

การปรับปรุงความทนทานของงานแก้วและความไวในการวัดเพดานบินของหัวอ่านเขียน
โดยการเคลือบด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร



นายกรกช เพชรดี

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF GLASS DISK DURABILITY AND SENSITIVITY IN FLYING
HEIGHT MEASUREMENT BY DIAMOND-LIKE-CARBON COATING

Mr.Korakoch Phetdee

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงความทนทานของงานแก้วและความไวในการวัดเพดานบินของหัวอ่านเขียนโดยการเคลือบด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร

โดย

นายกรกช เพชรดี


สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีสุวรรณิช

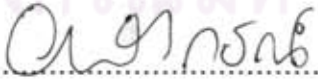
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

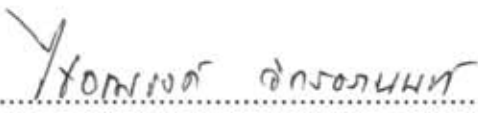

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีสุวรรณิช)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรชานนท์)

กรกช เพชรดี: การปรับปรุงความทนทานของจานแก้วและความไวในการวัดเพดานบินของหัวอ่านเขียนโดยการเคลือบด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร. (IMPROVEMENT OF GLASS DISK DURABILITY AND SENSITIVITY IN FLYING HEIGHT MEASUREMENT BY DIAMOND-LIKE-CARBON COATING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.วิระยุทธ ศรีธรรวานิช, 172 หน้า

ในฮาร์ดดิสก์ เพดานบินของหัวอ่านเขียน (Flying height) หรือระยะห่างที่หัวอ่านเขียนบินเหนือแผ่นบันทึกแม่เหล็กได้ถูกออกแบบให้มีขนาดต่ำลงเรื่อยๆ ปัจจุบันมีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตรเพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลได้หนาแน่นมากขึ้น โดยทั่วไปเพดานบินของหัวอ่านเขียนจะถูกวัดในเครื่องวัดเพดานบิน (Flying height tester) ซึ่งใช้หลักการแทรกสอดของแสงผ่านแผ่นจานแก้วใสที่มีความเรียบและตรงเป็นพิเศษ โดยในขณะที่ทำการวัดหัวอ่านเขียนจะเกิดการสัมผัสกับจานแก้วเป็นระยะๆซึ่งทำให้จานแก้วเกิดการสึกหรอได้ง่ายและมีอายุการใช้งานสั้นจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วนี้ค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) มีค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วนี้สูงถึง 2 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการเพิ่มความทนทานของจานแก้วโดยการเคลือบผิวจานแก้วด้วยวัสดุเคลือบแข็งประเภทคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC: Diamond-like-carbon) ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของจานแก้วเพิ่มขึ้นและทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วลงได้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอการปรับปรุงความไว (Sensitivity) ในการวัดเพดานบินของหัวอ่านเขียนด้วยการปรับความหนาของชั้นเคลือบผิวบนดิสก์ที่พัฒนาขึ้น

การเคลือบผิวจานแก้วจะเริ่มจากการปลูกชั้นซิลิกอนเพื่อช่วยในการยึดเกาะแล้วตามด้วยชั้น DLC ด้วยวิธีการ Ion beam deposition จากการทดสอบการสึกหรอ (Wear test) ของดิสก์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับจานแก้วปกติด้วยเครื่อง Triboindenter พบว่าดิสก์ที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบด้วยชั้นซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและชั้น DLC หนา 15 นาโนเมตรสามารถลดความสึกของรอยขีดข่วนลงได้ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ จากการวัดอายุการใช้งานในเครื่องวัด Flying height พบว่าดิสก์ที่พัฒนาขึ้นนั้นมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 30 เท่าเมื่อเทียบกับจานแก้ว จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วลงได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ในการปรับปรุงความไว (Sensitivity) ได้พัฒนาดิสก์ที่ประกอบด้วย 4 ชั้น คือชั้นซิลิกอน 1 หนา 1 นาโนเมตร ชั้นDLC1 หนา 55 นาโนเมตร ชั้นซิลิกอน2 หนา 3 นาโนเมตรและชั้นDLC2 หนา 25 นาโนเมตรซึ่งพบว่าดิสก์ที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการวัดเพดานบินเพิ่มมากขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ในช่วงเพดานบินระหว่าง 0 ถึง 20 นาโนเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้จานแก้วปกติ หนึ่งแนวทางนี้ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความไวในการวัด Flying height ได้อีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนี้สิต ๑๖๔๔ ๒๕๕๓
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *Dr. P.*
ปีการศึกษา 2553

5170206021: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: GLASS DISK/ FLYING HEIGHT/ DIAMOND-LIKE-CARBON/ SENSITIVITY
 KORAKOCH PHETDEE: IMPROVEMENT OF GLASS DISK DURABILITY AND
 SENSITIVITY IN FLYING HEIGHT MEASUREMENT BY DIAMOND-LIKE
 CARBON COATING. THESIS ADVISOR: WERAYUT SRITURAVANICH, Ph.D.,
 172 pp

In hard disks, flying height or the spacing between the read/write head and the magnetic disk has been greatly decreased to less than 10 nm in order to achieve high-density magnetic storage. Generally, the flying height is measured in a flying height tester using the principle of light interferometry whereas the reflected light is observed through a special glass disk which is extremely smooth and flat. Due to the intermittent contact between the head and glass disk, this characterization process easily causes the disk wear and scratches leading to short lifetime of the glass disk, thus makes this process very costly. For instance, Western digital (Thailand) spends as much as 2 million baht annually on the glass disk. Therefore, the main objective of this work is to improve the disk durability by employing a hard coating material of diamond-like-carbon (DLC) layer as the protective layer over the commercial glass disk to increase its wear resistance resulting in disk lifetime improvement. Furthermore, this work aims to improve the sensitivity in the flying height measurement by optimizing the thicknesses of the overcoat layers on the glass disk.

