

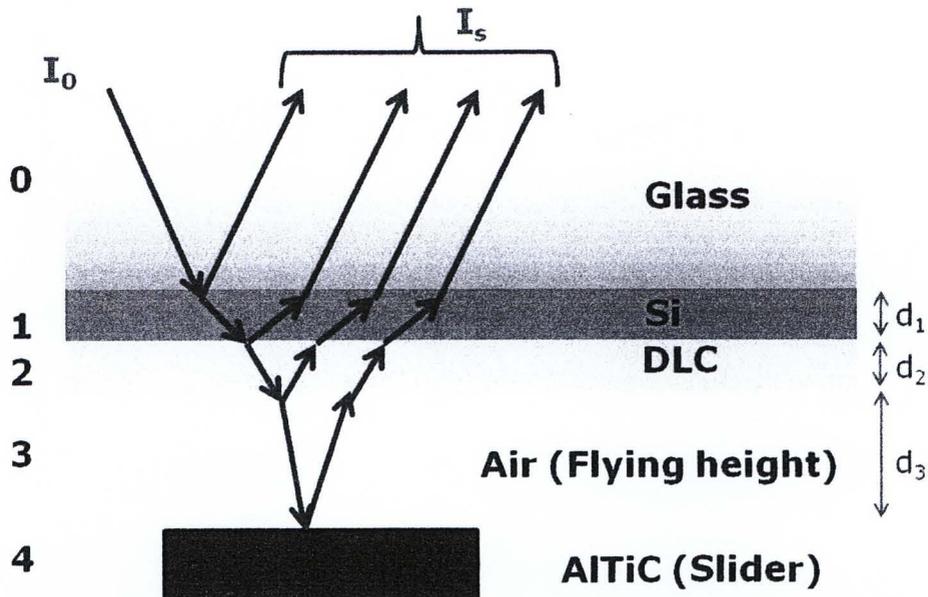
บทที่ 6

การประยุกต์ใช้งานของดิสก์ในเครื่อง Flying height tester

การทดสอบนำดิสก์ไปใช้งานคือการทดสอบความเหมาะสมในการนำดิสก์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในกระบวนการวัด Flying height โดยที่ดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นต้องสามารถใช้วัด Flying height ได้อย่างถูกต้อง แต่จากการเคลือบผิวของจานแก้วด้วยซิลิกอนและ DLC จะทำให้ค่าดรรชนีหักเหของดิสก์ที่สร้างขึ้นแตกต่างไปจากเดิม และเนื่องจากในเครื่องวัด Flying height นั้นสามารถใส่ค่าดรรชนีหักเหได้เพียงค่าเดียว (ไม่ได้ออกแบบมาให้ใช้ดิสก์ที่มีการเคลือบผิว) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าดรรชนีหักเหลัทธิใหม่ของดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC ก่อนจะใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้นในการวัด Flying height ทั้งนี้ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณหาค่าดรรชนีหักเหลัทธิดังกล่าวได้โดยประยุกต์ใช้ Thin film theory ถ้ามีโมเดลที่ถูกต้อง (ค่าความหนาและดรรชนีหักเหของฟิล์มแต่ละชั้น) แต่เนื่องจากโมเดลนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าดรรชนีหักเหลัทธิที่ถูกต้องที่สุดจึงต้องทำการวัดการวัดความเข้มของแสงสะท้อนจากดิสก์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้หาค่าดรรชนีหักเหลัทธิที่เหมาะสม ในบทนี้จะกล่าวถึง Thin film theory ในการคำนวณแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบทที่ 6.1 ส่วนการหาค่าดรรชนีหักเหลัทธิของดิสก์ที่พัฒนาขึ้นจะกล่าวไว้ในบทที่ 6.2 และการทดสอบใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้นในการวัด Flying height จะกล่าวถึงในบทที่ 6.3

6.1 การคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์

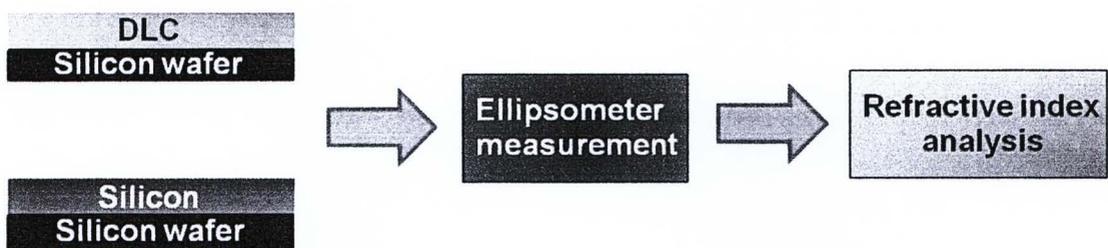
การหาความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์นั้นสามารถประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าดรรชนีหักเหลัทธิของดิสก์ได้ โดยการคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์นี้กระทำได้โดยใช้ทฤษฎี Thin film theory ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.2 โดยดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็น 3 ชั้นประกอบด้วยชั้นของจานแก้ว, ซิลิกอน และ DLC ในการนำดิสก์ชนิดนี้ไปใช้ในเครื่องวัด Flying height จะสามารถเขียนแบบจำลองในการคำนวณได้ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งแบบจำลองในการคำนวณนี้จะมีลักษณะการสะท้อนของแสงดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.1 โดยที่ d_1 , d_2 และ d_3 คือความหนาของซิลิกอน, DLC และ Flying height



รูปที่ 6.1 แบบจำลองในการคำนวณและลักษณะการสะท้อนของแสงของดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC เมื่อนำไปใช้ในเครื่องวัด Flying height

6.1.1 การวัดดรรชนีหักเหของซิลิกอนและ DLC

ในการคำนวณนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าดรรชนีหักเหของชั้นตัวกลางต่างๆที่มีความถูกต้อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัดค่าดรรชนีหักเหของซิลิกอนและ DLC ด้วยเครื่อง Ellipsometer โมเดล M-2000F ของบริษัท J.A.Woollam ขั้นตอนในการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 โดยที่รายละเอียดของในการวัดและหาค่าดรรชนีหักเหมื่อดังนี้



รูปที่ 6.2 ขั้นตอนในการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC

1. เตรียมชิ้นงานที่จะนำไปวัดดรรชนีหักเห โดยปลูกฟิล์มซิลิกอนและ DLC แยกกันบนซิลิกอนเวเฟอร์ดังรูปที่ 6.2
2. วัดชิ้นงานด้วยเครื่อง Ellipsometry เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลง Polarization ของแสงในรูปของแอมพลิจูด (ψ , Psi) และเฟส (Δ , Delta)

3. สร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัดในโปรแกรม EASE (โปรแกรมที่ใช้ควบคู่กับ Ellipsometer เพื่อวิเคราะห์หาค่าดรรชนีหักเหจากข้อมูล Psi และ Delta ที่ได้จากการวัด) ซึ่งแบบจำลองของชั้นงานจะประกอบด้วยชั้นตัวกลางคือซิลิกอนเวเฟอร์, ออกไซด์ของซิลิกอน (Native oxide) และชั้นของฟิล์มซิลิกอนหรือ DLC ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 6.3(a) และ รูปที่ 6.4(a)
4. เลือกโมเดลเพื่อจะใช้ในการวิเคราะห์ (Analysis model) ของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.3(a) และ รูปที่ 6.4(a) ซึ่งในที่นี้เลือกวิธี Cauchy model จากนั้นโปรแกรมจะทำการ Fitting ตัวแปรต่างๆในโมเดลเช่น A, B, C และ อื่นๆ ตามที่กำหนดและจะแปลงเป็นค่าดรรชนีหักเหของฟิล์ม (n และ k) โดยมีค่า MSE เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงความใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูลจากการวัดและข้อมูลจากการคำนวณซึ่งค่า MSE จากการ Fitting ของฟิล์มซิลิกอนและ DLC นั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ประมาณ 25 และ 27 ตามลำดับ) แปลว่าค่าดรรชนีหักเหที่ได้นั้นมีความน่าเชื่อถือพอสมควร โดยรูปที่ 6.3(b) และ รูปที่ 6.4(b) แสดงถึงผลการ Fitting และ รูปที่ 6.3(c) และ รูปที่ 6.4(c) แสดงถึงดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC

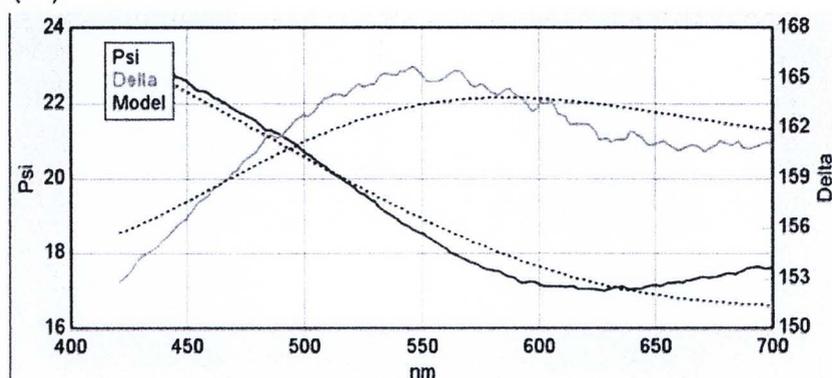
จากผลการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ด้วยเครื่อง Ellipsometer ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 6.3(c) และ รูปที่ 6.4(c) รวมถึงดรรชนีหักเหของอากาศ, งานแก้ว และ หัวอ่าน/เขียนที่ได้จากข้อมูลของทางบริษัท ทำให้ได้ค่าดรรชนีหักเหของชั้นตัวกลางทั้งหมดในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6.1 จากนั้นจะนำข้อมูลดรรชนีหักเหนี้ไปใช้เพื่อการคำนวณทางทฤษฎี

Silicon

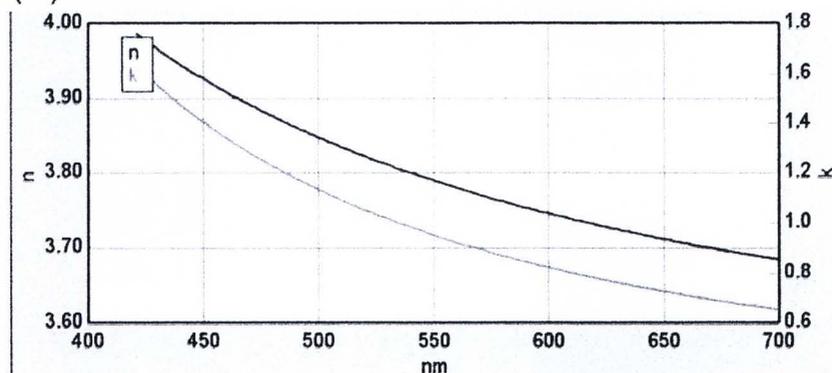
(a)

| |
|--|
| Layer # 2 = <u>Cauchy</u> Thickness # 2 = <u>694.00 Å</u> A = <u>3.518</u> (fit) B = <u>0.08141</u> (fit) C = <u>0.00029</u> (fit) k Amplitude = <u>1.84037</u> (fit) Exponent = <u>0.779</u> (fit) Band Edge = <u>400.0 nm</u> |
| Layer # 1 = <u>NTVE_JAW</u> Thickness # 1 = <u>20.00 Å</u> |
| Substrate = <u>Si_JAW</u> |

