



บทที่ ๑.

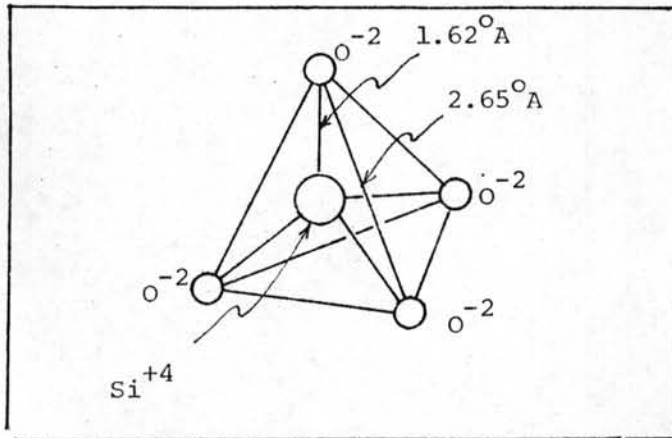
คุณสมบัติของ SiO_2 และการวัดความหนาของชั้น SiO_2

ชั้น SiO_2 มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอย่างมาก ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของชั้น SiO_2 และคุณสมบัติในการใช้ SiO_2 เป็น mask จึงจำเป็นก่อนที่จะกล่าวถึงการวัดความหนาของชั้น SiO_2 ในขั้นต่อไป

ลักษณะทั่วไปของ SiO_2

ชั้น SiO_2 มีลักษณะเป็นฉนวนโปร่งใสมีดัชนีหักเหระหว่าง ๑.๔ ถึง ๑.๕ (1) ทนต่อการกัดกร่อน และการแทรกซึมของ impurity ได้ดี คุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นกับโครงสร้างของ SiO_2 เป็นสำคัญ โครงสร้างของ SiO_2 เกิดจากการเกาะตัวของ polyhedra ที่มี Si^{+4} เป็นแกนกลางมี ion O^{-2} เกาะอยู่โดยรอบห่างแกนกลาง ๑.๖๒°A O-ion แต่ละตัวห่างกัน ๒.๖๕°A

(2) ดังรูป ๑.๑



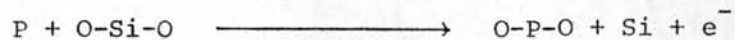
รูปที่ ๑.๑

Polyhedra ของ SiO_2 ซึ่งปกติเป็น Tetrahedral วาดขึ้นโดยใช้ข้อมูลจาก (1)

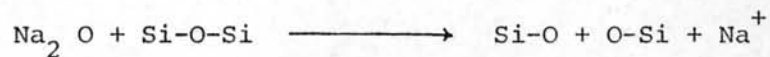
Polyhedra แต่ละตัวยึดกันด้วย O-ion เรียกว่า Bridging O-ion แต่ O-ion บางตัวไม่ยึดกับ Polyhedra อื่น เรียกว่า Nonbridging O-ion, ion ชนิดหลังนี้ทำให้แรงเกาะกันภายในชั้น SiO_2 น้อย โครงสร้างจึงอ่อนแอ มีรพุนมาก

จำนวน Nonbridging O-ion นี้จะมีมาก ถ้าชั้น SiO_2 นั้นมี impurity แทรกอยู่มาก impurity เหล่านี้ แยกกล่าวได้ดังต่อไปนี้

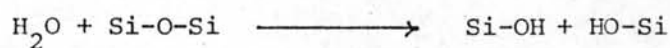
Substitutional Impurity คือ ion ที่สามารถแทน ion Si^{+4} ใน polyhedra ได้ทำให้เกิด Nonbridging O-ion เพิ่มขึ้น เรียก ion พวกนี้ว่า Network Former เช่น B^{+3} , P^{+5} เป็นต้น การแทรกตัวของ Network Former แสดงได้ดังนี้



Interstitial Impurity คือ ion ของโลหะขนาดใหญ่ มีประจุน้อย ๆ สามารถแทรกอยู่ระหว่าง polyhedra ทำให้ Nonbridging O-ion เพิ่มขึ้นเรียก ion พวกนี้ว่า Network Modifier ion พวกนี้ได้แก่ Na^+ , K^+ , Ba^{+2} , Pb^{+2} การแทรกตัวของ Network Modifier แสดงได้ดังนี้

