หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ ๓.

การคำนวณค่าความหนาชั้น SiO_2 จากข้อมูลที่ได้จากการวัด

การวัดและการคำนวณค่าความหนาของชั้น SiO_2 ด้วยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนี้ เป็นการปรับปรุงและเพิ่มเติมวิธีที่ใช้อยู่เดิม เพื่อชดเชยข้อบกพร่องของเครื่องมือทำให้ใช้วัดได้ดีขึ้น

ในบทนี้กล่าวถึง ลักษณะข้อมูลดิบและการหาค่าความหนาของชั้น SiO_2 ที่หนาต่าง ๆ กัน ความผิดพลาดและการประเมินความผิดพลาดในแต่ละช่วงความหนาไว้ตามลำดับ

ลักษณะข้อมูลดิบและการหาค่าความหนา

ในการวัดความเข้มแสงที่สะท้อนจากแว่นผลึกในขณะเปลี่ยนมุมตกกระทบไปนั้น ความเข้มแสงที่วัดได้ จะเปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีตำแหน่งมุมตกกระทบที่มีความเข้มของแสงสะท้อนสูงสุด (Maxima) หรือมีความเข้มแสงสะท้อนต่ำสุด (Minima) โดยอาจสังเกตุพบ Maxima และ Minima สลับกัน มากกว่า ๑ ครั้ง หรือพบ Maxima หรือ Minima เพียงชนิดเดียว หรือไม่พบทั้งสองชนิด แต่สังเกตุได้เพียงการเปลี่ยนแปลงว่าความเข้มของแสงสะท้อนเพิ่มหรือลดตามมุมตกกระทบเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาชั้น SiO_2 เป็นสำคัญ

ในกรณีที่พบ Maxima หรือ Minima มากกว่า ๑ ครั้ง สามารถนำค่ามุมตกกระทบที่เกิด Maxima หรือ Minima มาคำนวณความหนาชั้น SiO_2 ได้จากสมการพื้นฐานคือ

$$d = \frac{n\lambda}{2\mu \cos \sin^{-1}\left(\frac{\sin i}{\mu}\right)}$$

เมื่อ

d = ความหนาชั้น SiO_2 ($^{\circ}A$)

λ = ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในกรณีนี้ใช้ $6328^{\circ}A$

μ = ดัชนีหักเหของชั้น SiO_2 ในกรณีนี้ใช้ 1.476

i = มุมตกกระทบที่เกิด Maxima หรือ Minima

n = 1,2,3,.....กรณีเป็น Maxima
0.5, 1.5, 2.5....กรณีเป็น Minima

(สมการนี้พิสูจน์ไว้โดยละเอียดในบทต้น)

จากสมการพื้นฐานนี้ λ เป็นค่าคงที่ ส่วน μ อาจประมาณเป็นค่าคงที่ได้ (6) ดังนั้น เมื่อทราบ ϕ จะเหลือตัวไม่ทราบค่าคือ d และ n

จากคุณสมบัติในการเปลี่ยนความเข้มแสงสะท้อนที่เป็นไปโดยต่อเนื่องซึ่งทำให้ Maxima เกิดสลับกับ Minima เสมอ จึงสรุปได้ว่าค่า n ที่เกิด Maxima หรือ Minima ใกล้ ๆ กัน จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$n_2 = n_1 + \frac{1}{2}$$

n_1 = ค่า n ที่พบ Maxima หรือ Minima ครั้งแรก

n_2 = ค่า n ที่พบ Minima หรือ Maxima ครั้งที่ ๒ (ใกล้กับครั้งแรก) เมื่อเพิ่มมุมตกกระทบไป