In the fabrication process, silicon adhesion layer and DLC protective layer were deposited on the commercial glass disk by ion beam deposition. According to a wear test performed in a triboindenter, the wear depths on the disk coated with 3-nm thick silicon and 15-nm thick DLC were reduced by 92 percents as compared to that on the glass disk. In the disk lifetime measurement performed in a flying height tester, the fabricated disk lifetime can be improved by at least 30 times as compared to that of the glass disk resulting in 96 percents of a cost reduction in the flying height measurement process. In the sensitivity improvement, the disk coated with 4 layers (silicon1: 1 nm, DLC1: 55 nm, silicon2: 3 nm and DLC2: 25 nm) was found to improve the sensitivity in the flying height measurement at a near contact (0-20nm) by 85 percents as compared to the measurement result using a commercial glass disk. This approach gives a great promise to the disk lifetime extension as well as a significant improvement of the sensitivity in flying height measurement.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature นคร ทรัพย์

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature Werayut Srituravanich

Academic Year: 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆด้านจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช ซึ่งได้ให้โอกาสประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงทั้งในด้านการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัยเหนือสิ่งอื่นใดคือท่านอาจารย์ยังได้ให้วิธีการคิดแบบวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อทัศนคติของผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิณ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในด้านทางการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูล, อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย และผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อ พี่พุง ม่วงงาม, พี่ธีระวัฒน์ แก้วมณี, พี่สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, พี่ภูวนัย บุญหนัก และ พี่ลัชชานันท์ รักษาธรรม พี่ๆวิศวกรบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยในด้านต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ตลอด 3 ปีที่ผ่านมา ณ ห้องปฏิบัติการระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคและนาโนเทคโนโลยี ผู้วิจัยได้รับกำลังใจและความเอื้ออาทรจาก เพื่อนๆ และ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายกฤษณ์กร ประไพพิทยาคุณ และ น้องภากร นนทวิวัฒน์วิช ที่ร่วมฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน และ ขอขอบคุณ นางสาวกิริติกานต์ กิรติวานิชย์ ที่เป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาตลอด

และในท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายประยุทธ และ นางจินตนา เพชรดี บิดามารดาของผู้วิจัยที่ได้ให้การเลี้ยงดูทั้งกายและใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานและไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	บ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย	2
1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม	5
2.1 ฮาร์ดดิสก์.....	5
2.2 การวัดระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็ก	7
2.3 คุณสมบัติของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใส.....	12
2.4 วิธีการปลูก DLC ฟิล์ม.....	15
2.5 การวัดดรรชนีหักเหของวัสดุเคลือบใส	20

2.6 การวัดคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม	25
บทที่ 3 การสร้างดิสก์ต้นแบบ	31
3.1 กระบวนการสร้างดิสก์	31
3.2 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้างดิสก์.....	35
3.3 การทดสอบความสามารถในการบินของหัวอ่าน/เขียนด้วยดิสก์ต้นแบบ	38
บทที่ 4 การทดสอบความหนาของซิลิกอนที่มีผลต่อการมองเห็น Pole-tip และความแข็งแรงของดิสก์	39
4.1 การทดสอบความหนาของซิลิกอนที่มีผลต่อการมองเห็น Pole-tip	39
4.2 การทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่อความแข็งแรงของดิสก์	41
4.3 สรุปผลการทดสอบ	45
บทที่ 5 การวัดอายุการใช้งานของดิสก์	46
5.1 การทดสอบวัดอายุการใช้งานโดยเครื่องวัด Flying height tester	46
5.2 การตรวจสอบรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ด้วยเครื่อง Profiler	52
5.3 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการใช้ดิสก์ที่สร้างขึ้น.....	57
5.4 สรุปผลการทดสอบการวัดอายุการใช้งานของดิสก์	58
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้งานของดิสก์ในเครื่อง Flying height tester	59
6.1 การคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์	59
6.2 การหาค่าดรรัชนีหักเหล์พธ์ของดิสก์ที่พัฒนาขึ้น	75
6.3 การทดสอบใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้นในการวัด Flying height.....	86
6.4 สรุปผลการประยุกต์ใช้งานของดิสก์ในเครื่อง Flying height tester	87

บทที่ 7 การปรับปรุงความไวในการวัด Flying height ของดิสก์.....	88
7.1 การวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC	88
7.2 การปรับปรุงความไวในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้น.....	92
7.3 การปรับปรุงความไวในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้น.....	104
7.4 การวัด Sensitivity โดยใช้เครื่องวัด Flying height	118
7.5 สรุปผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเคลือบผิวดิสก์ด้วย ซิลิกอนและ DLC	126
บทที่ 8 สรุปผลงานวิจัย	128
รายการอ้างอิง	130
ภาคผนวก	135
ภาคผนวก ก การคำนวณการแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง	136
ก.1 ฟิล์มบางบน Substrate.....	136
ก.2 ฟิล์มหลายชั้นบน Substrate	139
ก.3 การแทรกสอดของแสงในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนและ DLC	141
ภาคผนวก ข ชุดคำสั่งของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ Matlab เพื่อใช้ในการคำนวณ ...	144
ข.1 โปรแกรมเพื่อ Fitting หาค่าดรรชนีหักเหของดิสก์จากค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัด	144
ข.2 โปรแกรมเพื่อ Optimize sensitivity โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC	152
ข.3 โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ Sensitivity ที่ได้จากโปรแกรม ข.2.....	157
ข.4 โปรแกรมเพื่อ Fitting ความเข้มแสงที่ได้จากการวัดเพื่อหาความหนาของฟิล์ม และ คำนวณ Sensitivity ที่ได้จากความหนานั้น	162
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	172

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัสดุและความแข็งแรงของวัสดุโปร่งใสและงานแก้ว	14
2.2 ความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใส	15
3.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์ม	35
5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกปรับใน Critical condition.....	49
5.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height ระหว่างงานแก้วและดิสก์ที่เคลือบผิวด้วย ซิลิกอนและ DLC.....	57
6.1 ดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ	64
6.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ	64
6.3 ตัวอย่างของการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร	66
6.4 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากงานแก้ว	71
6.5 ค่าความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของงานแก้ว.....	71
6.6 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโน เมตรและ DLC 15 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากงานแก้ว).....	71
6.7 ค่าความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร	72
6.8 ค่าดรรชนีหักเหที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด.....	79
6.9 ค่าดรรชนีหักเหที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด (กำหนดให้ค่า n ของดรรชนีหักเหมากกว่า 1.1 เป็นต้นไป).....	81