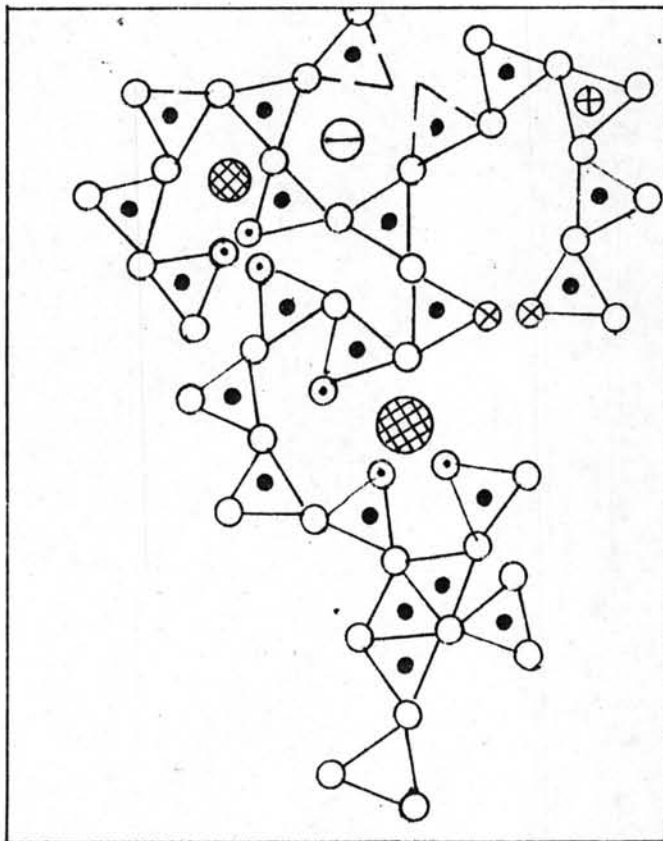


น้ำ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนในชั้น SiO_2 เพราะน้ำทำให้เกิด Nonbridging Hydroxyl Group ซึ่งเสถียร แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



โครงสร้างของชั้น SiO_2 ที่เกิดรูพรุนเพราะ impurity เหล่านี้แสดงได้ดังรูป ๑.๒

คุณภาพของชั้น SiO_2 ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างเป็นสำคัญ ดังนั้นจำนวน Nonbridging O-ion และ Nonbridging Hydroxyl Group จึงเป็นสิ่งที่กำหนดคุณภาพของชั้น SiO_2 โดยตรง



รูปที่ ๑.๒

แสดงถึงโครงสร้างที่เกิด Defect

ของชั้น SiO₂ (2)

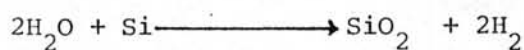
- Si Network Former
- ⊖ Acceptor Type Network Former
- ⊕ Donor Type Network Former
- Bridging O
- ⊙ Nonbridging O
- ⊗ OH⁻ ion
- ⊗ Network Modifier eg. Na⁺
- ⊗ Network Modifier eg. Ba⁺²

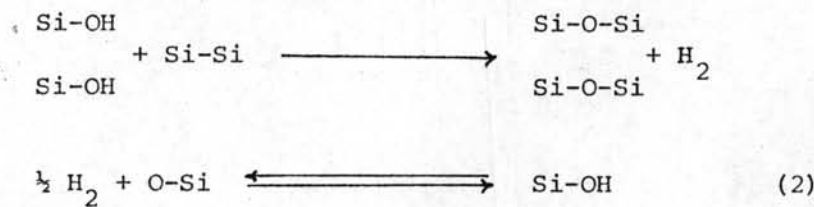
การทำชั้น SiO₂

โดยปกติ Si จะทำปฏิกิริยากับ O₂ ในอากาศได้ชั้น SiO₂ บาง ๆ เคลือบผิวหน้าของ Si ไว้ แต่ในการผลิตด้วย Planar technology ต้องการชั้น SiO₂ ที่หนากว่านี้มาก จึงใช้วิธีทำชั้น SiO₂ ในท่อ Quartz อุณหภูมิ 900°C – 1200°C ภายในบรรยากาศของ O₂ หรือ O₂ + H₂O ปฏิกิริยาในท่อ Quartz ในกรณีที่ใช้ O₂ แห่งแสดงได้ดังนี้