เพื่อแก้สมการหาค่า d จึงต้องใช้สมการ ๒ สมการ คือ

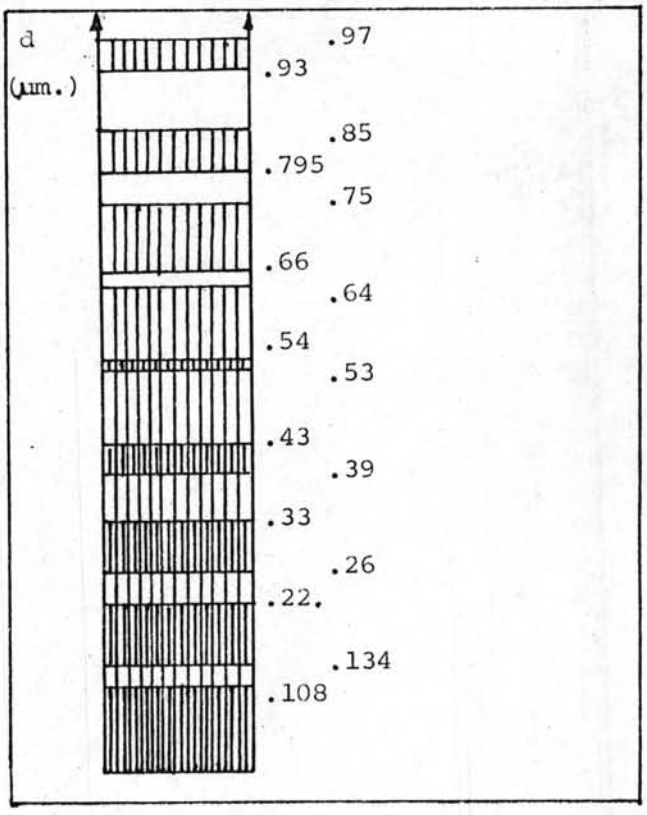
พบ Maxima หรือ Minima ครั้งแรก ที่มุม i_1 $\quad d_1 = \dfrac{n_1 \lambda}{2 \mu \cos \sin^{-1} (\frac{\sin i_1}{\mu})}$

พบ Minima หรือ Maxima ครั้งที่ ๒ ที่มุม i_2 $\quad d_2 = \dfrac{(n_1 + \frac{1}{2}) \lambda}{2 \mu \cos \sin^{-1} (\frac{\sin i_2}{\mu})}$

จาก ๒ สมการนี้สามารถแก้หาค่า d ได้

การหาความหนาชั้น SiO_2 ด้วยสมการดังกล่าวนี้ค่อนข้างยุ่งยาก เพราะต้องผ่านการคำนวณหลายขั้นตอน เพื่อความสดวกจึงสร้าง chart หาความหนาโดยอาศัยสมการพื้นฐานข้างต้นขึ้นใช้หาค่าความหนาได้โดยสดวกยิ่งขึ้น