6.10 เปรียบเทียบค่า Flying height ที่วัดได้บนจานแก้วกับที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร ที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหที่ Fitting จากข้อมูลการวัดโดยกำหนดให้ค่า n มากกว่า 1.1.....	82
6.11 ค่าดรรชนีหักเหและระยะเลื่อน Flying height ที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลจากวัด.....	86
6.12 เปรียบเทียบค่า Flying height ที่วัดได้บนจานแก้วกับที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร ที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหที่ Fitting จากข้อมูลการวัดที่เลื่อนค่า Flying height ไป 19 นาโนเมตร.....	87
7.1 ดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณเพื่อการ Optimize sensitivity.....	92
7.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการ Optimize sensitivity ของดิสก์ที่มี 3 ชั้น.....	96
7.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการ Optimize sensitivity ของดิสก์ที่มี 5 ชั้น.....	108
7.4 ค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้นโดยมีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่าเฉลี่ย Flying height ที่วัดจากจานแก้ว).....	120
7.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มี 3 ชั้นโดยมีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตร และ DLC 77 นาโนเมตร.....	120
7.6 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยมีความหนา Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากจานแก้ว).....	124
7.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยมีความหนา Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร.....	124
7.8 สรุปผลความไวในการวัด Flying height (Sensitivity) ที่เพิ่มขึ้นของดิสก์ที่สร้างขึ้นตามผลการ Optimize	126

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ [9]	6
2.2 หัวอ่าน/เขียนที่บินอยู่บนเนื้อแผ่นจานแม่เหล็ก [10]	6
2.3 ไดอะแกรมแสดงถึง Flying height หรือความสูง (h) ที่หัวอ่าน/เขียนบินอยู่บนเนื้อแผ่นจานแม่เหล็ก [13].....	7
2.4 ไดอะแกรมของเครื่องวัด Flying height แบบ intensity interferometry	8
2.5 ลักษณะการสะท้อนของแสงที่รอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว	8
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flying height กับ อัตราส่วนความเข้มแสง [6].....	10
2.7 ไดอะแกรมของเครื่องวัด Flying height DFHT5 ของบริษัท KLA-Tencor [15].....	11
2.8 ไดอะแกรมในแปลงค่าความเข้มแสงเป็นค่า Flying height โดยใช้หลักการ Three wavelength inteferometry [15].....	12
2.9 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Sputtering [20].....	16
2.10 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Ion beam deposition [20].....	17
2.11 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Filtered cathodic vacuum arc [20]	19
2.12 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Plasma enhanced chemical vapour deposition [26].....	20
2.13 ลักษณะต่างๆของ Polarization โดยที่ a) คือ Linear polarization b) คือ Circularly polarization และ c) คือ Elliptical polarization [30]	21
2.14 การสะท้อนของ p- และ s-polarization [31]	22
2.15 ความหมายของตัวแปลต่างๆที่ใช้ในสมการที่ (2.5) ถึง (2.8) [30]	23

2.16 ลักษณะของ Ellipsometry ทัวไป [30].....	24
2.17 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูลของ Ellipsometry [30]	25
2.18 Nested crack ที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธี Microindentator บนฟิล์ม DLC [20]	26
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับความลึกของรอยกดของ DLC หนา 100 นาโนเมตรที่ ปลูกด้วยวิธีต่างๆบนซิลิกอน Substrate และซิลิกอน Substrate [26]	27
2.20 กราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกดและรูปร่างของพื้นผิวที่เกิด ความเสียหายของฟิล์ม DLC หนา 20 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกันบนซิลิกอน Substrate [26]	28
2.21 ไดอะแกรมกลไกการเกิดความเสียหายของฟิล์ม DLC (a) ฟิล์มเสียรูปร่างเนื่องจากการขูด (b) เกิดเศษของฟิล์มขึ้นเนื่องจากการขูด (c) ฟิล์มเกิดการลอกออกจาก Substrate (d) เกิดฟิล์ม Breakdown ขึ้นเนื่องจากฟิล์มเกิดรอยแตกขึ้น [26].....	29
2.22 ข้อมูลทดสอบ Wear บนฟิล์ม DLC ที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ความหนาฟิล์มในแถว เดียวกันจะเท่ากัน โดยที่แต่ละกราฟจะแสดงความลึกของรอยขีดข่วนและสัมประสิทธิ์ของความ เสียดทาน [26].....	30
3.1 ขั้นตอนในการปลูกฟิล์มและลักษณะของดิสก์หลังจากผ่านกระบวนการปลูกฟิล์ม	33
3.2 ปีนไนโตรเจน (ซ้าย), ใช้ป็นไนโตรเจนเป่าสิ่งสกปรกออกจากผิวของจานแก้ว (ขวา).....	33
3.3 ขณะนำดิสก์ใส่เข้าไปในเครื่อง RF-load lock เพื่อทำการปลูกฟิล์ม.....	34
3.4 จานแก้วก่อนและหลังผ่านกระบวนการปลูกฟิล์ม	34
3.5 ABS หลังการทดสอบของดิสก์ที่มี DLC (ซ้าย), จานแก้วธรรมดา (ขวา) ซึ่งวงกลมแสดงให้เห็นถึง เห็นถึงเศษของ DLC ที่มาเกาะกับ ABS	36

3.6 รอยขีดข่วนที่เกิดบนดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนแต่มีชั้นของฟิล์ม DLC บางเกินไป (ซ้าย) ภาพถ่ายของรอยขีดข่วนจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ขวา)	37
3.7 แสดงตำแหน่งของ Pole-tip บน ABS (ซ้าย) Pole-tip ของจานแก้วทั่วไป (ขวาบน) Pole-tip ของดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนหนาเกินไป (ขวาล่าง).....	38
4.1 แสดงความชัดเจนของ Pole-tip บน ABS เมื่อทดสอบด้วยจานแก้วและดิสก์ที่มีความหนา ซิลิกอนแตกต่างกัน แถวบนจากซ้ายไปขวาคือจานแก้ว, ดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 และ 3 นาโน เมตร แถวล่างจากซ้ายไปขวาคือ ดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 5, 7 และ 9 นาโนเมตร.....	41
4.2 เครื่องวัด Triboindenter รุ่น TI-900 ของบริษัท Hysitron.....	42
4.3 หัวกดเพชรปลายแหลมชนิด Cube corner ที่มีรัศมีของหัวกด 100 นาโนเมตร [42].....	42
4.4 ภาพของรอยขีดข่วนบนดิสก์ที่ทำการทดสอบทั้งหมด	44
4.5 ความสัมพันธ์ของความลึกของรอยขีดข่วนกับความหนาของซิลิกอนโดยที่เส้นประแสดงถึง ความลึกของรอยขีดข่วนบนจานแก้ว	45
5.1 ไตอะแกรมของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการปรับ IPS	47
5.2 ไตอะแกรมของมุม Skew หรือมุมที่หัวอ่าน/เขียนวางตัวเบี่ยงเบนจากเส้นรัศมีของดิสก์ ...	48
5.3 ไตอะแกรมของระยะความสูง Z-height ซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างที่ยึดหัวอ่านเขียน (Fixture) และดิสก์.....	48
5.4 ผลการทดสอบอายุการใช้ของจานแก้วเปรียบเทียบกับดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนหนา 3 นา โนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตร.....	51
5.5 ลักษณะ ABS ของหัวอ่าน/เขียน (ซ้าย) ABS ที่วัดด้วยจานแก้วที่เมื่อเวลาผ่านไป 50 วินาที (ขวา) ABS ที่วัดด้วยดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่เวลา 1800 วินาที	51