ในกรณีที่มีน้ำ





ตามสมการสุดท้าย H ที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาทำให้โครงสร้างของชั้น SiO₂ อ่อนแอ

ความเร็วของการเกิด SiO₂ ขึ้นกับความหนาของชั้น SiO₂ เพราะ O₂ ต้องซึมผ่านชั้น SiO₂ เพื่อลงไปทำปฏิกิริยากับ Si อย่างไรก็ตามขบวนการที่ใช้ ชั้น SiO₂ มีผลต่อความเร็วในการสร้างชั้น SiO₂ และคุณภาพชั้น SiO₂ อย่างมาก ดังสรุปได้ตามตารางต่อไปนี้

Type	T(°C)	Density (gm./cc.)	Thickness (μm./min)	Dielectric Stength (V/mil)
Dry O ₂	1000	2.27	1.48 x 10 ⁻⁴	550
	1200	2.15	1.64 x 10 ⁻⁴	517
wet O ₂ 95° H ₂ O	1000	2.18	38.5 x 10 ⁻⁴	525
	1200	2.21	117.5 x 10 ⁻⁴	534
Steam	1000	2.08	54.5 x 10 ⁻⁴	498
	1200	2.05	159 x 10 ⁻⁴	490

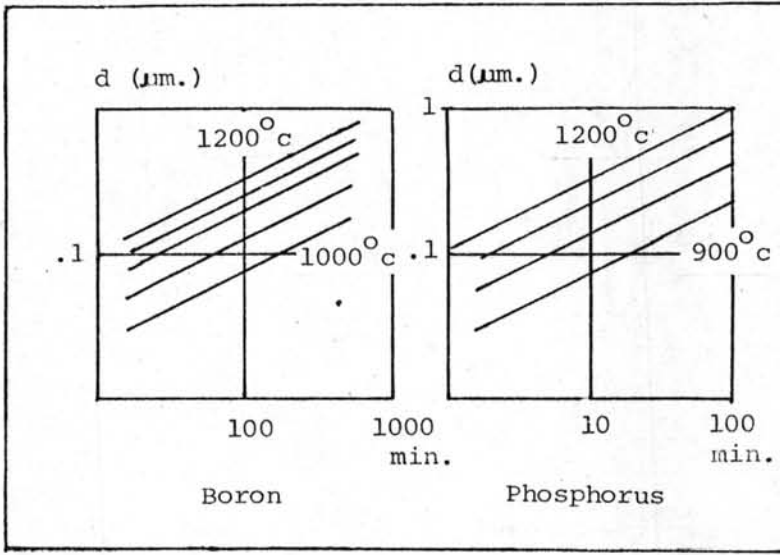
การสร้างชั้น SiO₂ ด้วย dry O₂ ช้ากว่า wet O₂ ส่วนการใช้ Steam สร้างได้เร็วที่สุด ทั้งนี้เพราะ Solid Solubility ของน้ำมากกว่าของ O₂ มาก ส่วนคุณภาพของชั้น SiO₂ ที่สร้างด้วย dry O₂ ดีกว่าใช้ wet O₂ หรือ steam

คุณสมบัติการเป็น mask ของชั้น SiO₂

การใช้ SiO₂ เป็น mask ต้องคำนึงถึงความหนาและความแข็งแรงของโครงสร้างของชั้น SiO₂ นั้น ๆ เป็นหลัก เพราะในการแพร่ซึมสารเจือปนนั้น สารเจือปนสามารถเป็น Network Former ซึ่งสร้าง Borosilicate Glass หรือ Phosphosilicate Glass ได้ทำให้ชั้น SiO₂ (Silica Glass) มีสารประกอบข้างต้นปนอยู่ซึ่งเรียกว่า Mixed Glass.

Mixed Glass เริ่มเกิดที่ผิวหน้าและซึมลงไปในเนื้อ Silica Glass เมื่อชั้น Mixed Glass ซึมลงถึงผิว Si ชั้น SiO_2 ก็หมดคุณสมบัติการเป็น mask ดังนั้นถ้าโครงสร้างของชั้น SiO_2 แข็งแรง การเกิด Mixed Glass ย่อมเป็นไปได้ช้า จึงเป็น mask ได้ดีกว่าชั้น SiO_2 ที่มีโครงสร้างอ่อนแอ นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อคุณสมบัติการเป็น mask ของชั้น SiO_2 ด้วย ดังแสดงในรูป