(b)



(c)



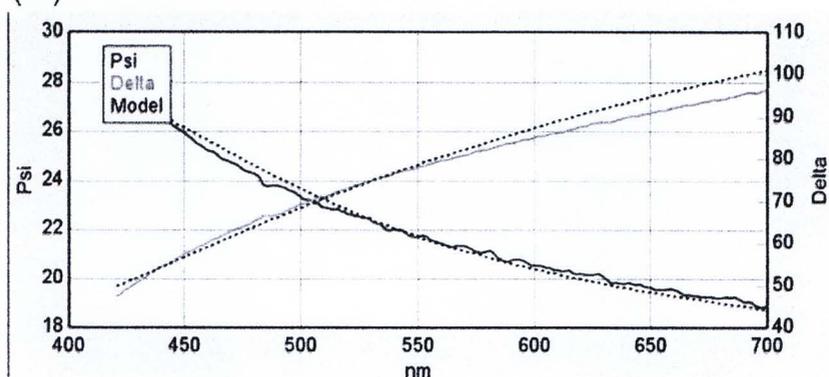
รูปที่ 6.3 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอน การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Cauchy (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c)

DLC

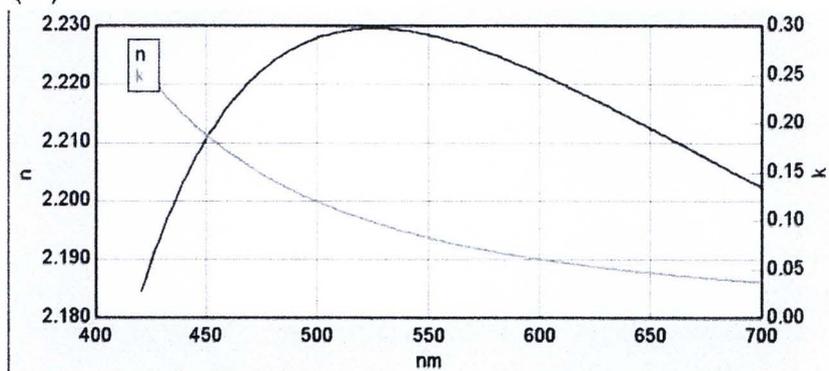
(a)

| |
|---|
| Layer # 2 = <u>Cauchy</u> Thickness # 2 = <u>456.00 Å</u> A = <u>2.087</u> (fit) B = <u>0.07894</u> (fit) C = <u>-0.01090</u> (fit) k Amplitude = <u>0.33212</u> (fit) Exponent = <u>1.648</u> (fit) Band Edge = <u>400.0 nm</u> |
| Layer # 1 = <u>NTVE_JAW</u> Thickness # 1 = <u>20.00 Å</u> |
| Substrate = <u>Si_JAW</u> |

(b)



(c)



รูปที่ 6.4 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC การสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Cauchy (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC ที่แปลงมาจากการ Fitting (c)

ตารางที่ 6.1 ดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ

| Material | Wavelength 450nm | Wavelength 550nm | Wavelength 650nm |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Silicon | 3.926+1.404i | 3.789+0.951i | 3.711+0.7261i |
| DLC | 2.211+0.1873i | 2.228+0.082i | 2.212+0.0464i |
| Air | 1 | 1 | 1 |
| Glass disk | 1.54+0.02i | 1.51+0.01i | 1.52 |
| Slider (AlTiC) | 2.39+0.432i | 2.354+0.363i | 2.289+0.344i |

6.1.2 การคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากดิสก์ที่มีซิลิกอนและ DLC

ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากแบบจำลองดังรูปที่ 6.1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6.1) โดยใช้ Thin film theory [6] ซึ่งสามารถดูที่มาของสมการเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก. โดยใช้ค่าดรรชนีหักเหตามตารางที่ 6.1 และพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

| Parameters | Detail |
|-------------------------------|---------------------------|
| ความหนาซิลิกอน (d_1) | 1 นาโนเมตร |
| ความหนา DLC (d_2) | 15 นาโนเมตร |
| Flying height (d_3) | 0 ถึง 350 นาโนเมตร |
| Wavelength (Blue, Green, Red) | 450, 550 และ 650 นาโนเมตร |

$$I_s = I_0 \left[\frac{r_{01} + r_{1234} e^{2i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{1234} e^{2i\beta_1}} \right]^2 \quad \text{--- (6.1)}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในลักษณะ

$$I_s = I_0 |R|^2 e^{i\varphi} = I_0 R^2 \quad \text{--- (6.2)}$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$r_{1234} = \left[\frac{r_{12} + r_{234}e^{2i\beta_2}}{1 + r_{12}r_{234}e^{2i\beta_2}} \right] \quad \text{--- (6.3)}$$

$$r_{234} = \left[\frac{r_{23} + r_{34}e^{2i\beta_3}}{1 + r_{23}r_{34}e^{2i\beta_3}} \right] \quad \text{--- (6.4)}$$

$$\beta_i = 2\pi\left(\frac{d_i}{\lambda}\right)n_i \quad \text{--- (6.5)}$$

$$r_{ij} = \frac{(n_i + ik_i) - (n_j + ik_j)}{(n_i + ik_i) + (n_j + ik_j)} \quad \text{--- (6.6)}$$

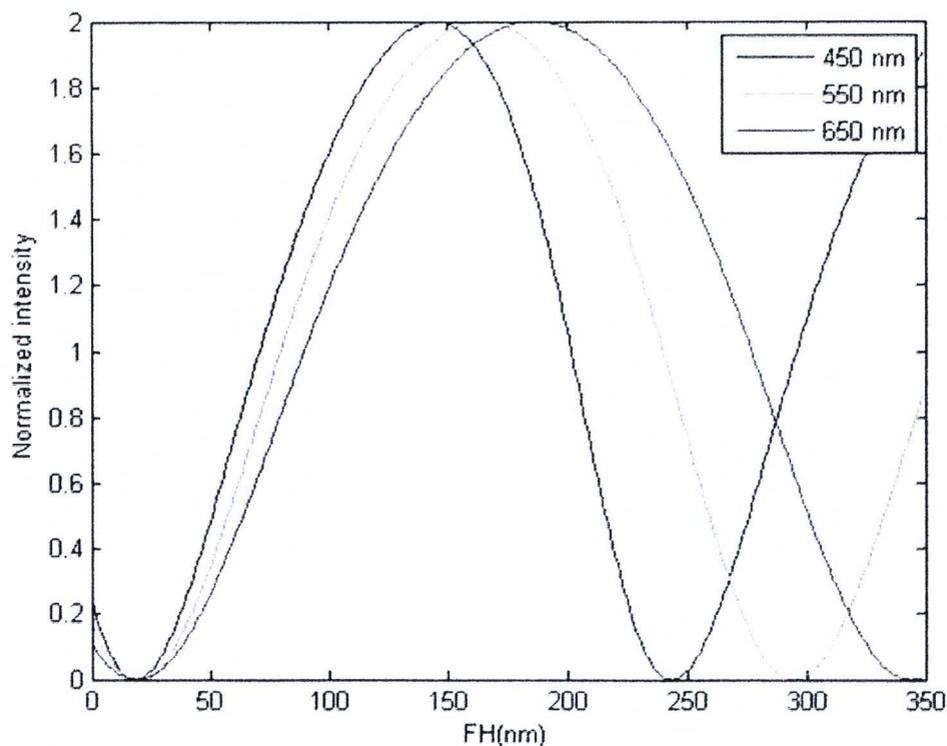
โดยที่ I_s คือแสงทั้งหมดที่สะท้อนกลับมาจากแบบจำลอง, I_0 คือแสงเริ่มต้นที่มาจากเครื่องวัด Flying height ส่วน n และ k คือ Refractive index และ Extinction coefficient และตัวห้อย i คือชั้นของตัวกลางแรกที่แสงเดินทางผ่านและตัวห้อย j คือชั้นของตัวกลางที่สะท้อนแสงกลับมา และ β_i คือเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแสงเดินทางผ่านความหนาของชั้นตัวกลาง i ซึ่งจากสมการที่ (6.2) ถึง (6.6) สามารถคำนวณหาอัตราส่วนความเข้มแสง (Intensity ratio) ได้ดังนี้

$$\frac{I_s}{I_0} = |R^2| \quad \text{--- (6.7)}$$

จากนั้นทำการ Normalize สมการที่ (6.7) ให้อยู่ในช่วงความเข้มแสงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2 จะได้ความเข้มแสงซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height ซึ่งแสดงตัวอย่างของการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 6.3 และ รูปที่ 6.5 จากนั้นจะนำผลการคำนวณนี้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดจริงซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1.3

ตารางที่ 6.3 ตัวอย่างของการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร

| Parameters | Wavelength 450nm |
|------------|---|
| r_{01} | $\frac{(1.54 + 0.02i) - (3.926 + 1.404i)}{(1.54 + 0.02i) + (3.926 + 1.404i)}$ |
| r_{12} | $\frac{(3.926 + 1.404i) - (2.211 + 0.1873i)}{(3.926 + 1.404i) + (2.211 + 0.1873i)}$ |
| r_{23} | $\frac{(2.211 + 0.1873i) - (1)}{(2.211 + 0.1873i) + (1)}$ |
| r_{34} | $\frac{(1) - (2.39 + 0.432i)}{(1) + (2.39 + 0.432i)}$ |
| β_1 | $2\pi \left(\frac{d_1}{450 \times 10^{-9}} \right) \times (3.926 + 1.404i)$ |
| β_2 | $2\pi \left(\frac{d_2}{450 \times 10^{-9}} \right) \times (2.211 + 0.1873i)$ |
| β_3 | $2\pi \left(\frac{d_3}{450 \times 10^{-9}} \right) \times (1)$ |



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ทั้ง 3 ความยาวคลื่นซึ่งคำนวณจากสมการที่ (6.7) ที่ Normalize ให้ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2

6.1.3 การทดสอบเก็บข้อมูลความเข้มแสงจากการวัด Flying height เพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

ในทางปฏิบัติค่าดรรชนีหักเหและความหนาของฟิล์มที่ปลูกอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งอาจทำให้ผลการคำนวณทางทฤษฎีนั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงดังนั้นจึงต้องทำการเก็บข้อมูลความเข้มของแสงที่วัดได้กระบวนกรวัด Flying height เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จากนั้นจะใช้ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดในการคำนวณดรรชนีหักเหของดิสก์ โดยจะเก็บค่าความเข้มแสงจาก ABS ของหัวอ่าน/เขียนจากนั้นจะทำการ Normalize ข้อมูลให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี แต่จากหลักการในการวัด Flying height ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2 ดิสก์ที่จะสามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องนั้นจำเป็นต้องทราบดรรชนีหักเหของดิสก์ก่อน ซึ่งในการทดสอบนี้ยังไม่มีดรรชนีหักเหที่ถูกต้องของดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจึงทำให้ไม่สามารถวัดค่า Flying height ที่ถูกต้องโดยใช้ดิสก์นี้ได้ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงมีสมมติฐานคือหัวอ่าน/เขียนนั้นบินบนจานแก้วและบนดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรด้วยความสูง (Flying height) ที่เท่ากัน ในการทดสอบนี้จะใช้ข้อมูลของ Flying height ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้บน ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ทดสอบด้วยจานแก้วและใช้ข้อมูลความเข้มแสงที่วัดจากตำแหน่งเดียวกันบน ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ทดสอบด้วยดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร โดยที่ในการทดสอบนี้มีเครื่องมือ, อุปกรณ์, ขั้นตอนการทดสอบ และ ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