5.6 ผิดหน้าของดิสก์หลังจากทำการวัดอายุการใช้งาน (บน) พบรอยขีดข่วนอย่างชัดเจนบนจานแก้ว (ล่าง) รอยขีดข่วนบนดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร..... 52

5.7 เครื่อง Profiler โมเดล P. 16+ ของบริษัท KLA-Tencor 53

5.8 รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนจานแก้วซึ่งมีขนาดประมาณ 400 ไมโครเมตรที่ได้จากการมองผ่านกล้อง CCD ของเครื่อง Profiler โดยแสดงผลในสเกล 100 ไมโครเมตร 54

5.9 รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรซึ่งมีขนาดประมาณ 18 ไมโครเมตรที่ได้จากการมองผ่านกล้อง CCD ของเครื่อง Profiler โดยแสดงผลในสเกล 100 ไมโครเมตร..... 55

5.10 ภาพของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนแก้วบนบริเวณที่ทำการวัด..... 56

5.11 ภาพของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร 56

5.12 ภาพตัดขวางของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนแก้วบนบริเวณที่ทำการวัดโดยมีความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นคือ 1 ไมโครเมตร..... 56

5.13 ภาพตัดขวางของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC ... 56
หนา 15 นาโนเมตรโดยมีความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นคือ 10 นาโนเมตร 56

6.1 แบบจำลองในการคำนวณและลักษณะการสะท้อนของแสงของดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC เมื่อนำไปใช้ในเครื่องวัด Flying height..... 60

6.2 ขั้นตอนในการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC 60

6.3 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอน การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Cauchy (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c) 62

6.4 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัด และเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัด และจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Cauchy (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC ที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c)	63
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ทั้ง 3 ความยาวคลื่นซึ่งคำนวณจากสมการที่ (6.7) ที่ Normalize ให้ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2	66
6.6 ตำแหน่งที่ทำการวัด Flying height บน ABS โดยที่กระบวนการวัดปกติแสดงด้วยจุดสีแดง ส่วนตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบนี้แสดงด้วยจุดสีน้ำเงิน (จากบนไปล่าง TAE_1, TAE_2, TAE_3 และ TAE_4)	69
6.7 ผลการวัด Flying height บนจานแก้ว (ไมโครนิว) โดยใช้ค่าดรรชนีหักเหของจานแก้ว.....	69
6.8 ค่าความเข้มแสง Max และ Min ที่ได้จากการ Calibration ของตำแหน่ง TAE_1 โดยใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร.....	70
6.9 ค่าความเข้มแสงที่อ่านได้ที่ตำแหน่ง TAE_1 โดยใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตร และ DLC 15 นาโนเมตร.....	70
6.10 เส้นโค้งความเข้มแสงของจานแก้วจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหของจานแก้วเปรียบเทียบกับค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัด	72
6.11 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎีของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร.....	73
6.12 ผลการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 0.65 นาโนเมตรและ DLC 11.3 นาโนเมตรให้ผลการ Fitting ที่ดีที่สุด	74
6.13 แบบจำลองในการคำนวณที่เครื่องวัด Flying height ใช้ในการสร้าง Theory curve ซึ่งจะพิจารณาดีสก์เสมือนมีชั้นเดียว	76

6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ที่คำนวณจากสมการที่ (6.9) ซึ่งกำหนดให้ค่าตรรกษนี้หักเหลือของทั้ง 3 ความยาวคลื่นเป็น $1+0.01i$	77
6.15 ตัวอย่างค่าความแตกต่างของค่า Flying height ที่ความเข้มแสงเดียวกันที่จะใช้เป็นเงื่อนไขในการ Fitting	78
6.16 เส้นโค้งความเข้มแสงของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าตรรกษนี้หักเหลือดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.8 ที่ได้จากการ Fitting ด้วยข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด.....	79
6.17 ข้อความแสดง Error ขณะที่ทำการ Calibration ที่ตำแหน่ง TAE_4	80
6.18 เส้นโค้งความเข้มแสงของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าตรรกษนี้หักเหลือดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 ที่ได้จากการ Fitting ด้วยข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด โดยกำหนดให้ค่า n ของตรรกษนี้หักเหลือมากกว่า 1.1 เป็นต้นไป	81
6.19 เปรียบเทียบระหว่างค่า Flying height (ไมโครนิว) ที่วัดได้บนจานแก้วกับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าตรรกษนี้หักเหลือในตารางที่ 6.9.....	82
6.20 ไตอะแกรมขั้นตอนการหาตรรกษนี้หักเหลือที่สามารถนำไปใช้ในการวัด Flying height ได้อย่างถูกต้อง (a) ค่า Flying height ที่วัดได้จากจานแก้ว, (b) ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดตามตำแหน่งที่กำหนด, (c) ค่าความเข้มแสงที่ Normalize แล้ว, (d) การกำหนดจุดความเข้มแสงที่ Normalize แล้วลงบนกราฟ, (e) การเลื่อนระยะ Flying height ของข้อมูลความเข้มแสงและ (f) ผลการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงระยะเลื่อน Flying height ไป 0 ถึง 20 นาโนเมตรโดยกำหนดให้ n มากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k	85
6.21 เปรียบเทียบระหว่างค่า Flying height (ไมโครนิว) ที่วัดได้บนจานแก้ว (ซ้าย) กับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าตรรกษนี้หักเหลือตารางที่ 6.11 (ขวา)	86