จ.๓

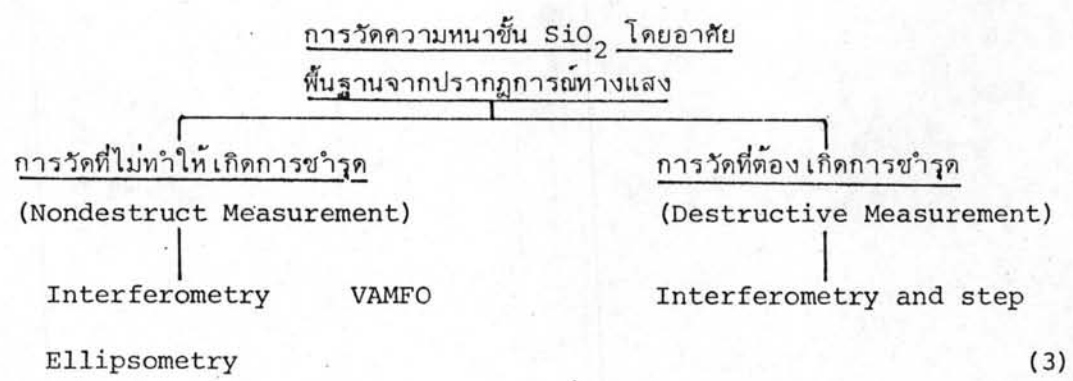


รูปที่ ๑.๓

ความหนาของชั้น SiO_2 ที่เหมาะสมจะใช้เป็น mask (2)

การวัดความหนาชั้น SiO_2

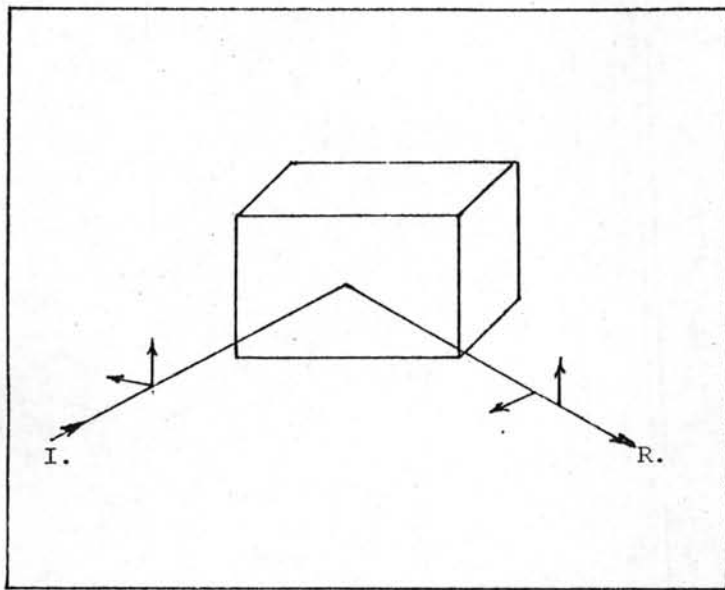
การวัดความหนาชั้น SiO_2 ทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกรวดเร็วคือ วิธีที่อาศัยพื้นฐานจากปรากฏการณ์ทางแสง ทั้งนี้เพราะชั้น SiO_2 เป็นชั้นโปร่งใส และมีค่าดัชนีหักเหค่อนข้างสูง การเกิดปรากฏการณ์จึงค่อนข้างชัดเจน การวัดโดยใช้แสงเข้าช่วยนี้ อาจสรุปได้ดังต่อไปนี้



(3)

การวัดแบบที่ต้องเกิดการชำรุดนั้น ทำได้ด้วยการวัดแบบสุ่มตัวอย่าง ซึ่งไม่อาจนำแว่น
 ผลึกที่ใช้วัดความหนาชั้น SiO_2 นั้นมาใช้ได้อีกเพราะชั้น SiO_2 ถูกทำลายเสียหายในระหว่างทำการ
 วัด ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นเพียงค่าประมาณของแว่นผลึกทั้งคู่ ส่วนแบบที่ไม่ทำให้เกิดการชำรุดนั้น
 สามารถนำแว่นผลึกที่วัดความหนาแล้วกลับมาใช้ได้ และค่าที่วัดได้จะเป็นค่าความหนาของชั้น
 SiO_2 ของแว่นผลึกชิ้นนั้นโดยแท้จริง วิธีหลังจึงเหมาะกับการวิจัยกว่าวิธีแรก จึงเลือกศึกษาเพื่อ
 ใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องวัดความหนาสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ วิธีวัดที่ไม่ทำลายชั้น SiO_2 มี
 ดังต่อไปนี้