ขอบเขตความสามารถในการวัดของเครื่องมือที่สร้างขึ้นอาจแสดงได้ดังรูป ๓.๑



รูปที่ ๓.๑

ขอบเขตความสามารถของเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

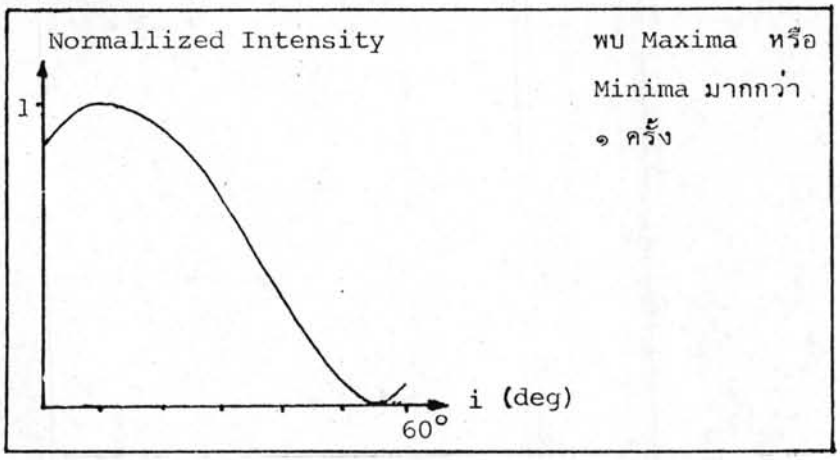
พบ Maxima และ Minima มากกว่า ๑ ครั้ง

พบ ๑ Maxima หรือ Minima

ไม่พบ Maxima หรือ Minima

ชั้น SiO_2 อาจแบ่งออกได้เป็น ๓ พวกคือ พวกที่หนามาก หนาปานกลาง และพวกที่บางมาก ซึ่งมีข้อมูลดิบและวิธีคำนวณหาความหนาแตกต่างกันไป ดังจะแยกกล่าวถึงในตอนต่อไป

<u>การวัดค่าความหนาชั้น SiO_2 ที่หนามาก (6)</u> การวัดในช่วงนี้พบ Maxima และ Minima มากกว่า ๑ ตำแหน่ง ความหนาในช่วงนี้เริ่มจาก .64 μm. ขึ้นไปเป็นช่วงย่อย ๆ จนถึงความหนา .93 μm. และความหนาที่หนากว่า .96 μm. ขึ้นไป โดยมีข้อมูลดิบดังแสดงในรูป ๓.๒

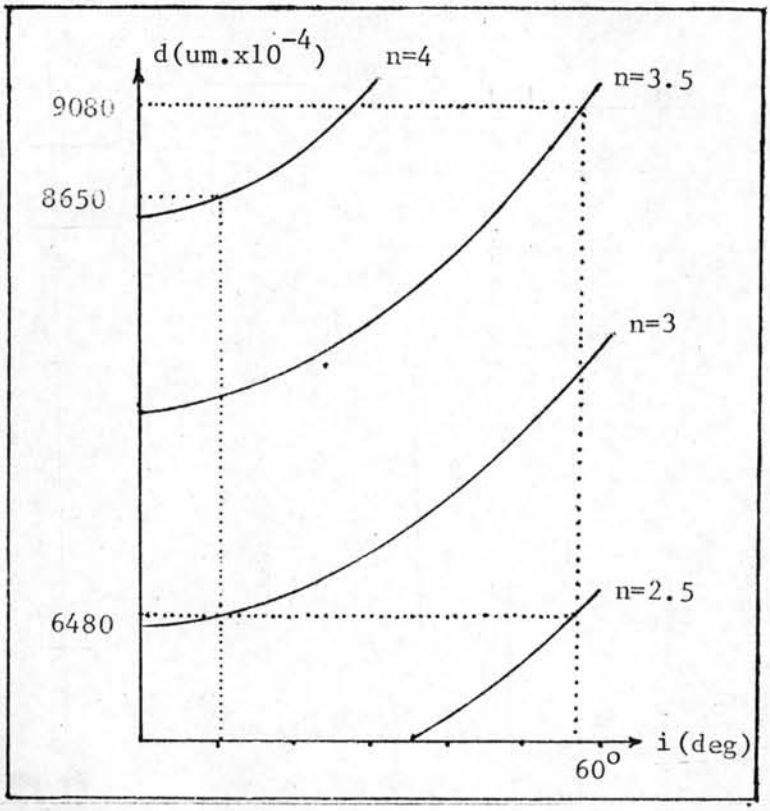


พบ Maxima หรือ Minima มากกว่า ๑ ครั้ง

รูปที่ ๓.๒

ลักษณะข้อมูลดิบของชั้น SiO_2 ที่หนามาก ๆ

จากค่ามุมตกกระทบตำแหน่งที่เป็น Maxima และ Minima เหล่านี้ เมื่อกำหนดจุดบน chart หาความหนา (ภาคผนวก ก.) จะมีจุดต่าง ๆ ชุดเดียวเท่านั้นที่ให้ค่าความหนาตรง หรือใกล้เคียงกัน กลุ่มจุดชุดนี้จะมีค่า n ถูกต้อง ส่วนกลุ่มจุดชุดอื่นที่มีค่า n ไม่ถูกต้องจะอ่านค่าความหนาได้ต่างกันมาก วิธีหาค่าความหนาอาจแสดงได้ในรูป ๓.๓