เครื่องวัด

1. เครื่องวัด Flying height tester (DFHT5, KLA-tencor)

อุปกรณ์

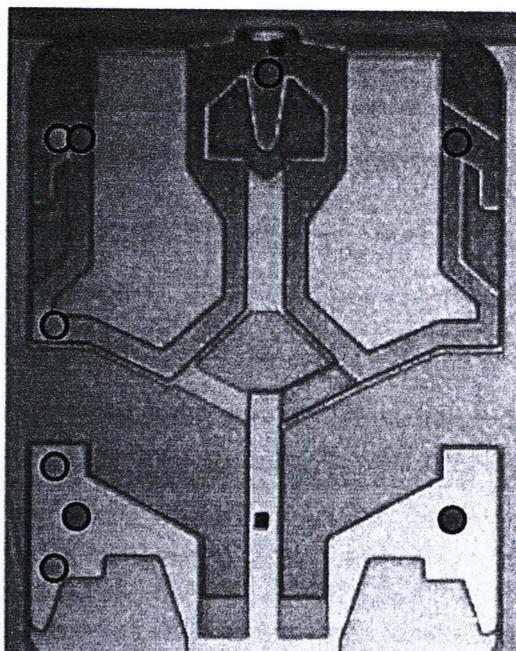
1. ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร
2. จานแก้วปกติ (Glass disk)
3. หัวอ่านเขียนที่บินด้วยความสูง 10 ถึง 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ

โดยปกติขั้นตอนในการวัด Flying height นั้นจะเริ่มจากการทำ Calibration ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้บน ABS และสร้าง Theory curve (เส้นโค้งความเข้มแสงซึ่งเป็นฟังก์ชัน

ของ Flying height ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี) จากค่าตรวจนี้หักเหของดิสก์ จากนั้นจึงทำการวัดความเข้มแสงตามตำแหน่งที่กำหนดไว้บน ABS เช่นเดียวกันเพื่อไปเปรียบเทียบกับ Theory curve ที่สร้างขึ้นและตีความหมายเป็น Flying height โดยที่ปกติในกระบวนการวัด Flying height ของบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล นั้นจะวัด Flying height บน ABS ของหัวอ่าน/เขียนทั้งหมด 5 ตำแหน่งแล้วทำการคำนวณออกมาเป็นค่า Flying height ลัพธ์ของหัวอ่าน/เขียนแต่ในการทดสอบนี้จะทำการวัด Flying height ตามตำแหน่งบน ABS โดยกำหนดชื่อจุดที่ทำการวัดเป็น TAE_1, TAE_2, TAE_3 และ TAE_4 ใต้อะแกรมของตำแหน่งที่วัดของกระบวนการวัดปกติเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่จะใช้ทำการวัดในการทดสอบนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 6.6 โดยที่การทดสอบจะมีขั้นตอนดังนี้

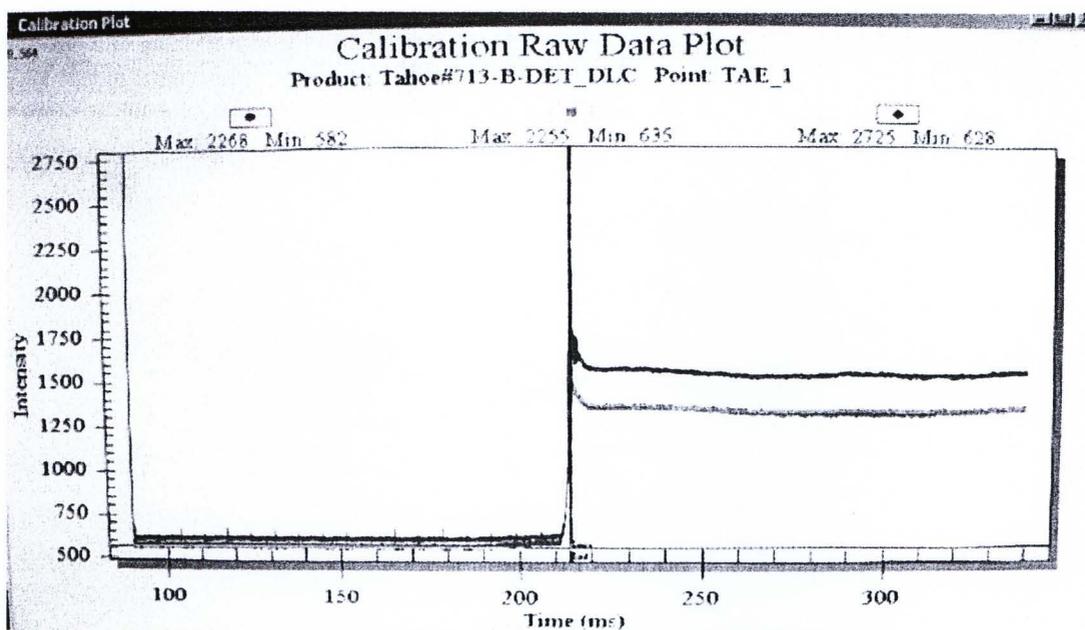
1. วัด Flying height บนจานแก้วและเก็บข้อมูล Flying height ตามตำแหน่งที่กำหนดบน ABS ของหัวอ่าน/เขียนดังที่ระบุไว้ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งผลของการวัดแสดงไว้ดังรูปที่ 6.7 (สามารถทำให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตรโดยการคูณด้วย 25.4)
2. จากนั้นทำการทดสอบบนดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรและเก็บข้อมูล Flying height และความเข้มแสงของแต่ละตำแหน่งที่กำหนดบน ABS ของหัวอ่าน/เขียนดังที่ระบุไว้ดังรูปที่ 6.6 โดยที่ความเข้มแสงที่มากที่สุดและน้อยที่สุด (Max & Min intensity) ของแต่ละตำแหน่งจะได้รับการ Calibration ที่ตำแหน่งนั้นๆดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.8 ส่วนความเข้มแสงที่อ่านได้จากตำแหน่งต่างๆของหัวอ่าน/เขียนขณะทำการบินจะได้รับการเก็บข้อมูลความเข้มแสงที่ตำแหน่งนั้นๆ (Measure intensity) ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 6.9 (ซึ่งในส่วนของจานแก้วก็จะทำขั้นตอนนี้เพื่อเก็บข้อมูลความเข้มแสงเช่นเดียวกัน)
3. ทำการ Normalize ข้อมูลความเข้มแสงให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 โดยใช้สมการ
$$\frac{(Measure - Min)}{(Max - Min)} \times 2$$
 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี



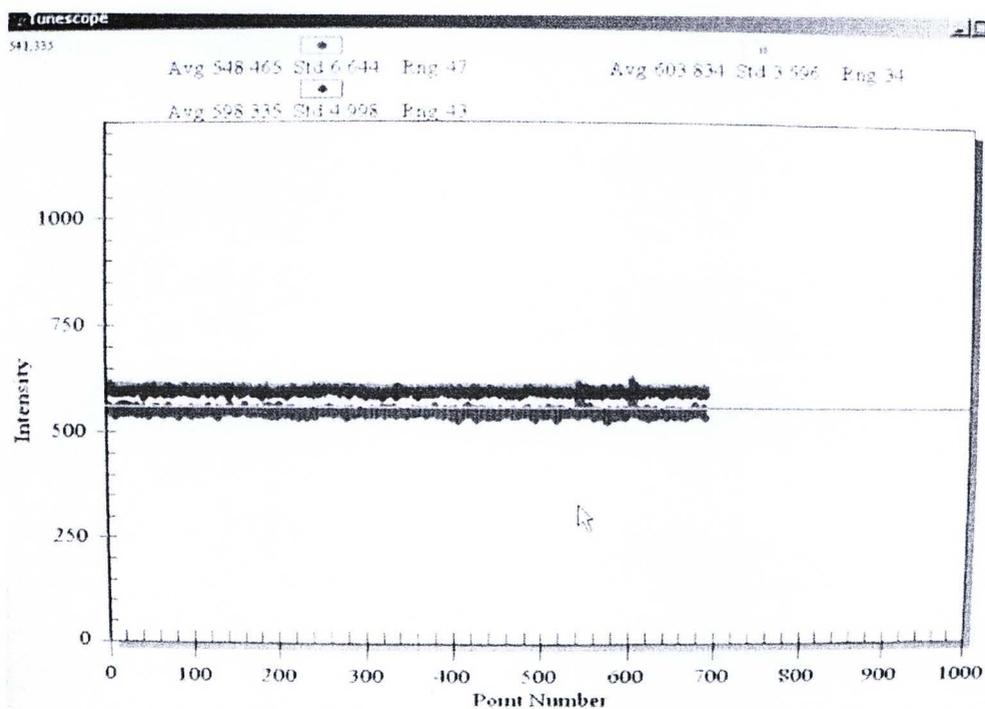
รูปที่ 6.6 ตำแหน่งที่ทำการวัด Flying height บน ABS โดยที่กระบวนการวัดปกติแสดงด้วยจุดสีแดง ส่วนตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบนี้แสดงด้วยจุดสีน้ำเงิน (จากบนไปล่าง TAE_1, TAE_2, TAE_3 และ TAE_4)

| Point | FH |
|-------|--------|
| TAE_1 | 0.7791 |
| TAE_2 | 1.7165 |
| TAE_3 | 2.4406 |
| TAE_4 | 3.2274 |

รูปที่ 6.7 ผลการวัด Flying height บนจานแก้ว (ไมโครนีว) โดยใช้ค่าดรรชนีหักเหของจานแก้ว



รูปที่ 6.8 ค่าความเข้มแสง Max และ Min ที่ได้จากการ Calibration ของตำแหน่ง TAE_1 โดยใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร



รูปที่ 6.9 ค่าความเข้มแสงที่อ่านได้ที่ตำแหน่ง TAE_1 โดยใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร

ผลการทดสอบ

ผลการวัด Flying height และความเข้มแสงของงานแก้วแสดงไว้ดังตารางที่ 6.4 และ ตารางที่ 6.5 ส่วนผลการวัด Flying height บนงานแก้วและค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดด้วย ดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรแสดงไว้ดังตารางที่ 6.6 และข้อมูลความเข้มแสงที่ Normalize แล้ว (Normalized intensity) แสดงไว้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.4 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากงานแก้ว

| Point | FH in micro inch | FH in nm | Wavelength 450 nm | | | Wavelength 550 nm | | | Wavelength 650 nm | | |
|-------|------------------|----------|-------------------|------|---------|-------------------|------|---------|-------------------|------|---------|
| | | | Min | Max | Measure | Min | Max | Measure | Min | Max | Measure |
| TAE_1 | 0.779 | 19.79 | 742 | 2406 | 1028.6 | 736 | 2250 | 926.15 | 727 | 2639 | 907.84 |
| TAE_2 | 1.717 | 43.6 | 721 | 2313 | 1516 | 717 | 2174 | 1268 | 689 | 2542 | 1250.88 |
| TAE_3 | 2.441 | 61.99 | 733 | 2414 | 1942.85 | 724 | 2261 | 1612.23 | 710 | 2643 | 1625.13 |
| TAE_4 | 3.227 | 81.98 | 718 | 2403 | 1910.34 | 717 | 2257 | 1910.34 | 699 | 2640 | 1984.02 |

ตารางที่ 6.5 ค่าความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของงานแก้ว

| Point | Wavelength 450 nm | Wavelength 550 nm | Wavelength 650 nm |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TAE_1 | 0.34 | 0.25 | 0.19 |
| TAE_2 | 1 | 0.76 | 0.61 |
| TAE_3 | 1.44 | 1.16 | 0.95 |
| TAE_4 | 1.81 | 1.55 | 1.32 |

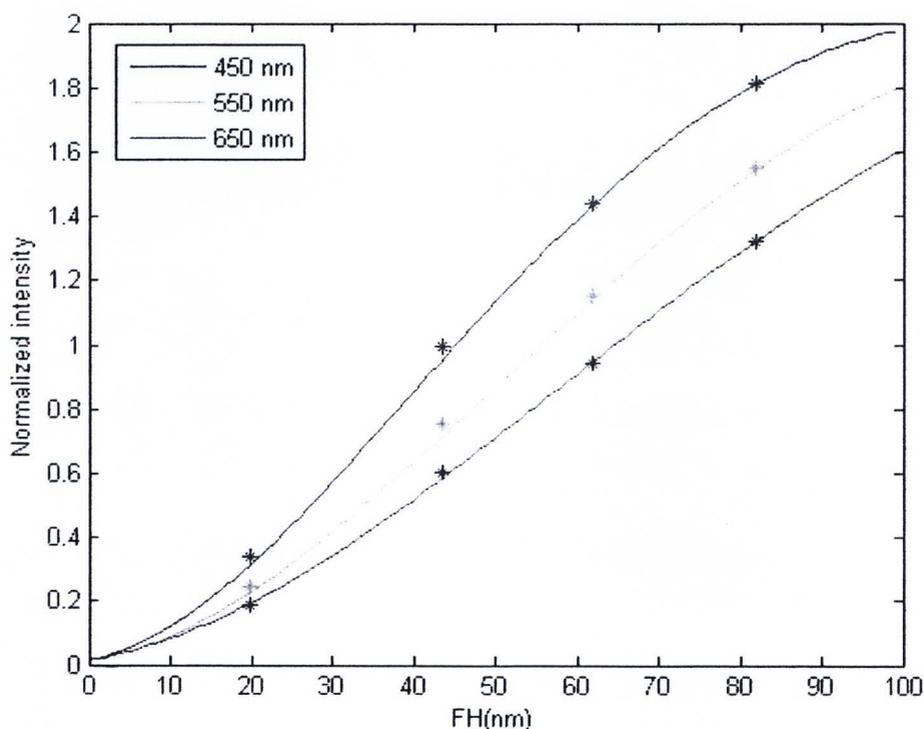
ตารางที่ 6.6 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากงานแก้ว)

| Point | FH in micro inch | FH in nm | Wavelength 450 nm | | | Wavelength 550 nm | | | Wavelength 650 nm | | |
|-------|------------------|----------|-------------------|------|---------|-------------------|------|---------|-------------------|------|---------|
| | | | Min | Max | Measure | Min | Max | Measure | Min | Max | Measure |
| TAE_1 | 0.779 | 19.79 | 582 | 2268 | 548.47 | 635 | 2255 | 603.83 | 628 | 2725 | 598.34 |
| TAE_2 | 1.717 | 43.6 | 576 | 2188 | 873.25 | 616 | 2186 | 834.36 | 599 | 2637 | 830.24 |
| TAE_3 | 2.441 | 61.99 | 555 | 2265 | 1300.22 | 615 | 2259 | 1171.06 | 610 | 2728 | 1181.99 |
| TAE_4 | 3.227 | 81.98 | 516 | 2264 | 1708.53 | 604 | 2255 | 1533.64 | 592 | 2735 | 1594.64 |

ตารางที่ 6.7 ค่าความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร

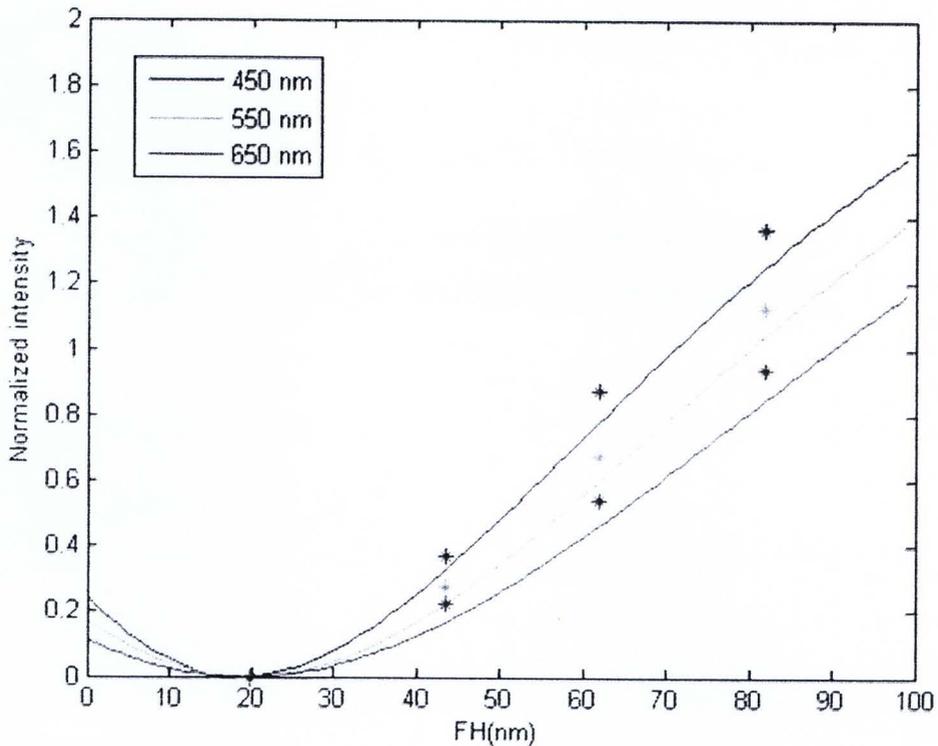
| Point | Wavelength 450 nm | Wavelength 550 nm | Wavelength 650 nm |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| TAE_1 | $-0.04 \cong 0$ | $-0.04 \cong 0$ | $-0.03 \cong 0$ |
| TAE_2 | 0.37 | 0.28 | 0.23 |
| TAE_3 | 0.87 | 0.68 | 0.54 |
| TAE_4 | 1.36 | 1.13 | 0.94 |

ซึ่งจากข้อมูลของ Flying height และความเข้มแสงที่ได้จากการวัดบนจานแก้วที่ Normalize แล้ว (ตารางที่ 6.4 และ ตารางที่ 6.5) ทำให้สามารถนำมาพลอตเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีจากหัวข้อ 6.1.2 ได้ดังรูปที่ 6.10 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าข้อมูลของความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องวัด Flying height นั้นใช้ทฤษฎีในการคำนวณตามหัวข้อที่ 6.1.2 และใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณมีความถูกต้องแล้ว



รูปที่ 6.10 เส้นโค้งความเข้มแสงของจานแก้วจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดัชนีหักเหของจานแก้วเปรียบเทียบกับค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัด

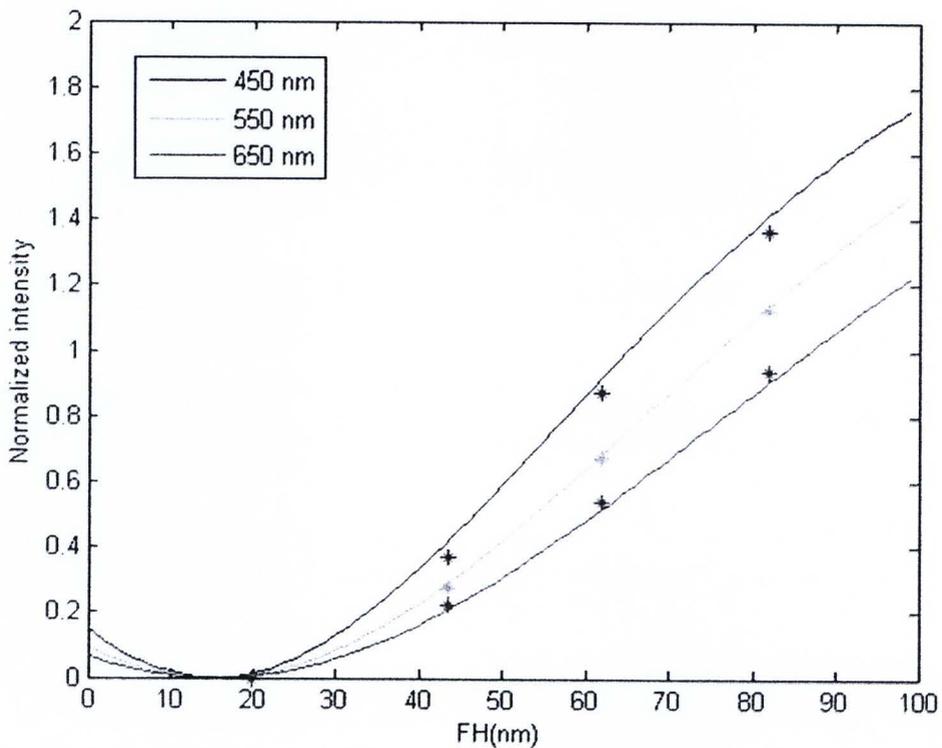
ในส่วนของดิสก์ที่สร้างก็จะทำในลักษณะเดียวกันโดยจะใช้ข้อมูล Flying height ที่วัดได้จากงานแก้วและข้อมูลความเข้มแสงที่วัดจากดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ Normalize แล้ว (ตารางที่ 6.6 และ ตารางที่ 6.7) ทำให้สามารถนำมาพลอตเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีจากหัวข้อ 6.1.2 ได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.11 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและผลจากการคำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎีของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร

ซึ่งสาเหตุของความแตกต่างกันระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและผลการคำนวณทางทฤษฎีอาจเกิดได้จาก ค่าดรรชนีหักเหของซิลิกอน และ DLC ที่ได้จากการวัดด้วย Ellipsometry อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง และความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC ของดิสก์อาจคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ใช้ในการคำนวณ ด้วยสาเหตุที่กล่าวมานี้จะทำให้ผลจากการวัดคลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณ ดังนั้นจึงใช้การปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่ใช้ในการคำนวณ (เนื่องจากความหนาจะมีผลต่อลักษณะของเส้นโค้งความเข้มแสงมากกว่าดรรชนีหักเห) จนกระทั่งได้ความหนาของฟิล์มที่ทำให้ข้อมูลของความเข้มแสงที่มาจาก การวัดและผลจากการคำนวณนั้นมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งผลการคำนวณที่

ได้จากการปรับเปลี่ยนความหนาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดแสงไว้ดังรูปที่ 6.12 โดยจะเห็นว่าการปรับความหนาของซิลิกอนและ DLC นั้นสามารถทำให้ข้อมูลทั้ง 2 มีความสอดคล้องกันดีทำให้เชื่อได้ว่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวน่าจะเกิดจากค่าความเคลื่อนของความหนาซึ่งเป็นไปตามที่สันนิษฐานไว้ โดยความหนาของฟิล์มที่ทำให้ข้อมูลทั้ง 2 ใกล้เคียงกันมากที่สุดคือซิลิกอนหนา 0.65 นาโนเมตรและ DLC 11.3 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาของซิลิกอนและ DLC นั้นมีความแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ซึ่งก็อาจเป็นไปได้เนื่องจากว่าฟิล์มที่ทำการปลูกนั้นมีความบางมาก ซึ่งการควบคุมให้ได้ความหนาตามที่ต้องการนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนของความหนาได้



รูปที่ 6.12 ผลการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งดีส์กที่มีความหนาซิลิกอน 0.65 นาโนเมตรและ DLC 11.3 นาโนเมตรให้ผลการ Fitting ที่ดีที่สุด

6.1.4 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 6.1.3 พบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งอาจเกิดได้จากความคลาดเคลื่อนทั้งในส่วนของความหนาของฟิล์มที่ปลูกได้ และในส่วนของการหักเหของฟิล์มที่วัดได้จาก Ellipsometer ซึ่งมี MSE ที่ไม่ต่ำนัก

จากการตรวจสอบการคำนวณค่าทางทฤษฎีในกรณีของจานแก้ว ดังรูปที่ 6.10 นั้นพบว่าค่าทางทฤษฎีกับค่าที่วัดได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดีทำให้สามารถสรุปได้ว่าในเครื่อง flying height tester นั้นใช้วิธีการคำนวณเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้การคำนวณทางทฤษฎีในการคาดการณ์และประยุกต์ใช้เพื่อการคำนวณในส่วนต่อๆไปได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้งานจริงนั้นต้องการความแม่นยำในการวัด Flying height เป็นอย่างมาก ซึ่งการใช้การคำนวณทางทฤษฎีเพื่อหาธรรมชาติหักเหของดิสก์นั้นจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นประมาณ 5 นาโนเมตรเมื่อนำไปใช้ในการวัด Flying height ดังรูปที่ 6.11 (จากรูปจะเห็นว่ามีความแตกต่างของ Flying height ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ประมาณ 5 นาโนเมตร) ดังนั้นในการใช้งานจริงนั้นจะหาธรรมชาติหักเหจากข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด

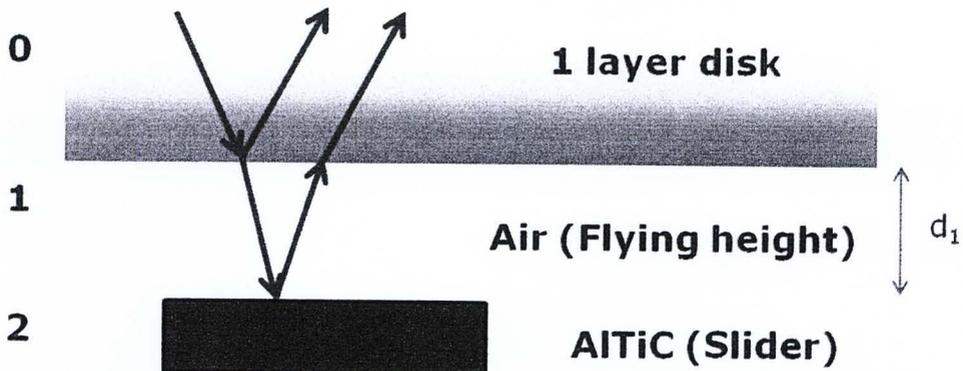
6.2 การหาค่าธรรมชาติหักเหของดิสก์ที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากในเครื่องวัด Flying height นั้นสามารถใส่ค่าธรรมชาติหักเหได้เพียงค่าเดียว ดังนั้นธรรมชาติหักเหที่ใช้ในนั้นต้องสามารถแสดงคุณสมบัติทางแสงโดยรวมของดิสก์ได้ (ธรรมชาติหักเหของดิสก์) ซึ่ง Theory curve ที่สร้างขึ้นในเครื่องวัด Flying height นั้นจะคำนวณจากธรรมชาติหักเหที่ใส่เข้าไปเท่านั้น ซึ่งในการวัด Flying height ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณ (Theory curve) นั้นจะส่งผลให้การวัด Flying height ผิดพลาดได้ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานของดิสก์ที่สร้างขึ้นในเครื่องวัด Flying height ให้สามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องแม่นยำนั้น ต้องคำนวณธรรมชาติหักเหอย่างถูกต้องจึงจะสามารถสร้าง Theory curve ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกใช้วิธีคำนวณธรรมชาติหักเหจากการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด โดยที่มีขั้นตอนคือ เก็บข้อมูลความเข้มแสงจากเครื่องวัด Flying height จากนั้นทำการ Fitting ข้อมูลดังกล่าวด้วยการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปลี่ยนแปลงธรรมชาติหักเหของดิสก์ โดยที่ค่าธรรมชาติหักเหของดิสก์ที่ให้ผลการ Fitting ดีที่สุดจะถูกเลือกเพื่อนำไปทดสอบวัด Flying height เปรียบเทียบกับจานแก้ว

6.2.1 อัลกอริทึมของเครื่องวัด Flying height

จากหลักการในการวัด Flying height ของเครื่องวัด Flying height ชนิด Three wavelength interferometry ซึ่งจะทำการวัดค่าความเข้มแสงและแปลงเป็นค่า Flying height ด้วยการเปรียบเทียบกับ Theory curve โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน 3 ความยาว

คลื่น ซึ่งมีหลักการในการวัดดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2 และเนื่องจากเครื่องวัด Flying height นั้นยอมให้ใส่ค่าดรรชนีหักเหของดิสก์เพียงค่าเดียวเท่านั้น โดยไม่สามารถใส่ค่าดรรชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นตัวกลางได้เสมือนพิจารณาว่าดิสก์นั้นมีชั้นเดียว ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองในการคำนวณที่เครื่องวัด Flying height ใช้ในการสร้าง Theory curve ได้ดังรูปที่ 6.13 ซึ่งหมายความว่า Theory curve ของเครื่องวัด Flying height นั้นจะคำนวณจากค่าดรรชนีหักเหของดิสก์ที่ใส่เข้าไปเท่านั้น แต่จากแบบจำลองในการคำนวณ Flying height ทางทฤษฎีของดิสก์ที่มีซิลิกอนและ DLC ดังรูปที่ 6.1 จะเห็นว่าความเข้มแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากแบบจำลองในการคำนวณหรือ Theory curve นั้นจะขึ้นอยู่กับดรรชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นตัวกลางของดิสก์ (รวมถึงระยะ Flying height และดรรชนีหักเหของอากาศและหัวอ่าน/เขียน) ดังนั้นดรรชนีหักเหของดิสก์ที่ใช้ในเครื่องวัด Flying height นั้นต้องเป็นดรรชนีหักเหผลลัพธ์ที่สามารถแสดงถึงคุณสมบัติทางแสงโดยรวมของดิสก์ที่สร้างขึ้นได้



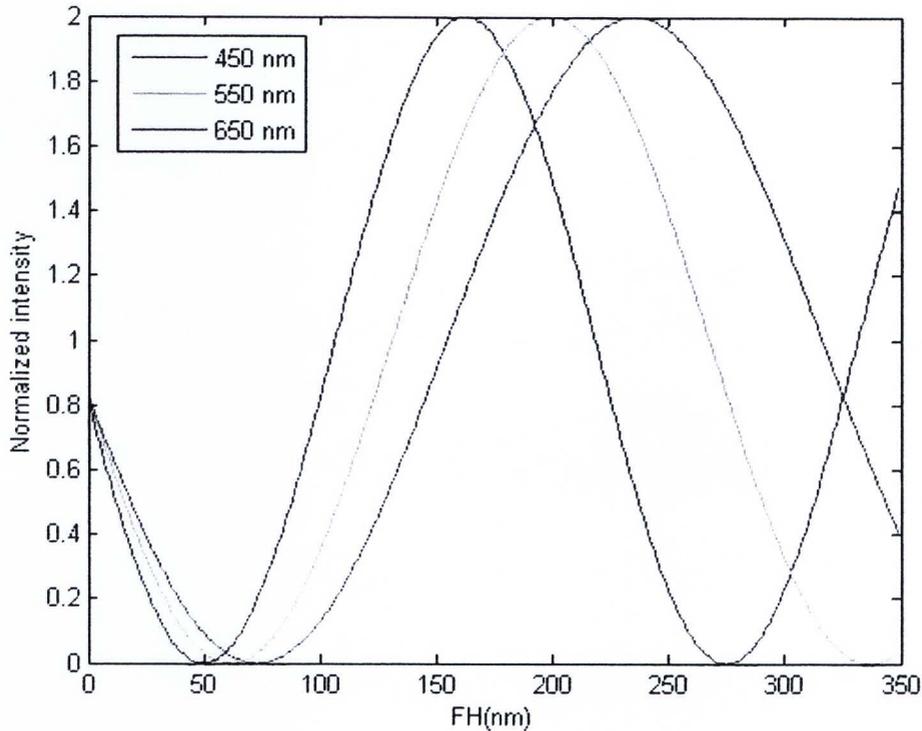
รูปที่ 6.13 แบบจำลองในการคำนวณที่เครื่องวัด Flying height ใช้ในการสร้าง Theory curve ซึ่งจะพิจารณาดิสก์เสมือนมีชั้นเดียว

จากแบบจำลองในรูปที่ 6.13 สามารถคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากดิสก์ (Theory curve) ได้จากสมการที่ (6.8) ซึ่งมีสมการที่เกี่ยวข้องคือสมการที่ (6.5), (6.6) และ (6.7) ส่วนค่าดรรชนีหักเหของชั้นตัวกลางและพารามิเตอร์แสดงไว้ดังตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2

$$I_c = I_0 \left[\frac{r_{01} + r_{12} e^{2i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{2i\beta_1}} \right] \quad \text{--- (6.8)}$$

$$\frac{I_c}{I_0} = |R^2| \quad \text{--- (6.9)}$$

จากนั้นทำการ Normalize สมการที่ (6.9) ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ซึ่งตัวอย่างของผลการคำนวณ แสดงไว้ดังรูปที่ 6.14 โดยที่สมมติค่าของดรรชนีหักเหล์พ์ของดิสก์เป็น $1+0.01i$ ทั้ง 3 ความยาวคลื่นที่สนใจ