Ellipsometry วิธีนี้อาศัยปรากฏการณ์ที่ Plane polarized light เมื่อสะท้อนกลับ
 ออกจากผิวหลายชั้นจะแทรกซ้อนกัน จึงมีความเข้มและ phase เปลี่ยนแปลงไปเป็น Elliptical
 polarized light ปรากฏการณ์นี้แสดงได้ดังรูป ๑.๔



รูปที่ ๑.๔

ปรากฏการณ์ของ Ellipsometry
 (3)

I (Incident)- Plane
 Polarized Light

R. (Reflect)- Elliptical
 polarized Light

จากการวิเคราะห์ Polarization ของแสงสะท้อนจะทราบความหนาของชั้นผิวที่แสงผ่าน
 และสะท้อนกลับออกมา

การใช้ Ellipsometry มีข้อดีคือสามารถวัดชั้น SiO_2 ที่บางมาก ๆ ได้ดี แต่มีข้อเสีย
 คือ เครื่องมือยุ่งยากซับซ้อน และการวิเคราะห์ข้อมูลต้องผ่านขั้นตอนหลายชั้น จึงจำเป็นต้องใช้
 Computer หรือ Nomogram ช่วยให้หาค่าความหนาได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความถูกต้องยังขึ้นกับ

ความหนาเป็นช่วง ๆ ในบางช่วงความคลาดเคลื่อนมีค่าสูง (5)

การวัดด้วย Ellipsometry ดังกล่าวข้างต้นนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเปลี่ยนมุมสังเกต fringe (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation Method) แล้ว วิธีหลังทำได้ง่ายและสะดวกกว่า และประการสำคัญคือ ความซับซ้อนของเครื่องวัดน้อยกว่า จึงเหมาะที่จะออกแบบสร้างขึ้นใช้ในห้องปฏิบัติการ รายละเอียดของวิธี เปลี่ยนมุมสังเกต fringe นี้จะกล่าวถึงต่อไป

วิธีวัดแบบเปลี่ยนมุมสังเกต fringe (Variable Angle Monochromatic Fringe Observation Method) หรือเรียกย่อ ๆ ว่า VAMFO. วิธีนี้อาศัยปรากฏการณ์เสริมกันและหักล้างกันของแสงสีเดียว (Monochromatic Light) ที่สะท้อนจากผิวหน้าชั้น SiO_2 และแสงที่สะท้อนจากผิวล่างชั้น SiO_2 นั้น ทำให้ความเข้มของแสงสะท้อนจากแผ่นผลึกที่มีชั้น SiO_2 อยู่ นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามมุมตกกระทบของแสง (Incident angle) จากตำแหน่งมุมตกกระทบที่ให้ความเข้มแสงสะท้อนสูงสุด (Maxima) หรือตำแหน่งที่ให้ความเข้มแสงสะท้อนต่ำสุด (Minima) นั้นนำมาคำนวณหาค่าความหนาชั้น SiO_2 ได้

พื้นฐานของทฤษฎีที่เป็นหลักการของวิธี VAMFO นั้นประกอบด้วย

๑. - ทฤษฎีการเกิดการเสริมและหักล้างกันของคลื่น (Constructive and Destructive Interference Effect)
๒. - ทฤษฎีการเกิด fringe เนื่องจากการสะท้อนของลำแสงที่ชั้นโปร่งใส ทฤษฎีทั้งสองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การเสริมและหักล้างกันของคลื่น (Constructive and Destructive Interference) (4) โดยปกติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเขียนในรูปของ Sinusoidal waveform ที่เป็น function ของเวลาและตำแหน่ง ถ้าพิจารณาในส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าจะได้