7.1	ฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่ปลูกบนซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีชั้นของ SiO_2	89
7.2	ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัด และเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัด และจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Tauc-Lorentz (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC ที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c).....	90
7.3	ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอน การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัด และเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัด และจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Tauc-Lorentz (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c).....	91
7.4	ลักษณะของดิสก์ที่มี 3 ชั้นที่จะใช้ในการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC.....	93
7.5	ไดอะแกรมการวัด Flying height ของเครื่อง flying height tester โดยใช้จานแก้วแบบปกติ ซึ่งในการคำนวณจะใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้นแทนจานแก้ว ซึ่งการสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่ามาก	94
7.6	แบบจำลองของดิสก์ที่มี 3 ชั้นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height โดยที่ d_1 , d_2 , และ d_3 คือความหนาของ Si, DLC และ Flying height ตามลำดับโดยวัสดุที่ใช้ทำ Slider คือ AlTiC.....	94
7.7	ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ Flying height ที่ได้จากการคำนวณของดิสก์ที่มีความหนาของ Si และ DLC 1 นาโนเมตร.....	96
7.8	Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์มี 3 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้ว.....	97
7.9	ลักษณะของดิสก์ที่จะใช้ในการปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height ที่ประกอบด้วยฟิล์ม DLC เพียงอย่างเดียว.....	98

7.10 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มีชั้นของ DLC เพียงอย่างเดียว โดยที่ค่า Sensitivity ที่มากที่สุดคือ 24.32% ที่ความหนา DLC 105 นาโนเมตร..... 98

7.11 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มี DLC 88 นาโนเมตร 100

7.12 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์มี 3 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของ ซิลิกอนและ DLC ซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้ว โดยกำหนดขอบเขตของ DLC ที่ 100 นาโนเมตร 101

7.13 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร..... 101

7.14 ดิสก์ที่มีความหนา DLC 88 นาโนเมตรซึ่งเกิดการหลุดลอกของฟิล์ม DLC ซึ่งบริเวณที่เกิด การหลุดลอกของ DLC เมื่อเซ็ดฟิล์ม DLC ออกจะลักษณะใสเหมือนจานแก้ว 103

7.15 ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร..... 104

7.16 ลักษณะของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่จะใช้ในการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม Si₁, DLC₁, Si₂ และ DLC₂ 105

7.17 ไตอะแกรมการวัด Flying height ของเครื่อง flying height tester โดยใช้จานแก้วแบบปกติ ซึ่งในการคำนวณจะใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้นแทนจานแก้วซึ่งการสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่ามาก105

7.18 แบบจำลองของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height โดยที่ d₁, d₂, d₃, d₄ และ d₅ คือความหนาของ Si₁, DLC₁, Si₂, DLC₂ และ Flying heightตามลำดับโดยวัสดุที่ใช้ทำ Slider คือ AITiC..... 106

7.19 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่มี ความหนาของ Si₁, DLC₁, Si₂ และ DLC₂ 1 นาโนเมตร 108

7.20 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้ Interval หยาบแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 2 และ 5 นาโนเมตร	110
7.21 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้ Interval หยาบแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 240 และ 320 นาโนเมตร.....	110
7.22 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ DLC_1 275 ถึง 375 และ DLC_2 150 ถึง 250 นาโนเมตรโดยใช้ Interval ละเอียดแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 0.5 และ 5 นาโนเมตร	111
7.23 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ Si_1 และ Si_2 0 ถึง 5 นาโนเมตรโดยใช้ Interval ละเอียดแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 250 และ 320 นาโนเมตร	112
7.24 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนา Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 0.5 และ 1.5 นาโนเมตร.....	113
7.25 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนา DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 70 และ 25 นาโนเมตร	113
7.26 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่ตำแหน่งความหนาที่สนใจคือ DLC_1 55 และ DLC_2 25 นาโนเมตรโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 1 และ 3 นาโนเมตร	114

7.27 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ DLC₁ 45 ถึง 65 และ DLC₂ 15 ถึง 35 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา Si₁ และ Si₂ เท่ากับ 1 และ 3 นาโนเมตร 115

7.28 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ Si₁ 0 ถึง 2 และ Si₂ 2 ถึง 4 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา DLC₁ และ DLC₂ เท่ากับ 55 และ 25 นาโนเมตร 116

7.29 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มี Si₁ 1, DLC₁ 55, Si₂ 3 และ DLC₂ 25 นาโนเมตร..... 116

7.30 ดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC สลับกันซึ่งมีความหนาดังนี้ Si₁ 1, DLC₁ 55, Si₂ 3 และ DLC₂ 25 นาโนเมตร..... 117

7.31 ตำแหน่งบน ABS ที่ใช้ทำการวัด Flying height และความเข้มแสงเพื่อทดสอบ Sensitivity (จากบนไปล่าง TAE_1, TAE_2, TAE_3 และ TAE_4)..... 119

7.32 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ความหนาของดิสก์คือซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร..... 121

7.33 ผลการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 0.57 นาโนเมตรและ DLC 71 นาโนเมตรให้ผลการ Fitting ที่ดีที่สุด 122

7.34 การเปรียบเทียบความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height . 123

ของทุกความยาวคลื่นระหว่างงานแก้ว (ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ) กับดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 0.57 นาโนเมตรและ DLC 71 นาโนเมตร 123

7.35 การเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ความหนาของดิสก์คือ Si₁ 1, DLC₁ 55, Si₂ 3 และ DLC₂ 25 นาโนเมตร 125

7.36 เปรียบเทียบความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height 126	126
ของทุกความยาวคลื่นระหว่างจันแก้ว (ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ) กับดิสก์ที่มีความหนาของ Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร..... 126	126
ก.1 การแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง [27]..... 136	136
ก.2 แบบจำลองการแทรกสอดของแสงระหว่างชั้นตัวกลาง อากาศ ฟิล์มบาง 137	137
และ Substrate [27]..... 137	137
ก.3 วิธีการคำนวณการแทรกสอดของแสงในฟิล์มที่มีหลายชั้น [27] 139	139
ก.4 แบบจำลองการสะท้อนของแสงในการวัด Flying height ด้วยจันแก้วที่เคลือบด้วยซิลิกอน และ DLC 141	141
ก.5 แบบจำลองการวัด Flying height หลังจากยุบรวมชั้นตัวกลางที่ 3 และ 4 142	142
ก.6 แบบจำลองการวัด Flying height หลังจากยุบรวมชั้นตัวกลางที่ 2 และ 3, 4..... 142	142
ก.7 แบบจำลองการวัด Flying height หลังจากยุบรวมชั้นตัวกลางที่ 1 และ 2, 3, 4..... 143	143
ข.1 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.1..... 144	144
ข.2 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.2..... 152	152
ข.3 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.3..... 157	157
ข.4 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.4..... 162	162