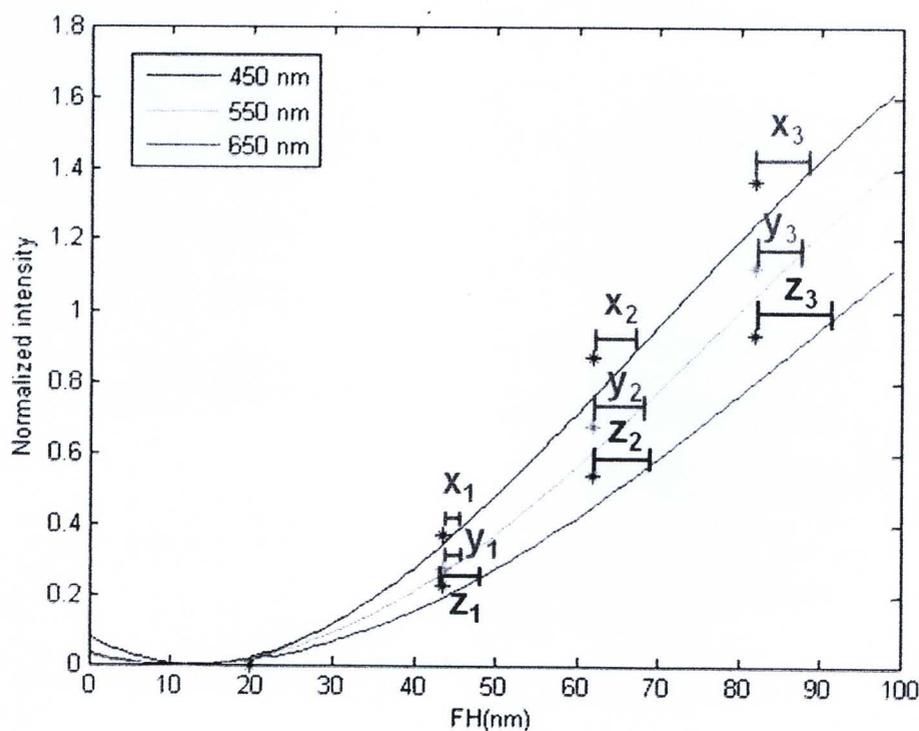


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ที่คำนวณจากสมการที่ (6.9) ซึ่งกำหนดให้ค่าดรรชนีหักเหล์พ์ของทั้ง 3 ความยาวคลื่นเป็น $1+0.01i$

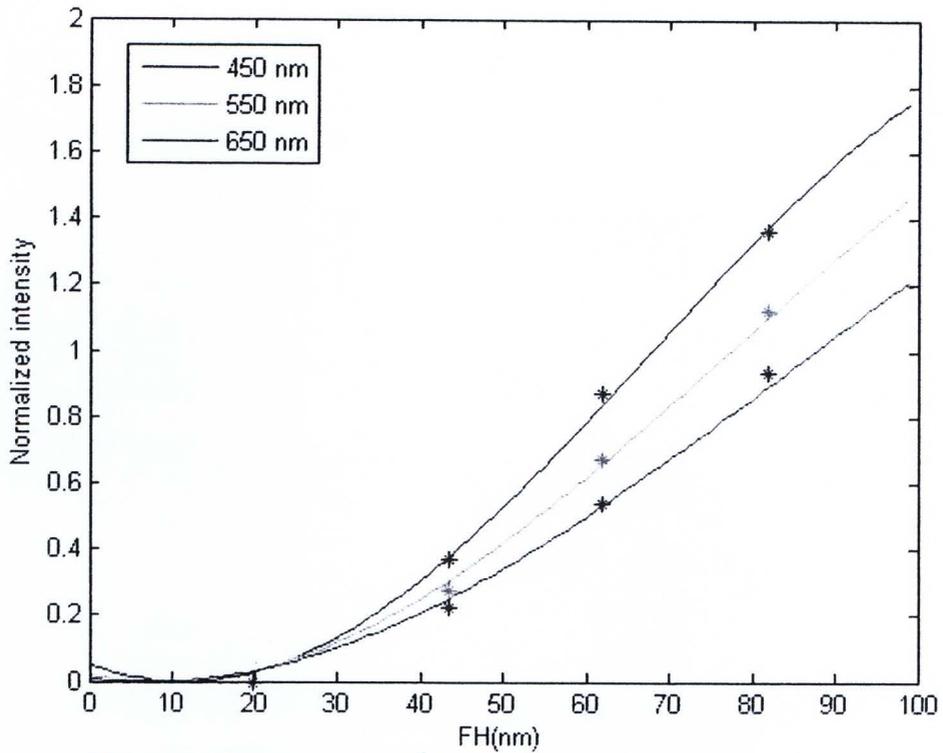
6.2.2 การคำนวณดรรชนีหักเหล์พ์จากข้อมูลที่ได้จากการวัด

วิธีที่จะใช้ในการคำนวณดรรชนีหักเหล์พ์ของดิสก์เพื่อนำไปใช้ในเครื่องวัด Flying height จะใช้ค่าดรรชนีหักเหของดิสก์ชั้นเดียวที่ทำให้ความเข้มของแสงสะท้อนใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มแสงที่มาจาการวัดในหัวข้อที่ 6.1.3 มากที่สุด (ตารางที่ 6.6 และตารางที่ 6.7) โดยที่ขั้นตอนคำนวณดรรชนีหักเหล์พ์จะใช้วิธีการ Fitting โดยเริ่มจากการคำนวณความเข้มแสงของดิสก์ที่พิจารณาเป็นชั้นเดียวซึ่งมีแบบจำลองในการคำนวณดังรูปที่ 6.13 ซึ่งสามารถใช้สมการที่ (6.8) และ (6.9) ในการคำนวณความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับมา จากนั้นจะเปลี่ยนแปลงค่าดรรชนีหักเหของดิสก์ทั้งค่า n และ k ไปจนกระทั่งได้ค่าดรรชนีหักเหที่ทำให้ผลการคำนวณ (Theory curve) ใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดมากที่สุดจะพิจารณาเป็นค่าดรรชนีหักเหล์พ์ของดิสก์

จากข้อมูลของความเข้มแสงในตารางที่ 6.7 จะเห็นว่าค่าความเข้มแสงที่ตำแหน่ง TAE_1 นั้นเป็นค่าลบซึ่งหมายถึงเกิด Error ขึ้นในกระบวนการวัดเพราะว่าโดยธรรมชาติของดิสก์นี้แล้วค่าความเข้มแสงที่ Flying height ประมาณ 20 นาโนเมตรนั้นจะใกล้เคียงกับ 0 มาก ซึ่งทำให้ไม่สามารถวัด Flying height บริเวณนี้ได้ ดังนั้นในการคำนวณจึงเลือกใช้ข้อมูลตั้งแต่ตำแหน่ง TAE_2 ถึง TAE_4 และจากเงื่อนไขที่กำหนด จึงทำการสร้างโปรแกรมเพื่อ Fitting โดยใช้ Matlab โดยที่กำหนดเงื่อนไขคือค่าดรรชนีหักเหที่ทำให้ผลรวมความคลาดเคลื่อนของ Flying height ของข้อมูลที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและข้อมูลที่มาจากการคำนวณ ดังที่แสดงตัวอย่างของเงื่อนไขไว้ในรูปที่ 6.15 ซึ่งค่าดรรชนีหักเหที่ทำให้ผลรวมของ $\sum_{i=1}^3 (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)$ น้อยที่สุดจะพิจารณาเป็นคำตอบ โดยที่ x_i , y_i และ z_i คือผลต่างของ Flying height ที่ความเข้มแสงเดียวกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณของความยาวคลื่น 450, 550 และ 650 นาโนเมตรและตัวห้อย i คือตำแหน่งที่ทำการวัด ซึ่งในที่นี้จะใช้ 3 ตำแหน่งคือ TAE_2 ถึง TAE_4 โดยผลของการ Fitting แสดงไว้ดังรูปที่ 6.16 และค่าดรรชนีหักเหผลลัพธ์ที่ให้การ Fitting ดีที่สุดแสดงไว้ดังตารางที่ 6.8 โดยที่สามารถดูรายละเอียดของโปรแกรมได้ที่ภาคผนวก ข.1



รูปที่ 6.15 ตัวอย่างค่าความแตกต่างของค่า Flying height ที่ความเข้มแสงเดียวกันที่จะใช้เป็นเงื่อนไขในการ Fitting



รูปที่ 6.16 เส้นโค้งความเข้มแสงของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหล์พ์ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.8 ที่ได้จากการ Fitting ด้วยข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 6.8 ค่าดรรชนีหักเหล์พ์ที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด

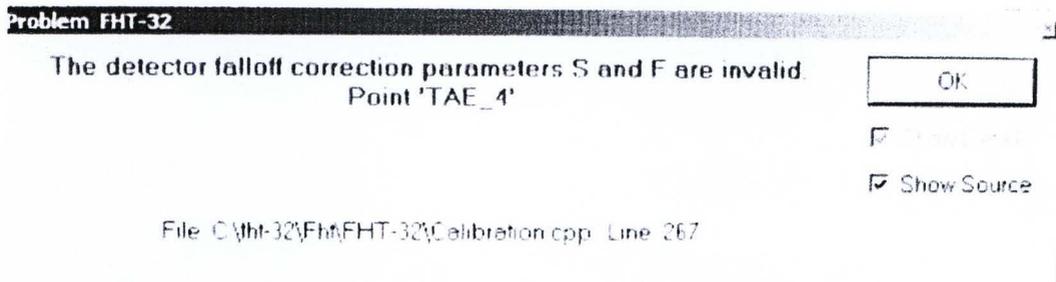
| Wavelength (nm) | Refractive index (n+ki) |
|-----------------|-------------------------|
| 450 | 1.05+0.02i |
| 550 | 1.07+0.02i |
| 650 | 1.12+0.03i |

6.2.3 ข้อจำกัดของค่าดรรชนีหักเหล์พ์ในเครื่อง Flying height tester

จากการทดสอบวัด Flying height ด้วยดรรชนีหักเหล์พ์นั้นพบว่าข้อจำกัดของดรรชนีหักเหล์พ์ที่สามารถใช้กับเครื่องวัด Flying height tester ได้ ซึ่งพบทั้งข้อจำกัดในส่วนของ n และข้อจำกัดในส่วนของ k ซึ่งจะส่งผลต่อการวัด Flying height แตกต่างกันออกไปดังนี้