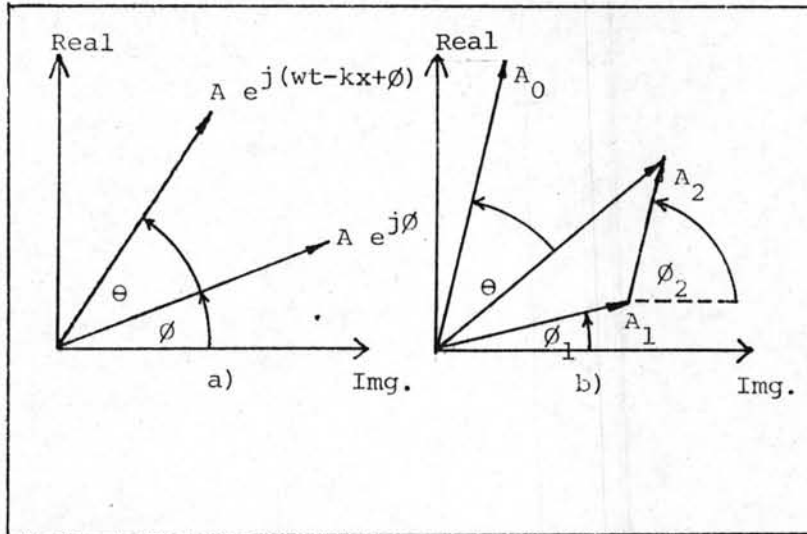
$$E = A \cos (wt - kx + \phi)$$

เมื่อ

$$k = \text{wave vector} \quad \text{มีค่า} \quad \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\phi = \text{phase ของสนามนั้น}$$

อาจเขียนลงใน Complex plane ได้ดังรูป ๑.๔ a



รูปที่ ๑.๔

แสดง Vector และการ

รวม Complex plane

$$\theta = wt - kx$$

และเมื่อคลื่น ๒ คลื่น รวมกันสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$E_0(x, t) = E_1(x, t) + E_2(x, t)$$

การรวมนี้เป็นการรวมแบบ Vector ดังนั้น

$$E_0(x, t) = A_0 \cos (wt - kx + \phi_0)$$

เขียนใน Complex plane ได้ดังรูป ๑.๔ b โดย

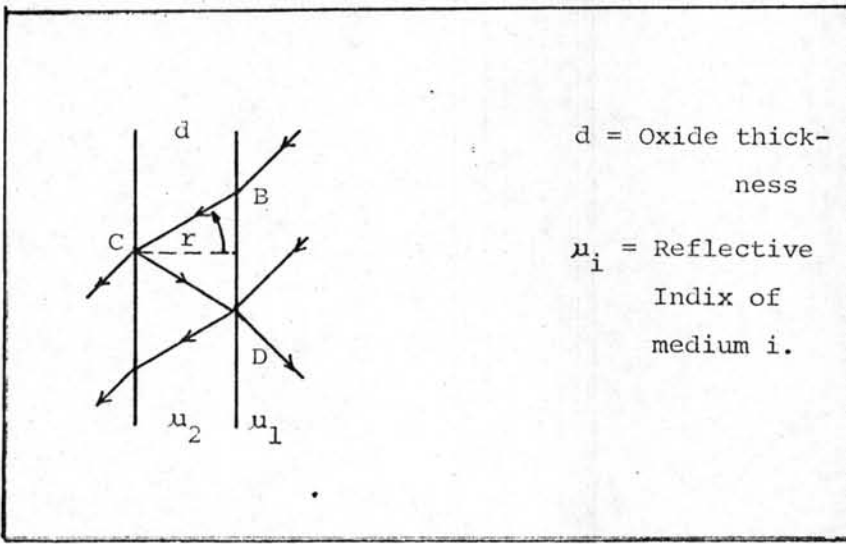
$$A_0^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos (\phi_2 - \phi_1)$$

คือ ขนาดของผลรวมจะมีส่วนที่เป็น Sinusoidal function อยู่โดยความเข้มของแสงจะมาก

หรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า ϕ เท่านั้น Maxima เกิดเมื่อ $(\phi_2 - \phi_1) = \pm 2n\pi$ ส่วน Minima

เกิดเมื่อ $(\phi_2 - \phi_1) = \pm(2n+1)\pi$ (n คือ เลขจำนวนเต็มบวก)

การเกิด fringe เนื่องจากการสะท้อนของแสงที่ชั้นโปรงใส (4) ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการรวมตัวของคลื่นแบบเสริมและหักล้างกัน มีทฤษฎีดังต่อไปนี้



d = Oxide thickness
 μ_i = Reflective Index of medium i .