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

d_i	ความหนาของชั้นตัวกลางต่าง ๆ
I_0	ความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง
I_C	ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจากติสก์ที่พิจารณาเป็นวัตถุชั้นเดียว
I_S	ความเข้มแสงที่สะท้อนกลับมาจากติสก์ที่มีหลายชั้น
k	ส่วนจำนวนเชิงซ้อนของดรรชนีหักเห (Extinction coefficient)
n	ส่วนจำนวนจริงของดรรชนีหักเห (Refractive index)
r_{ij}	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลาง i และสะท้อนกลับมาจากตัวกลาง j
r_{ijk}	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลาง i และสะท้อนกลับมาจากตัวกลางของ j และ k ที่ยุบรวมกัน

อักษรกรีก

β_i	เฟสของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเดินทางผ่านชั้นตัวกลาง i
λ	ความยาวคลื่นของแสง

อักษรย่อ

ABS	Air Bearing Surface
DLC	Diamond Like Carbon
IPS	Inches Per Second

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์จะมีกระบวนการวัด Flying height ซึ่งคือระยะที่หัวอ่าน/เขียนบินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็กซึ่งพารามิเตอร์นี้มีความสำคัญมากเนื่องจากการที่ฮาร์ดดิสก์จะสามารถอ่านหรือเขียนได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์นี้ซึ่งในปัจจุบันค่า Flying height มีค่าอยู่ที่ 8 ถึง 50 นาโนเมตรซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มว่าจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลบนแผ่นจานแม่เหล็ก [1-4] เมื่อระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กนั้นใกล้กันมากการสัมผัสหรือชนกันของหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการทำงานของฮาร์ดดิสก์เพราะจะทำให้อายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ลดลงดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัด Flying height ทั้งในขั้นตอนการพัฒนาและขั้นตอนการผลิต [5] ซึ่งจะวัดโดยใช้เครื่อง Flying height tester ซึ่งการวัดระยะระหว่างหัวอ่าน/เขียนกับแผ่นบันทึกด้วยเครื่องวัด จะต้องใช้จานแก้วพิเศษ (Glass disk) [6] ซึ่งมีราคาแพง (300 – 500 เหรียญสหรัฐต่อชิ้น)

โดยที่ในการวัด Flying height หัวอ่าน/เขียนจะบินอยู่เหนือจานแก้วซึ่งระยะระหว่างหัวอ่าน/เขียนกับจานแก้ว (Flying height) นั้นใกล้กันมากทำให้เกิดการชนหรือสัมผัสกันระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้วซึ่งเป็นผลให้จานแก้วสึกหรอและเกิดรอยขีดข่วนได้ง่ายซึ่งรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนจานแก้วนั้นจะทำให้การวัด Flying height คลาดเคลื่อนจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนจานแก้ว [7] เพราะเหตุนี้จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายของจานแก้วในการวัด Flying height สูงถึง 2 ล้านบาทในแต่ละปี (เฉพาะที่บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย)) ดังนั้นจึงเห็นว่าถ้าสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วได้ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height และลดการนำเข้าจานแก้วจากต่างประเทศได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วโดยเสนอแนวทางในการเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วโดยการใช้วัสดุที่แข็งแกร่งกว่าจานแก้ว [7] หรือเคลือบผิวจานแก้วด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงเพื่อเพิ่มความทนทานต่อรอยขีดข่วนโดยจะส่งผลให้จานแก้วมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height ลงได้ โดยที่วิธีการเพิ่มอายุการใช้งานด้วยวิธีการเคลือบผิวจานแก้วด้วยวัสดุเคลือบผิวที่มีความแข็งแรงนั้นถ้าสามารถเลือกความหนาของชั้นของวัสดุที่นำมาเคลือบผิวได้อย่างเหมาะสมยังจะส่งผลต่อการเพิ่มความไว (Sensitivity) ในการวัด Flying height ได้อีกด้วย [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วในเครื่อง Flying height tester โดย การใช้วัสดุเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรง
2. ศึกษาผลของการเคลือบผิวจานแก้วที่มีต่อความไวในการวัด Flying height

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างดิสก์ต้นแบบโดยการเคลือบด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงเช่น DLC ด้วยวิธี Ion beam deposition
2. ประเมินผลของดิสก์ต้นแบบโดยการตรวจสอบคุณลักษณะในด้านต่าง ๆ เช่น อายุการใช้งาน ธรรมชาติหักเห และการนำไปใช้งานจริงเป็นต้น
3. การพัฒนาจานแก้วที่มีความไว (Sensitivity) ในการวัด Flying height เพิ่มขึ้นโดยการ Optimization ความหนาของฟิล์มที่นำมาเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดต้นทุนของบริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในส่วนของจานใส่ที่ใช้ในเครื่อง Flying height tester ลงได้และสามารถลดจำนวนครั้งที่ใช้ในการเปลี่ยนจานแก้ว
2. สามารถเพิ่มความไวของเครื่องวัดได้จากการเคลือบจานแก้วด้วยวัสดุที่นำมาเคลือบที่มีความหนาที่เหมาะสม

1.5 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

1.5.1 การศึกษาแนวทางการเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้ว

ทำการศึกษาแนวทางต่างๆที่สามารถเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วได้เช่น การเลือกวัสดุที่มีความแข็งแรงและโปร่งใสมาเคลือบจานแก้วและเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมที่สุด

1.5.2 การพัฒนากระบวนการในการสร้างดิสก์ต้นแบบ

ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการในการสร้างดิสก์ต้นแบบที่สามารถสร้างดิสก์ที่ใช้งานได้ โดยทำการปรับเปลี่ยนกระบวนการตามผลการทดสอบจากการนำดิสก์ไปใช้งานในเครื่องวัด Flying height