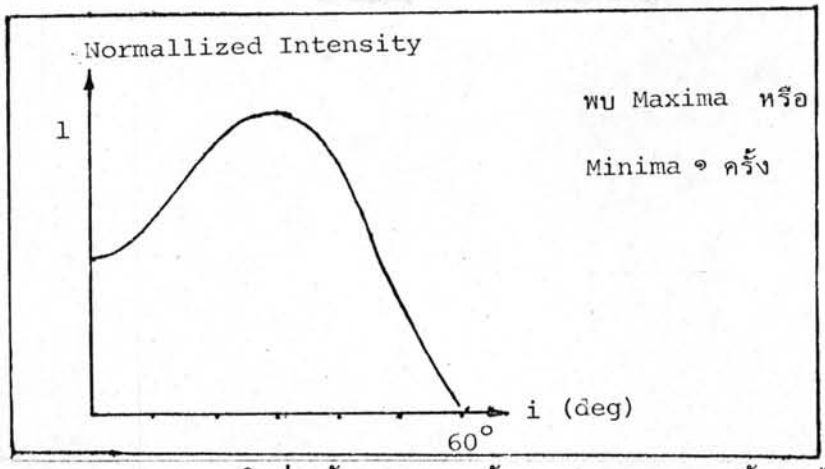


รูปที่ ๓.๓

การหาความหนาชั้น SiO_2 ที่หนามาก ๆ โดยใช้ chart หาความหนา

การหาค่าความหนาด้วยวิธีนี้ ให้ค่าความหนาแท้จริง ความผิดพลาดจะลดลงถ้าชั้น SiO_2 หนาขึ้น เพราะมี Maxima และ Minima มากตำแหน่ง จึงสามารถเฉลี่ยเพื่อหาค่าความหนาได้ถูกต้องขึ้นอย่างไรก็ตาม ความผิดพลาดขึ้นอยู่กับความสามารถในการอ่านค่ามุมตกกระทบของเครื่องวัดด้วย โดยเฉพาะเมื่อชั้น SiO_2 หนามากเกินค่าจำกัดค่าหนึ่ง