รูป ๑.๖ แสดงการเกิด fringe เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวชั้นโปรงใส

พิจารณารูป ๑.๖ ถ้ากำหนดให้แสงตกกระทบแนวผลึกที่ B มีค่า $E = E_0 e^{j\omega t}$ แล้วจะได้ว่า
 แสงสะท้อนผิวชั้นโปรงใสที่ B มีค่า $E = \rho_1 E_0 e^{j\omega t}$
 แสงผ่านลงในชั้นโปรงใสที่ B มีค่า $E = \tau_1 E_0 e^{j\omega t}$

เมื่อ ρ_i = Reflectivity Coefficient ของตัวกลางที่ i
 τ_i = Transmission Coefficient ของตัวกลางที่ i (i = ค่าแสดงลำดับชั้น)

พิจารณาที่ตำแหน่ง C คลื่นที่ C มีค่า phase ต่างจากคลื่นที่ B $= k_2 BC = k_2 \frac{d}{\cos r}$

เมื่อ k_i = ค่า wave vector ในตัวกลาง i มีค่า $= \frac{\omega}{v_i} = \frac{\omega \mu_i}{c}$
 (ω = ความเร็วเชิงมุมของคลื่นแสงที่ส่องเข้าสู่ชั้นโปรงใส
 v_i = ความเร็วของคลื่นแสงนี้ในตัวกลาง i ใด ๆ
 μ_i = ดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง i
 c = ความเร็วแสงใน free space)

ดังนั้นแสงที่ตกกระทบบนผิวของตัวกลาง ๓ มีค่า $E = \tau_1 E_0 e^{j(\omega t - k_2 d / \cos r)}$

แสงสะท้อนผิวตัวกลาง ๓ มีค่า $E = \rho_2 \tau_1 E_0 e^{j(\omega t - k_2 d / \cos r)}$

ใช้วิธีเดียวกันนี้พิจารณาแสงสะท้อนที่ C และตกกระทบบนผิวด้านในของชั้นโปรงใสได้ดังนี้

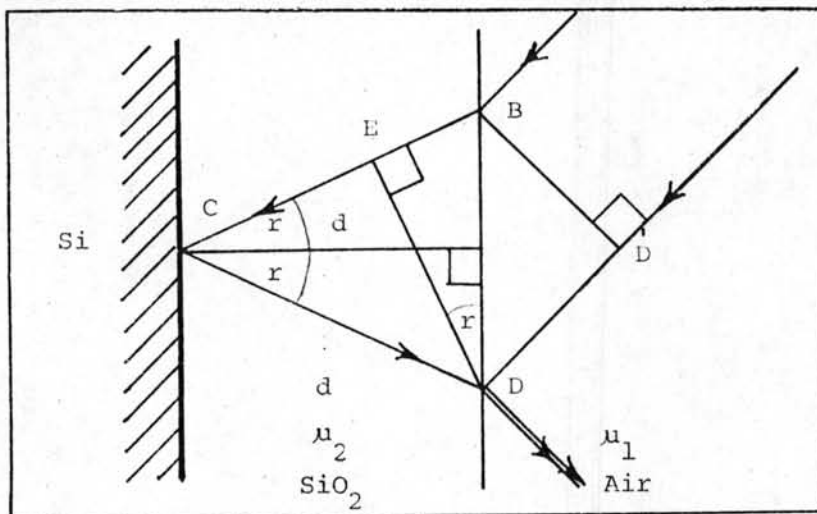
แสงตกกระทบบนที่ D มีค่า $E = \rho_2 \tau_1 E_0 e^{j(\omega t - 2k_2 d / \cos r)}$

แสงผ่านออกจากชั้นโปรงใสมีค่า $E = \tau_2 \rho_2 \tau_1 E_0 e^{j(\omega t - 2k_2 d / \cos r)}$

เมื่อพิจารณา phase ของแสงที่สะท้อนที่ B และส่องผ่านออกจากชั้นโปรงใสที่จุด D พบว่า phase ต่างกัน $2 k_2 d / \cos r$ ดังนั้นถ้ารวมแสงทั้งสองให้ตกลงที่จุดเดียวกันก็เกิดการเสริมกันหรือหักล้างกันได้ ถ้ามีค่า phase ต่างกันพอเหมาะ ดังแสดงไว้ข้างต้น อาศัยคุณสมบัติการเกิด fringe นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดความหนาของชั้นโปรงใสได้