ข้อจำกัดของ n

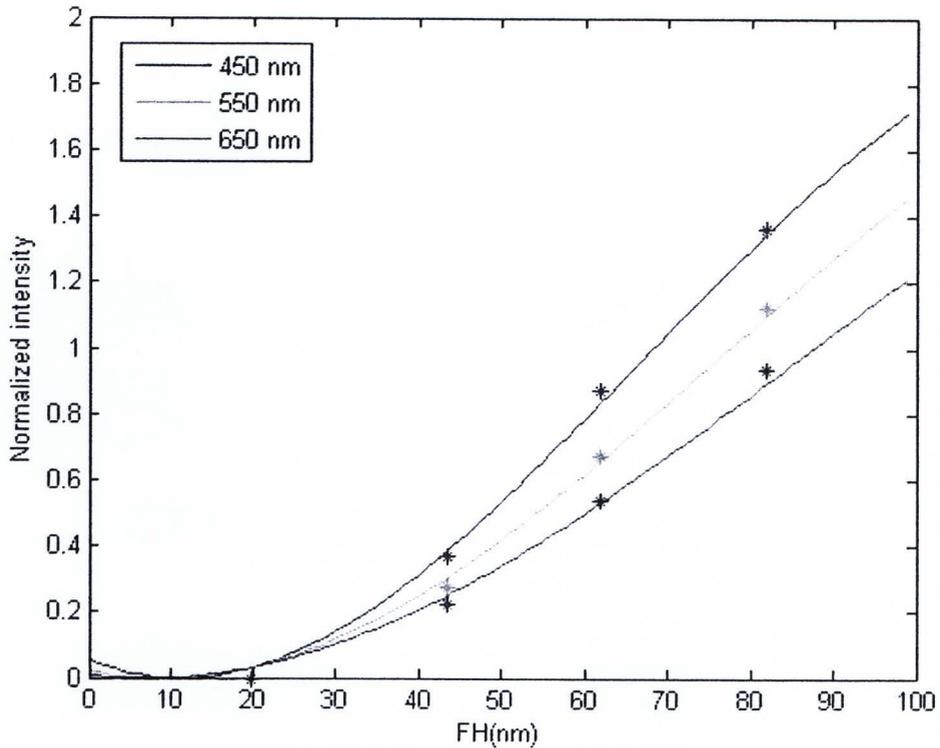
จากการทดสอบวัด Flying height โดยใช้ดรรชนีหักเหที่แสดงในตารางที่ 6.8 พบว่าจะเกิด Error ในขั้นตอนของการ Calibration ในทุกจุดโดยเครื่องจะฟ้องว่า “The Detector falloff correction parameter S and F are in valid at point 'X' ” ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 6.17 โดยที่ X คือชื่อของตำแหน่งที่ทำการ calibration ซึ่งจากการเกิด Error ในขั้นตอนของการ Calibration ทำให้ไม่สามารถดำเนินการวัด Flying height ต่อได้ซึ่งในเบื้องต้นทางผู้วิจัยก็ไม่สามารถหาข้อมูลของ Error ที่แสดงนี้ได้ว่ามาจากสาเหตุอะไร จึงสันนิษฐานว่าน่าจะมาจากค่าดรรชนีหักเหที่ใส่เข้าไป จึงลองทำการปรับค่าดรรชนีหักเหที่ใส่เข้าไปก็พบว่าเครื่องจะไม่แสดง Error ในขั้นตอนของการ Calibration เมื่อค่า n ของทุกจุดดรรชนีหักเหที่ใส่เข้ามามีค่ามากกว่า 1.1



รูปที่ 6.17 ข้อความแสดง Error ขณะที่ทำการ Calibration ที่ตำแหน่ง TAE_4

ข้อจำกัดของ k

จากข้อจำกัดของ n จึงทำการ Fitting โดยใช้หลักการเดิม (หัวข้อที่ 6.2.2) แต่กำหนดให้ค่า n นั้นต้องมากกว่า 1.1 ซึ่งผลของการ Fitting แสดงไว้ดังรูปที่ 6.18 และดรรชนีหักเหที่ให้การ Fitting ดีที่สุดแสดงไว้ดังตารางที่ 6.9



รูปที่ 6.18 เส้นโค้งความเข้มแสงของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 ที่ได้จากการ Fitting ด้วยข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด โดยกำหนดให้ค่า n ของดรรชนีหักเหมากกว่า 1.1 เป็นต้นไป

ตารางที่ 6.9 ค่าดรรชนีหักเหที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด (กำหนดให้ค่า n ของดรรชนีหักเหมากกว่า 1.1 เป็นต้นไป)

| Wavelength (nm) | Refractive index ($n+ki$) |
|-----------------|-----------------------------|
| 450 | 1.19+0.09i |
| 550 | 1.1+0.03i |
| 650 | 1.12+0.03i |

จากนั้นนำค่าดรรชนีหักเหที่แสดงไว้ดังตารางที่ 6.9 ไปทดสอบในการวัด Flying height โดยพบว่าที่ค่าดรรชนีหักเหนี้เครื่องสามารถทำการ Calibration ได้และสามารถเข้าสู่กระบวนการวัด Flying height ได้โดยที่ผลของการวัด Flying height เปรียบเทียบกับจานแก้วแสดงไว้ดังรูปที่ 6.19 และตารางที่ 6.10

| Point | FH | Point | FH |
|-------|--------|-------|--------|
| TAE_1 | 0.7791 | TAE_2 | 0.9528 |
| TAE_2 | 1.7185 | TAE_3 | 1.7571 |
| TAE_3 | 2.4406 | TAE_4 | 2.5339 |
| TAE_4 | 3.2274 | | |

รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบระหว่างค่า Flying height (ไมโครนิ้ว) ที่วัดได้บนงานแก้วกับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหหลักในตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบค่า Flying height ที่วัดได้บนงานแก้วกับที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร ที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหหลักที่ Fitting จากข้อมูลการวัด โดยกำหนดให้ค่า n มากกว่า 1.1

| Point | FH บนงานแก้ว (nm) | FH บนดิสก์ที่พัฒนาขึ้น (nm) | Δ FH (nm) |
|-------|----------------------|--------------------------------|---------------------|
| TAE_2 | 43.6 | 24.2 | 19.4 |
| TAE_3 | 61.99 | 44.63 | 17.36 |
| TAE_4 | 81.98 | 64.36 | 17.61 |

ซึ่งจากผลการวัดพบว่าค่า Flying height ของดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหหลักที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 นั้นยังคงคลาดเคลื่อนจากค่า Flying height ที่วัดได้จากงานแก้วพอสมควร (ประมาณ 17 ถึง 19 นาโนเมตร) จึงตั้งสมมติฐานว่าอัลกอริทึม (ทางผู้ผลิตไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลของอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ Flying height ของเครื่องวัดได้) ที่ใช้ในการคำนวณ Flying height ของเครื่องวัดนั้น อาจสร้างมาเพื่อให้ใช้งานแก้วในการวัดเท่านั้น และอาจไม่นำค่า k ของดรรชนีหักเหหลักไปใช้ในการคำนวณ ซึ่งค่า k นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เฟสของเส้นโค้งความเข้มแสงเปลี่ยนไป (Phase shift) ซึ่งจะทำให้ลักษณะของเส้นโค้งความเข้มแสงนั้นแตกต่างไปจากงานแก้ว

ซึ่งจากเอกสารอ้างอิง [43] พบว่าอัลกอริทึมในเครื่องวัด Flying height ไม่ใช้ค่า k ในการคำนวณ Theory curve จึงทำการทดสอบสมมติฐานเรื่องการที่เครื่องวัด Flying height ไม่นำค่า k ไปใช้ในการคำนวณ Theory curve ซึ่งทำโดยทดสอบวัด Flying height โดยใช้งานแก้ว

ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า k ของดรรรชนีหักเหของจานแก้วทุกความยาวคลื่นไปตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.4 โดยจะทดสอบด้วยหัวอ่าน/เขียนตัวเดียวกัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่า Flying height ของจานแก้วที่เปลี่ยนแปลงค่า k ของทุกความยาวคลื่นจาก 0.1 ถึง 0.4 นั้นมีค่าไม่แตกต่างกับการวัด Flying height ที่ใช้ค่าดรรรชนีหักเหตามปกติของจานแก้ว (ค่า k 0.02) ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณ Theory curve ของเครื่องวัด Flying height นั้นจะไม่พิจารณาค่า k ของดรรรชนีหักเหของดิสก์ และจะทำให้ Theory curve ที่ได้จากการคำนวณนั้น มีลักษณะใกล้เคียงกับ Theory curve ของจานแก้ว ซึ่งจะทำให้ Theory curve นั้นมีความแตกต่างจากข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด

สรุปข้อจำกัดของดรรรชนีหักเห

จากผลการทดสอบทั้งในส่วนของข้อจำกัดของ n และ k ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่าดรรรชนีหักเหที่ที่สามารถนำไปใช้ในการวัด Flying height ได้นั้นควรมีค่า n มากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k เนื่องจากอัลกอริทึมของเครื่องวัด Flying height นั้นไม่พิจารณาค่า k ในการคำนวณ Theory curve

6.2.4 การหาค่าดรรรชนีหักเหจากข้อมูลที่ได้จากการวัด

ในการหาค่าดรรรชนีหักเหของดิสก์ที่พัฒนาขึ้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้วัด Flying height ได้ถูกต้องนั้นมีขั้นตอนและข้อจำกัดหลายอย่างดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว เช่น การเก็บข้อมูลความเข้มแสงจากการวัด, การที่เครื่องวัด Flying height ยอมให้ใส่ค่าดรรรชนีหักเหได้เพียงค่าเดียว และข้อจำกัดของดรรรชนีหักเห ซึ่งจากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 6.2.3 แสดงให้เห็นว่าเครื่องวัด Flying height จะไม่พิจารณาค่า k ของดรรรชนีหักเห ดังนั้นค่าดรรรชนีหักเหของดิสก์จึงจะมีเพียงค่า n ซึ่งจากข้อจำกัดนี้ทำให้เราไม่สามารถกำหนดค่าดรรรชนีหักเหด้วย n เพียงค่าเดียวที่ทำให้ Theory curve ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการวัดได้ (ซึ่ง k เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เฟสของความเข้มแสงเลื่อนไปจากเดิม) วิธีการที่จะแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของข้อมูลวัดตามแนวแกน x ดังแสดงในรูปที่ 6.20(e) แล้วหาค่าดรรรชนีหักเห n ซึ่งการกระทำดังกล่าวเปรียบได้กับการเพิ่มหรือลด Flying height โดยตั้งใจเพื่อให้ได้ลักษณะของกราฟที่ดีที่สุด ซึ่งในการนำค่าดรรรชนีหักเหไปใช้ในการวัดเมื่อได้ค่า Flying height มาแล้วจึงต้องนำมารวมหรือหักลบกับระยะ Flying height ที่ทำการเลื่อนออกเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ดังนั้นในการหาค่าดรชนีหักเหที่สามารวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องนั้นจะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงระยะเลือนค่า Flying height ของข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดความถี่ไปกับการเปลี่ยนแปลงค่า n ของดรชนีหักเห จนกระทั่งสามารถทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดและการคำนวณมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยสามารถสรุปขั้นตอนที่ใช้ในการหาค่าดรชนีหักเหของดิสก์ที่พัฒนาขึ้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องได้ดังนี้