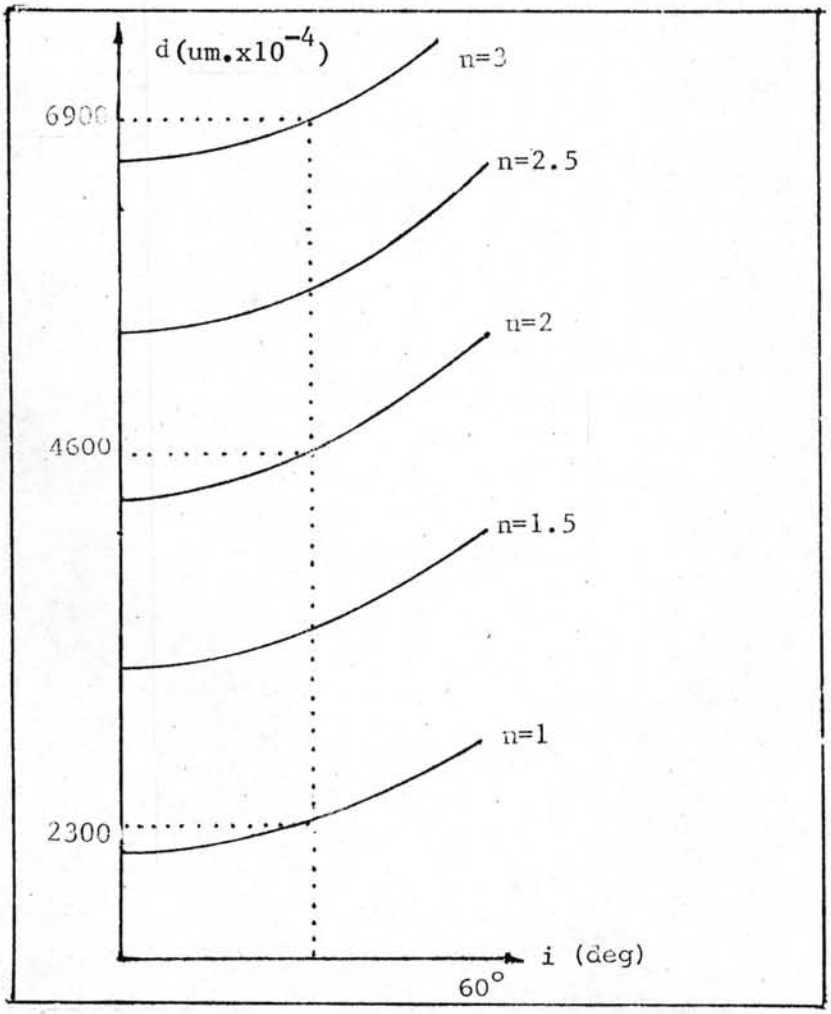
<u>การวัดค่าความหนาชั้น SiO_2 ที่หนาปานกลาง</u> การวัดในช่วงนี้พบ Maxima หรือ Minima อย่างใดอย่างหนึ่งเพียง ๑ ตำแหน่ง ซึ่งอยู่ในช่วงความหนา .11 µm. ขึ้นไปเป็นช่วง ๆ จนถึง .96 µm. โดยมีข้อมูลดิบดังรูป ๓.๔



รูปที่ ๓.๔

ข้อมูลดิบของการวัดความหนาชั้น SiO_2 ที่หนาปานกลาง

ความหนาในช่วงนี้ สามารถสร้างสมการจากสมการพื้นฐานได้เพียง ๑ สมการ ทำให้การกำหนดจุดลงบน chart หาค่าความหนา มีความหนาที่เป็นไปได้หลายค่าด้วยกัน โดยมีค่า n ต่างกันไป ดังรูป ๓.๕



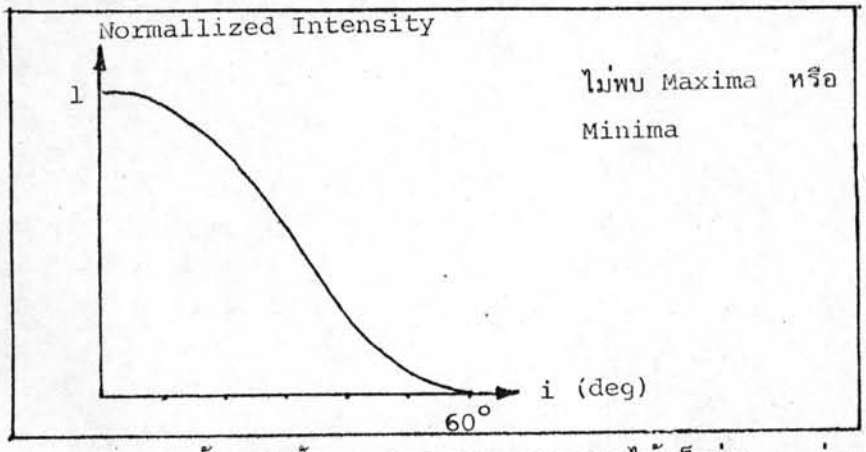
รูปที่ ๓.๕

การหาความหนาชั้น SiO_2 ที่หนาปานกลางโดยใช้ chart หาความหนา

เพื่อหาค่า n ที่ถูกต้องจึงจำเป็นต้องใช้วิธีหาความหนาชั้น SiO_2 วิธีอื่นมาประกอบวิธีที่เหมาะสม และรวดเร็ววิธีหนึ่งคือ ใช้ตารางเทียบสีสังเกตุสีของแว่นผลึก (6) (ภาคผนวก ข.) แล้วเปรียบเทียบหาค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่หาได้ในตอนต้นอีกครั้งหนึ่ง ด้วยวิธีนี้จะได้ค่าความหนาที่แม่นยำพอควร

ความผิดพลาดในการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการบอกตำแหน่งมุมตกกระทบเพียงประการเดียว ซึ่งอาจเพิ่มความแม่นยำขึ้นด้วยการวัดหลาย ๆ ครั้ง แล้วเฉลี่ยหามุมตกกระทบที่ใกล้เคียง

<u>การวัดค่าความหนาชั้น SiO_2 ที่บางมาก ๆ</u> การวัดในช่วงนี้ไม่พบ Maxima หรือ Minima แต่จะสังเกตุได้เพียงการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงว่ามากขึ้นหรือน้อยลงอย่างไรเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบขึ้น ความหนาที่วัดได้ในช่วงนี้ เริ่มจาก .05 ๛ เป็นช่วง ๆ ขึ้นไปจนถึง .54 ๛. โดยช่วงที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะสลับกับช่วงที่ความเข้มแสงลดลง ข้อมูลดิบแสดงไว้ในรูป ๓.๖



<u>รูปที่ ๓.๖</u>

ข้อมูลดิบของชั้น SiO_2 ที่บางมาก ๆ

จากข้อมูลดิบนี้สามารถคาดคะเนความหนาได้เป็นช่วง ๆ ส่วนความหนาที่แท้จริงได้จากการใช้ตารางเทียบสี ความคลาดเคลื่อนจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตารางเทียบสีประการเดียว

ด้วยการวัดค่าความหนาทั้งสามช่วงที่กล่าวมานี้ สรุปได้ว่าเครื่องมือที่ใช้วัดมีประสิทธิภาพต่างกันเป็นช่วง ๆ โดยจะใช้ได้ดีกับชั้น SiO_2 ที่หนาพอควร ส่วนชั้น SiO_2 ที่ค่อนข้างบางต้องใช้วิธีอื่นประกอบ เช่น ใช้ตารางเทียบสีเป็นต้น อย่างไรก็ตาม ความหนาที่วัดได้ด้วยวิธีดังกล่าวแล้วนี้อาจยืนยันให้แน่ชัดได้ด้วย chart ของการทำ Oxidation (ภาคผนวก ค.)

ความผิดพลาดและการประเมินความผิดพลาดในการวัดค่าความหนาชั้น SiO_2

การวัดความหนาชั้น SiO_2 ด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้ มีความผิดพลาดอันเกิดจากการสร้างเครื่องไม่แม่นยำเพียงพอ ทำให้อ่านค่ามุมที่เกิด Maxima หรือ Minima คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ความผิดพลาดที่ทราบอาจกล่าวแยกได้ดังต่อไปนี้

การเกิดช่วงที่ควบคุมไม่ได้ (Death Zone) อันเนื่องจากความหลวม ความหลวมของส่วนประกอบย่อย ๆ ของเครื่องมือเมื่อรวมกันเข้าทำให้การวัดในทางเพิ่มและลดมุมตกกระทบได้ผลต่างกันเล็กน้อย ความคลาดเคลื่อนเช่นนี้ลดลงเมื่อใช้แถบสปริงและขดสปริงประกอบเข้ากับบางส่วนของเครื่องมือ ผลการวัดจึงดีขึ้น

