่ากับศูนย์) ลงบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง แสงที่สะท้อนจากสารตัวอย่างจะเข้าสู่ผลึกแยกแสงจากทางด้านล่าง แสงสะท้อนครึ่งหนึ่งจะส่องผ่านผลึกแยกแสงขึ้นสู่ด้านบน (แสงส่วนนี้ไม่ได้ใช้ประโยชน์อะไร) แสงอีกครึ่งหนึ่งจะถูกแยกไปทางด้านซ้ายซึ่งมีเส้นใยแก้วนำแสงติดตั้งอยู่เพื่อนำแสงส่วนนี้เข้าสู่เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ดังรูปที่ 8 สเปกโทรมิเตอร์ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB port จะทำหน้าที่แยกสเปกตรัมแสงและวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ และส่งผลการวัดในรูปของสเปกตรัมไปแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ สเปกตรัมนี้จะแสดงให้เห็นรั้วแทรกสอดหรือยอดคลื่นและท้องคลื่นที่เกิดจากฟิล์มบางปรากฏที่ความยาวคลื่นต่างๆ ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม โดยการวิเคราะห์ตำแหน่งของยอดคลื่นหรือท้องคลื่นโดยวิธีการที่กล่าวข้างต้น จะสามารถหาความหนาของฟิล์มบางที่ต้องการได้

วิธีการทดลอง



รูปที่ 8 การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาค่าความหนาของฟิล์มบาง เมื่อแสงมีตกกระทบ $\theta_0 = 0$ องศา

11. จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 8 ซึ่งทำให้แสงมีตกกระทบ $\theta_0 = 0$ องศา
12. วัดสเปกตรัมของแสงที่มีอยู่ภายในห้อง (Background) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความยาวคลื่น
13. วัดสเปกตรัมของแสงจากกระจก (Reference) ที่ไม่ได้ทำการเคลือบฟิล์มใด ๆ ซึ่งยังคงเป็นสัญญาณที่มี Background ผสมอยู่ด้วย
14. วัดสเปกตรัมของแสงจากกระจกที่ได้ทำการเคลือบฟิล์ม (Film) ที่มีค่าดัชนีหักเห $n_{\text{film}} = 1.49$ โดยทำการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 3 ตำแหน่ง
15. นำค่าสเปกตรัมของ Reference ที่ได้จากข้อ 3 ลบออกจากสเปกตรัมของ Background ที่ได้จากข้อ 2 (Reference – Background) ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณของ Reference เท่านั้น
16. นำค่าสเปกตรัมของ Film ที่ได้จากข้อ 4 ลบออกจากสเปกตรัมของ Background ที่ได้จากข้อ 2 (Film – Background) ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณของ Film เท่านั้น
17. หาอัตราส่วนระหว่างค่าที่ได้จากข้อ 6 และ 5 ซึ่งค่าดังกล่าวเรียกว่า %Reflectance ซึ่งเป็นความสามารถในการสะท้อนแสงของฟิล์มบางเมื่อเทียบกับฐานรอง ($\% \text{Reflectance} = (\text{Film} - \text{Background}) / (\text{Reference} - \text{Background})$)
18. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %Reflectance กับ ความยาวคลื่น
19. ทำการหาความหนาของฟิล์มบางจากผลที่ได้จากข้อ 8 ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2 การหาค่าความหนาของฟิล์มบาง เมื่อแสงมีตกกระทบ $\theta_0 = 0, 15$ และ 20 องศา

1. จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 8 ซึ่งทำให้แสงมีตกกระทบ $\theta_0 = 0$ องศา
2. ทำการวัดความหนาของฟิล์มบางที่มีค่า $n = 1.58$ ตามขั้นตอนในตอนต้นที่ 1
3. เปลี่ยนมุมของแสงตกกระทบเป็น 15 และ 20 องศา ตามลำดับ โดยให้ทำการวัดความหนาของฟิล์ม ณ ตำแหน่งกับที่ได้ทำการวัดไว้ในข้อที่ 1 ของตอนที่ 2

ตอนที่ 3 การหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

1. จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 8 โดยให้แสงมีตกกระทบ $\theta_0 = 0$ องศา
2. วัดสเปกตรัมของแสงที่มีอยู่ภายในห้อง (Background)
3. วัดสเปกตรัมของแสงจากกระจกใส (Reference) ที่ไม่ได้ทำการเคลือบฟิล์มใด ๆ
4. วัดสเปกตรัมของแสงจากกระจกใสที่ทำการเคลือบด้วยฟิล์ม
5. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบนกระจกใส เช่นเดียวกับในตอนต้นที่ 1 โดยฟิล์มดังกล่าวมีความหนา 10 ไมครอน

คำถาม

1. จงแสดงให้เห็นว่า ความเข้มของแสงที่แทรกสอดกันมีค่าดังสมการ

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2)$$
2. จงแสดงให้เห็นว่า ผลต่างทางเดินแสงในรูปที่ 4 มีค่าเท่ากับ $2n_1 t \sec \theta_1 - 2n_0 t \sin \theta_0 \tan \theta_1$
3. ในการทดลองตอนที่ 1 และ 3 สเปกตรัมที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงภายในฟิล์มบางนั้นมีความแตกต่างกันอย่างไร นักศึกษาคิดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุใด จงอธิบาย
4. ในการทดลองการวัดหาความหนาของฟิล์มบางซึ่งในการทดลองนี้ใช้แสงขาว โดยเกิดปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวด้านนอก (รอยต่อระหว่างอากาศกับฟิล์ม) กับผิวด้านในของฟิล์ม (รอยต่อระหว่างฟิล์มกับฐานรอง) ถ้าฟิล์มที่นำมาวัดมีความหนามากถึง 200 ไมครอน จะไม่สามารถวัดได้จากการทดลองนี้เพราะอะไร จงอธิบาย (โดยใช้หลักการการแทรกสอดของแสงในการอธิบาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Azzam, R.M.A., Bashaa, N.M., 1987, Ellipsometry and polarized light, (North-Holland Publishing Company).
2. Flournoy, P.A., McClure, R.W., Wyntjes, G., 1972, White-light interferometric thickness gauge, Appl. Opt. 11, 1907 – 1915



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้