1.5.3 การวัดดรรชนีหักเหและความหนาของฟิล์มเพื่อคำนวณอัตราการปลูกฟิล์ม

ทำการแยกปลูก DLC และซิลิกอนฟิล์มบนเวเฟอร์ซิลิกอนจากนั้นทำการวัดความหนาของฟิล์มด้วยเครื่อง Atomic force microscope และวัดดรรชนีหักเหของแต่ละฟิล์มด้วยเครื่อง Ellipsometer

1.5.4 การทดลองเคลือบผิวงานแก้วด้วย DLC ความหนาต่าง ๆ แล้วทดสอบการบินของหัวอ่าน/เขียนในเครื่อง Flying height tester เพื่อทดสอบความแข็งแรงของฟิล์มเบื้องต้น

ทำการเคลือบผิวงานแก้วด้วย DLC ฟิล์มที่มีความหนาต่างๆเช่น 3.5 และ 7 นาโนเมตร และนำงานแก้วที่เคลือบแล้วไปใช้ในเครื่องวัด Flying height เพื่อทดสอบว่าความแข็งแรงของฟิล์มที่ปลูกขึ้นว่าสามารถทนทานต่อการชนของหัวอ่าน/เขียนได้หรือไม่โดยตรวจสอบจากภาพถ่ายของผิวหน้าที่ใช้ทำการบินของหัวอ่าน/เขียน (Air bearing surface, ABS) และตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์

1.5.5 ทดสอบถึงผลของซิลิกอนที่มีต่ออายุการใช้งานและการมองเห็น pole-tip

ทำการเคลือบผิวงานแก้วด้วย DLC โดยมีชั้นของซิลิกอนที่มีความหนาแตกต่างกันคือ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาโนเมตรเพื่อทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่ออายุการใช้งานทั้งเชิงคุณภาพโดยการวัดความสามารถในการยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่าง DLC ฟิล์มกับงานแก้วและเชิงปริมาณด้วยการเก็บข้อมูลทางสถิติจากนั้นทดสอบการมองเห็น Pole-tip ในเครื่อง Flying height tester ว่าโปรแกรมสามารถหาตำแหน่งของ Pole-tip ได้ด้วยตัวเองหรือไม่

1.5.6 การ Optimization ความหนาของฟิล์มที่สามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด

ทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณ Sensitivity ของความเข้มแสงของงานแก้วที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC ฟิล์มที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง 100 นาโนเมตรและทำการ Optimization เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มที่สามารถให้ Sensitivity ในการวัดได้ดีที่สุด

1.5.7 การเคลือบผิวงานแก้วตามความหนาที่สามารถคำนวณได้ตามหัวข้อ 1.5.6

1.5.8 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.5.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยทั้งหมด 8 บท โดยบทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของงานวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งต้องการที่จะเพิ่มอายุการใช้งานและปรับปรุงความไวในการวัด Flying height ของจานแก้ว บทที่ 2 จะกล่าวถึงการทำปรีทัศน์วรรณกรรมเพื่อรวบรวมข้อมูลที่สำคัญต่อการทำวิทยานิพนธ์ เช่น การวัด Flying height, วิธีการปลูกฟิล์มแบบต่างๆ และ ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการสร้างดิสก์ต้นแบบที่เคลือบผิวหน้าด้วยซิลิกอนและคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC: Diamond-like-carbon) เนื่องจากซิลิกอนมีผลต่อการมองเห็น pole-tip และความแข็งแรงของดิสก์ ซึ่งในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการทดสอบด้านความหนาของซิลิกอนของดิสก์ต้นแบบที่มีผลต่อการมองเห็น Pole-tip และความแข็งแรงของดิสก์ โดยการนำไปทดสอบความทนทานโดยใช้การทดสอบรอยขีดข่วน (Wear test) และการนำไปใช้ในเครื่องวัด Flying height เพื่อทดสอบความชัดเจนของ Pole-tip ส่วนบทที่ 5 จะกล่าวถึงการวัดอายุการใช้งานของดิสก์โดยนำไปทดสอบใช้งานจริงในเครื่องวัด Flying height เพื่อวัดอายุการใช้งานเปรียบเทียบกับจานแก้ว โดยบทที่ 6 จะกล่าวถึงขั้นตอนในการประยุกต์ใช้ดิสก์ที่สร้างขึ้นให้สามารถใช้วัด Flying height ได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากดิสก์ที่พัฒนาขึ้นทำให้ความไวในการวัด Flying height เปลี่ยนแปลงไปซึ่งในบทที่ 7 จะกล่าวถึงการปรับปรุงความไวในการวัด Flying height ของดิสก์โดยการเคลือบผิวดิสก์ด้วยความหนาของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่มีความเหมาะสม และ บทสรุปของผลงานวิจัยจะกล่าวไว้ในบทที่ 8

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วที่ใช้ในเครื่องวัด Flying height และการเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นในการที่จะสามารถทำงานวิจัยให้บรรลุจุดประสงค์ได้นั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเช่น ส่วนประกอบต่างๆของฮาร์ดดิสก์ในหัวข้อที่ 2.1 เพื่อที่จะทราบถึงชื่อเรียกของส่วนประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและหลักการทำงานเบื้องต้นของฮาร์ดดิสก์ จากนั้นเพื่อที่จะทราบถึงข้อจำกัดในการเลือกแนวทางที่จะใช้ปรับปรุงจานแก้วเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานและ Sensitivity ได้จึงต้องศึกษาในส่วนของหลักการในการวัดและคำนวณ Flying height ของเครื่องวัด Flying height ในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งหลังจากกำหนดแนวทางได้แล้วจึงทำการศึกษาในส่วนของวัสดุที่จะนำมาใช้ในหัวข้อที่ 2.3 และวิธีที่จะใช้ในการสร้างดิสก์ตามแนวทางที่กำหนดในหัวข้อที่ 2.4 ซึ่งจานแก้วหลังจากผ่านการปรับปรุงอายุการใช้งานและ Sensitivity แล้วยังต้องสามารถนำมาใช้วัด Flying height ได้อย่างถูกต้องด้วยซึ่งจากการศึกษาในส่วนของหลักการในการวัด Flying height นั้นพบว่าค่าดรรชนีหักเหของจานแก้วนั้นมีผลต่อความถูกต้องในการวัด Flying height ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาในส่วนของการวัดดรรชนีหักเหโดยใช้เครื่องมือในการวัดในข้อที่ 2.5 จากนั้นทำการศึกษาในส่วนของการทดสอบความแข็งแรงเพื่อที่จะวัดอายุการใช้งานของจานแก้วเปรียบเทียบกับจานแก้วที่ผ่านการปรับปรุงอายุการใช้งานแล้วในหัวข้อที่ 2.6