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแว่นผลึก เป็นเหตุให้แสงค่อย ๆ เบนจาก Detector ทำให้สังเกตุ Maxima หรือ Minimaไม่ชัดเจนหรือผิดพลาด ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากแกนของแป้นติดตั้งแว่นผลึกเยื้องกับแกนหมุนร่วมของเครื่องมือเล็กน้อย อันเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการสร้างเครื่องมือ การแก้ไขทำได้โดยเลื่อนแท่นติดแว่นผลึกให้อยู่ในตำแหน่งเหมาะสม และเพิ่มส่วนกระจายแสง (Diffuser) ที่หน้า Detector เพื่อลดความแตกต่างอันเกิดจากแสงตกคลาดเคลื่อนตำแหน่งลงได้บ้าง

นอกจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ แสงรบกวนจากภายนอกและแสงความถี่อื่น ๆ ซึ่งปนอยู่ในแหล่งกำเนิดแสง Laser ยังทำให้ผลการวัดความหนาคลาดเคลื่อนด้วย ความผิดพลาดเหล่านี้รวมกันแล้วสามารถประเมินความหนาที่คลาดเคลื่อนในการวัดได้

การประเมินความผิดพลาดในการวัดความหนาชั้น SiO_2 เนื่องจากการวัดมุม

การประเมินความหนาที่คลาดเคลื่อนไป ทำได้จากค่าความหนาผิดพลาดต่อองศา ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการพื้นฐานดังต่อไปนี้

ให้ i_1 = ค่ามุมตกกระทบที่อ่านได้จากเครื่องวัดเป็นองศา

i_2 = ค่ามุมตกกระทบที่เกิด Maxima หรือ Minima จริง

$$\text{ความหนาที่วัดได้ให้} = d_1 = \frac{n\lambda}{2\mu \cos \sin^{-1}\left(\frac{\sin i_1}{\mu}\right)}$$

$$\text{ความหนาที่แท้จริงให้} = d_2 = \frac{n\lambda}{2\mu \cos \sin^{-1}\left(\frac{\sin i_2}{\mu}\right)}$$

$$\text{ความหนาที่ผิดพลาด} = (d_1 - d_2) = \frac{n\lambda}{2u}\left[\frac{1}{\cos \sin^{-1}\left(\frac{\sin i_1}{u}\right)} - \frac{1}{\cos \sin^{-1}\left(\frac{\sin i_2}{u}\right)}\right]$$

จากสมการนี้ ถ้า i_1 ต่างกับ i_2 1 องศา ค่า $(d_1 - d_2)$ ก็คือความคลาดเคลื่อนต่อองศาในการวัดความหนา

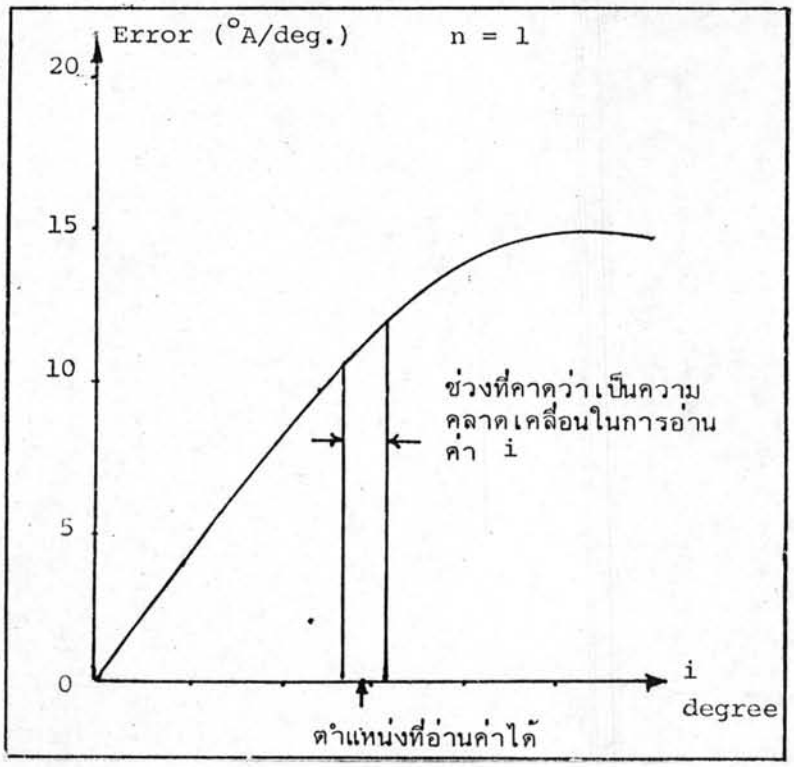
จากสมการความคลาดเคลื่อนข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนจะแปลตามค่า n ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนที่ n ใด ๆ หาได้จากสมการต่อไปนี้