การประยุกต์ทฤษฎีกับการวัดความหนาชั้น SiO₂

โดยปกติชั้น SiO₂ ที่นำมาใช้ประโยชน์มีความหนาในช่วงหนึ่งในล้านเมตร เมื่อเทียบกับขนาดของลำแสงที่ส่องเข้าสู่แว่นผลึกเพื่อใช้วัดความหนาแล้ว ตำแหน่งที่แสงสะท้อนจากผิว Si ออกจากผิวหน้าของชั้น SiO₂ จะอยู่ในบริเวณที่แสงตกกระทบบ ดังนั้นการเกิด fringe เนื่องจากความต่าง phase ของแสงสะท้อนที่ผิว SiO₂ ณ. ตำแหน่งที่แสงสะท้อนกลับออกจากเนื้อ SiO₂ จึงสามารถสังเกตได้ และสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ ๑.๗

แสดงการเกิด fringe
เพื่อใช้ประกอบการวิ-
เคราะห์ทฤษฎีของ
VAMFO

พิจารณาที่จุด D แสงที่จุดนี้มี phase ต่างกันที่จุด B = $k_1 DD'$

จาก Snell's Law $\frac{\sin DBD'}{\sin BDE} = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{k_2 c/w}{k_1 c/w}$

$$\frac{DD'/BD}{BE/BD} = \frac{k_2}{k_1}$$

$$DD' k_1 = BE k_2$$

จากรูปสามารถคำนวณได้ว่า $BE = 2d \tan r \sin r$

$$DD' k_1 = 2d \tan r \sin r k_2$$

แต่ทราบจากทฤษฎีของการเกิด fringe เนื่องจากแสงสะท้อนในชั้นโปร่งใสแล้วว่า phase ของแสง

ที่ D ต่างกับ phase ของแสงที่ B = $\frac{2 k_2 d}{\cos r}$

ดังนั้นแสงสะท้อนที่ D และแสงที่สะท้อนผิว Si และกลับออกที่ D มี phase ต่างกัน

$$\begin{aligned} &= \frac{2 k_2 d}{\cos r} - 2 k_2 d \tan r \sin r \\ &= \frac{2 k_2 d}{\cos r} (1 - \tan r \sin r \cos r) \\ &= \frac{2 k_2 d}{\cos r} \cos^2 r \\ &= \frac{2 k_2 d}{\cos r} \end{aligned}$$

เขียน k_2 ในรูปของ μ_2 ได้ดังนี้ $k_2 = \frac{\mu_2 w'}{c} = \frac{\mu_2 2\pi}{\lambda}$

ดังนั้นความต่าง phase ที่จุด D ของคลื่นทั้งสอง = $\frac{2\pi 2 \mu_2 d \cos r}{\lambda}$

จากข้อกำหนดของการเกิด fringe สรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Maxima} \quad \text{เกิดเมื่อ} \quad \frac{2\mu_2 d \cos r}{\lambda} &= 2n\pi \\ 2\mu d \cos r &= n\lambda \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Minima} \quad \text{เกิดเมื่อ} \quad \frac{2\mu_2 d \cos r}{\lambda} &= (2n+1)\pi \\ 2\mu d \cos r &= \frac{n}{2} \lambda \quad (n \text{ คือจำนวนเต็มบวกใด ๆ}) \end{aligned}$$

สมการทั้งสองอยู่ในรูปของมุมหักเห (r) เพื่อความสะดวกจึงเปลี่ยนเป็นรูปของมุมตกกระทบ โดยใช้ Snell's Law ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{\sin i}{\sin r} &= \mu_2 \\ r &= \sin^{-1} \frac{\sin i}{\mu_2} \end{aligned}$$

สมการทั้งสองในรูปมุมตกกระทบจึงเป็น

$$\begin{aligned} 2\mu d \cos \sin^{-1} \frac{\sin i}{\mu_2} &= n\lambda \\ 2\mu d \cos \sin^{-1} \frac{\sin i}{\mu_2} &= \frac{n}{2} \lambda \end{aligned}$$

ด้วยสมการทั้งสองนี้ สามารถคำนวณหาความหนาของชั้น SiO_2 (d) ได้โดยง่าย เมื่อทราบตำแหน่งมุมตกกระทบ (i) ที่พบ Maxima หรือ Minima การวัดมุมตกกระทบดังกล่าวนี้จะกล่าวถึงในบทต่อไป