- 1-3. ทำการทดสอบเหมือนขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1.3 ซึ่งจะได้ข้อมูลของ Flying height จากงานแก้ว (ในหน่วยไมโครนิ้ว) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.20(a), ข้อมูลความเข้มแสงของดิสก์ที่พัฒนาขึ้น (ในการทดสอบนี้ใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.20(b) ซึ่งเมื่อนำมา Normalize แล้วได้ดังรูปที่ 6.20(c) และจากข้อมูลในรูปที่ 6.20(a) และ (c) สามารถนำมาพลอตจุดบนกราฟเพื่อใช้ในการคำนวณได้ดังรูปที่ 6.20(d)
4. ทำการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากข้อที่ 3 เพื่อหาดรชนีหักเหของดิสก์โดยเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้คือ 1. เปลี่ยนแปลงค่า n ของดรชนีหักเห โดยกำหนดขอบเขตของ n นั้นต้องมากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k และ 2. เปลี่ยนแปลงระยะเลือนของ Flying height ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.20(e) โดยกำหนดขอบเขตคือ 0 ถึง 20 นาโนเมตร ซึ่งผลการ Fitting แสดงไว้ดังรูปที่ 6.20(f) ส่วนค่าดรชนีหักเหและระยะเลือน Flying height ที่ทำให้การ Fitting ดีที่สุดแสดงไว้ดังตารางที่ 6.11 โดยที่รายละเอียดในการ Fitting อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2.2
5. ทดสอบวัด Flying height ด้วยดรชนีหักเหที่ได้จากข้อที่ 4 โดยค่า Flying height ที่ได้จากการวัดนั้นต้องทำการบวกระยะ Flying height ที่เลื่อนไปก่อน จึงจะสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่า Flying height ที่ได้จากการวัดด้วยจากงานแก้วได้

(a)

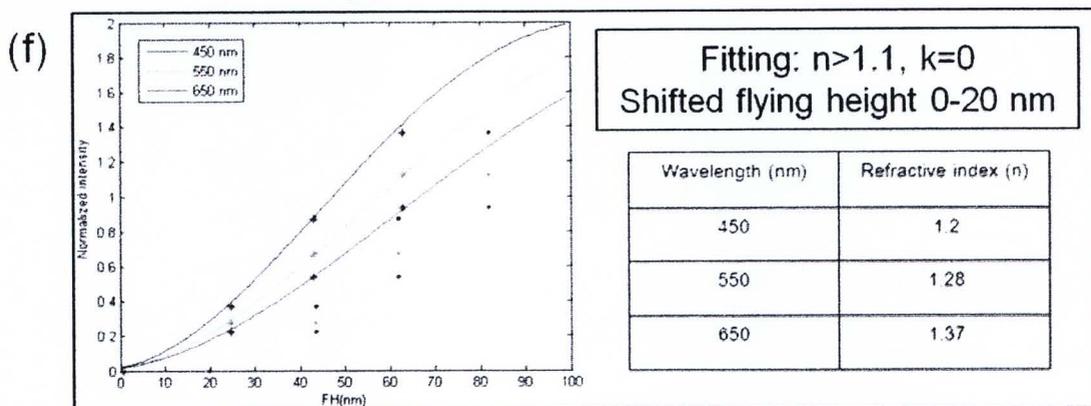
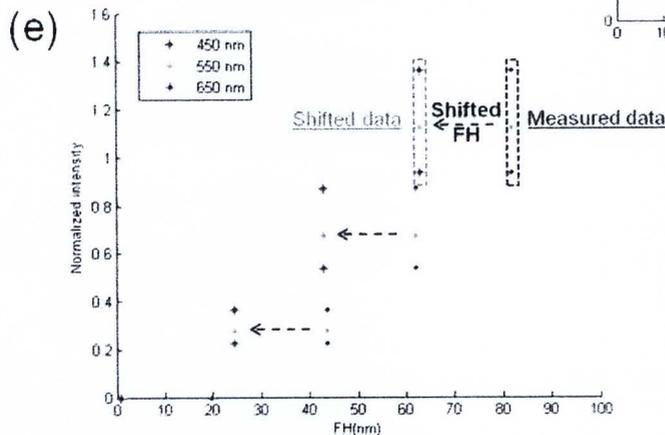
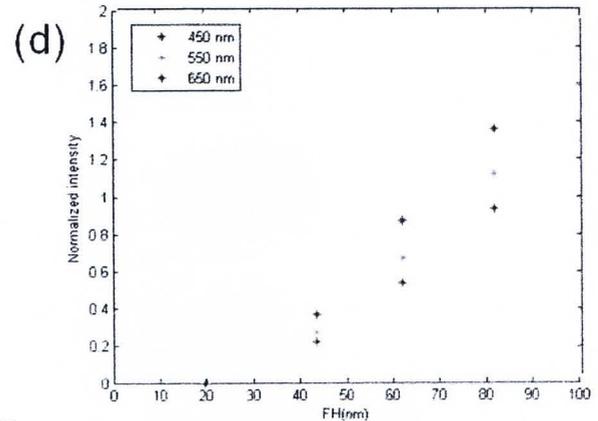
| Point | FH |
|-------|--------|
| TAE_1 | 0.7791 |
| TAE_2 | 1.7165 |
| TAE_3 | 2.4406 |
| TAE_4 | 3.2274 |

(b)

| Point | FH in micro inch | FH in nm | Wavelength 450 nm | | |
|-------|------------------------|-------------|-------------------|------|---------|
| | | | Min | Max | Measure |
| TAE_1 | 0.779 | 19.79 | 582 | 2268 | 548.47 |
| TAE_2 | 1.717 | 43.6 | 576 | 2188 | 873.25 |
| TAE_3 | 2.441 | 61.99 | 555 | 2265 | 1300.22 |
| TAE_4 | 3.227 | 81.98 | 516 | 2264 | 1708.53 |

(c)

| Point | Wavelength 450 nm |
|-------|-------------------|
| TAE_1 | -0.04 \cong 0 |
| TAE_2 | 0.37 |
| TAE_3 | 0.87 |
| TAE_4 | 1.36 |



รูปที่ 6.20 ไดอะแกรมขั้นตอนการหาตัวชี้หักเหที่สามารนำไปใช้ในการวัด Flying height ได้อย่างถูกต้อง (a) ค่า Flying height ที่วัดได้จากงานแก้ว, (b) ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดตามตำแหน่งที่กำหนด, (c) ค่าความเข้มแสงที่ Normalize แล้ว, (d) การกำหนดจุดความเข้มแสงที่ Normalize แล้วลงบนกราฟ, (e) การเลื่อนระยะ Flying height ของข้อมูลความเข้มแสง และ (f) ผลการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงระยะเลื่อน Flying height ไป 0 ถึง 20 นาโนเมตรโดยกำหนดให้ n มากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k

ตารางที่ 6.11 ค่าดัชนีหักเหและระยะเลื่อน Flying height ที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลจากวัด

| Wavelength (nm) | Refractive index (n) | Shifted Flying height (nm) |
|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 450 | 1.2 | 19 nm |
| 550 | 1.28 | |
| 650 | 1.37 | |

6.3 การทดสอบใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้นในการวัด Flying height

การทดสอบวัด Flying height ของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร โดยใช้ค่าดัชนีหักเหที่ได้จากหัวข้อที่ 6.2.4 โดยใช้วิธีการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่เลื่อนค่า Flying height ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.11 โดยการทดสอบนั้นจะเริ่มจากการวัด Flying height ทั้งบนจานแก้วจากนั้นจะวัด Flying height บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตร โดยค่า Flying height ที่ได้จากการวัดของดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรนั้นต้องรวมกับค่า Flying height ที่ต้องเลื่อนไป 19 นาโนเมตร (ซึ่งได้มาจากการ Fitting) ก่อนนำมาเปรียบเทียบกับจานแก้ว

ผลการทดสอบ

รูปที่ 6.21 ผลการวัด Flying height ด้วยดรรชนีหักเหที่ Fitting จากข้อมูลความเข้มแสงที่เลื่อนค่า Flying height ไป 19 นาโนเมตร (ตารางที่ 6.11) และค่า Flying height ที่วัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับจานแก้วแสดงไว้ดังตารางที่ 6.12

| Point | FH | Fit | Point | FH | Fit |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| TAE_2 | 1.7110 | 0.012 | TAE_2 | 0.9685 | 0.005 |
| TAE_3 | 2.3587 | 0.021 | TAE_3 | 1.6555 | 0.019 |
| TAE_4 | 3.0890 | 0.030 | TAE_4 | 2.3665 | 0.060 |

รูปที่ 6.21 เปรียบเทียบระหว่างค่า Flying height (ไมโครนิ้ว) ที่วัดได้บนจานแก้ว (ซ้าย) กับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหตารางที่ 6.11 (ขวา)

ตารางที่ 6.12 เปรียบเทียบค่า Flying height ที่วัดได้บนจานแก้วกับที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร ที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหที่ Fitting จากข้อมูลการวัดที่เลื่อนค่า Flying height ไป 19 นาโนเมตร

| Point | FH บนจานแก้ว (nm) | FH ของดิสก์ที่พัฒนาขึ้น (nm) + 19 nm (nm) | Δ FH (nm) |
|-------|----------------------|--|---------------------|
| TAE_2 | 43.43 | 24.6 + 19 = 43.6 | 0.17 |
| TAE_3 | 59.86 | 42.05 + 19 = 61.05 | 1.19 |
| TAE_4 | 78.46 | 60.11 + 19 = 79.11 | 0.65 |

จากรูปที่ 6.21 และข้อมูล Flying height ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.12 จะเห็นว่าค่า Flying height ที่ได้จากการวัดนั้นใกล้เคียงกับค่า Flying height ที่ได้จากการ Fitting หลังจากรวมกับค่า Flying height ที่ทำให้เลื่อนไปในขั้นตอนของการ Fitting (19 นาโนเมตร) และจากรูปที่ 6.21 จะเห็นว่าค่า Fit ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและผลจากการคำนวณทางทฤษฎี (Theory curve) โดยที่ค่า Fit น้อยหมายถึงข้อมูลจากการวัดและการคำนวณมีความใกล้เคียงกันมาก โดยที่จากรูปจะเห็นว่าค่า Fit นั้นมีค่าที่น้อยมาก (0.005 ถึง 0.06 ไมโครเมตร) ซึ่งหมายความว่าข้อมูลที่ได้จากการ Fitting โดยเลื่อนค่า Flying height นั้นมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดมาก

6.4 สรุปผลการประยุกต์ใช้งานของดิสก์ในเครื่อง Flying height tester

จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าดรรชนีหักเหของดิสก์ที่ใช้ในการวัด Flying height นั้นต้องเป็นดรรชนีหักเหที่ (ค่าดรรชนีหักเหที่สามารถแสดงคุณสมบัติทางแสงโดยรวมของดิสก์ได้) โดยที่มีข้อจำกัดคือค่า n ของดรรชนีหักเหต้องมากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k เนื่องจากในอัลกอริทึมของเครื่องวัด Flying height จะไม่พิจารณาค่า k ในการคำนวณ Theory curve ซึ่งจากการประยุกต์ข้อจำกัดเหล่านี้เข้ากับการคำนวณดรรชนีหักเหของดิสก์ พบว่าดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรสามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องที่ Flying height ตั้งแต่ 25 นาโนเมตรเป็นต้นไปโดยที่มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 1 นาโนเมตร