ความคลาดเคลื่อนที่ค่า n ใด ๆ = n (ความคลาดเคลื่อนเมื่อคิดค่า n = 1)

ดังนั้นเพื่อความสดวกในการประเมินความคลาดเคลื่อน จึงสร้างกราฟของความคลาดเคลื่อนต่อองศา ที่ค่า n = 1 ไว้ดังรูป ๓.๗

การประเมินค่าความหนาที่คลาดเคลื่อนไปทำได้โดยหาพื้นที่ใต้เส้นกราฟในรูป ๓.๗ ในช่วงที่คาดว่าเป็นความคลาดเคลื่อนในการวัด แล้วคูณด้วยค่า n ของแว่นผลึกที่วัดความหนาชั้น SiO_2 นั้น ในทางปฏิบัติความคลาดเคลื่อนในการวัดอยู่ในพิกัด $\pm 2.5^\circ$ คือความคลาดเคลื่อนควรอยู่ในช่วง 5° ซึ่งช่วงของความคลาดเคลื่อนนี้จะแคบลง เมื่อสามารถสังเกตุ Maxima และ Minima ได้มากกว่า ๑ จุด นั่นคือถ้าชั้น SiO_2 หนามากขึ้นช่วงความคลาดเคลื่อนนี้ย่อมลดลง

จากการคาดคะเนความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้สามารถสรุปได้ดังตาราง ๓.๔



รูปที่ ๓.๗

ความคลาดเคลื่อนต่ออองศาที่ n = 1 การหาความคลาดเคลื่อนทำได้โดยหาพ.ท.ใต้ curve บริเวณที่คาดว่าวัดมุมตกกระทบผิดพลาดไป ดังแสดงในรูป แล้วคูณด้วย n

ช่วงความหนา (um.)	ความคลาดเคลื่อนที่คาดว่าเป็นไปได้ (um.)
.05 .108 .13 . 22 .26 . 33 .39 . 43 .53 . 54	(ช่วงของชั้น SiO_2 ที่บางมาก และบางช่วงของชั้น SiO_2 ที่หนาปานกลาง) ประมาณ .05
.108 . 13 .22 . 26 .33 . 39 .43 . 53 .54 . 64 .66 . 75 .80 . 86 .93 . 97	(บางช่วงของชั้น SiO_2 ที่หนามาก ๆ และบางมาก ๆ และส่วนที่ใหญ่ของชั้น SiO_2 ช่วงที่หนาปานกลาง) ประมาณ .01
.64 . 66 .75 . 80 .86 . 93 มากกว่า .97	(บางช่วงของชั้น SiO_2 ที่หนาปานกลางและชั้น SiO_2 ช่วงที่หนามาก) ประมาณ .01 หรือ 5%

รูปที่ ๓.๘

ความผิดพลาดในการวัดที่คาดว่าจะเป็นไปได้ (ในกรณีนี้ไม่คิดความผิดพลาดเนื่องจากการสมมุติค่า μ เป็นค่าคงที่)

ความคลาดเคลื่อนนี้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในการนำมาใช้งานตามวัตถุประสงค์