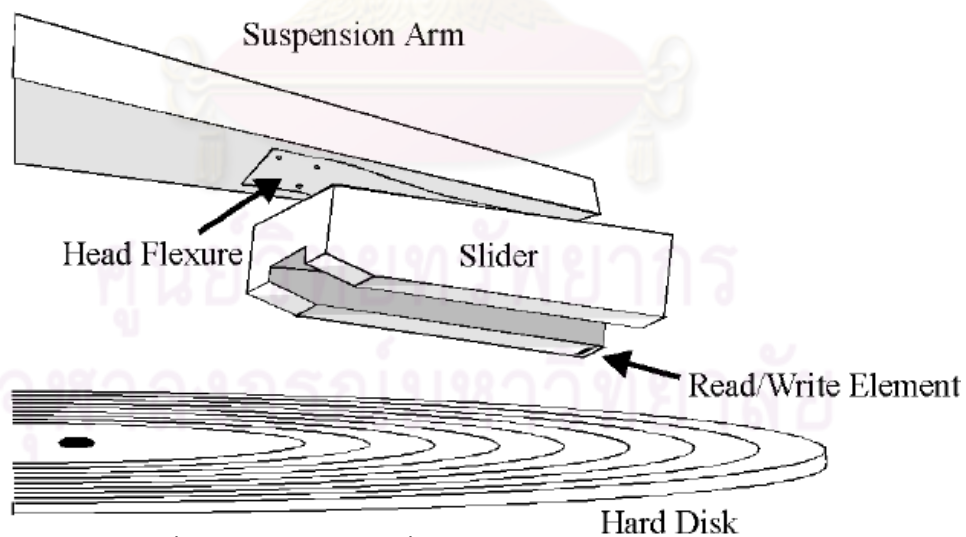
2.1 ฮาร์ดดิสก์

2.1.1 ส่วนประกอบสำคัญของฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการอ่านและเขียนข้อมูล

ฮาร์ดดิสก์คืออุปกรณ์ที่สำคัญใช้เก็บข้อมูลซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่านมาเธอร์บอร์ด (Mother board) ทำให้ผู้ใช้สามารถบันทึกข้อมูลต่างๆเช่น ไฟล์เพลง ไฟล์รูปภาพ หรือ ไฟล์เอกสารสำคัญอื่นๆ [8] ได้ลักษณะโดยรวมของฮาร์ดดิสก์ได้แสดงไว้ดัง รูปที่ 2.1 [9] ฮาร์ดดิสก์ประกอบด้วยส่วนสำคัญในการอ่านและเขียนข้อมูลคือหัวอ่าน/เขียน (Head-slider) และแผ่นจานแม่เหล็ก (Magnetic disk, platter) ซึ่งตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กได้แสดงไว้ดัง รูปที่ 2.2 [10]



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ [9]



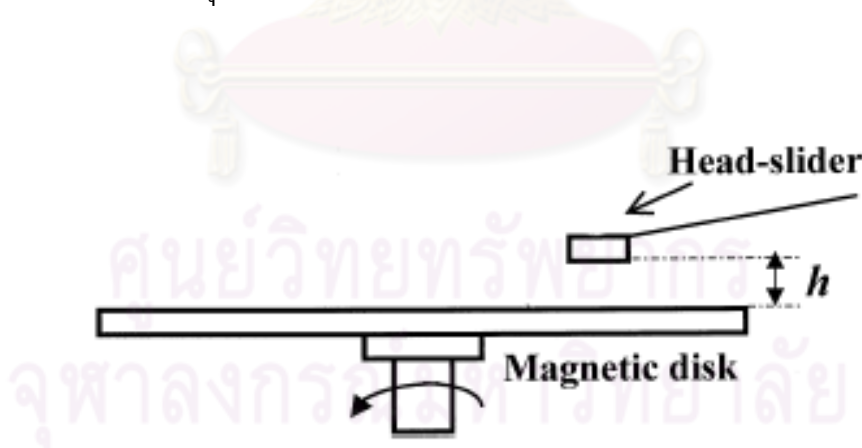
รูปที่ 2.2 หัวอ่าน/เขียนที่บินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็ก [10]

จะเห็นได้ว่าหัวอ่าน/เขียนจะบินอยู่บนแผ่นจานแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็ว 5400 ถึง 7200 รอบต่อนาที [11] ซึ่งการหมุนอย่างรวดเร็วของแผ่นจานทำให้หัวอ่าน/เขียนแยกห่างจาก

ผิวงานด้วยแรงดันที่เกิดจากอากาศที่ไหลผ่านหัวอ่าน/เขียน [12] ในขณะที่อ่านและเขียนข้อมูล โดยระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กหรือเรียกว่า Flying height

2.2 การวัดระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็ก

Flying height หรือระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กไดอะแกรมแสดงถึง Flying height แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 [13] ซึ่ง Flying height นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากโดยที่ฮาร์ดดิสก์จะสามารถอ่านหรือบันทึกข้อมูลได้ก็ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์นี้ยิ่งไปกว่านั้น Flying height ยังสำคัญต่อการเพิ่มความจุการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ โดยที่ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ส่วนมากจะมี Flying height ต่ำกว่า 25 นาโนเมตรและมีแนวโน้มว่าจะลดลงไปที่ 5 ถึง 10 นาโนเมตรในอนาคตเพื่อที่จะเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูลต่อแผ่นจานแม่เหล็ก เมื่อระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กนั้นใกล้กันมากการสัมผัสหรือชนกันของหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในขณะการทำงานของฮาร์ดดิสก์ เพราะจะทำให้อายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ลดลงดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัด Flying height อย่างแม่นยำทั้งในกระบวนการออกแบบและกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ [5] เครื่องวัด Flying height ในปัจจุบันจะใช้จานแก้วใสแทนแผ่นจานแม่เหล็กและวัด Flying height จากการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงระหว่างจานแก้วและหัวอ่าน/เขียนซึ่งหนึ่งในวิธีการวัด Flying height ที่นิยมในอุตสาหกรรมคือ Intensity interferometry [6]

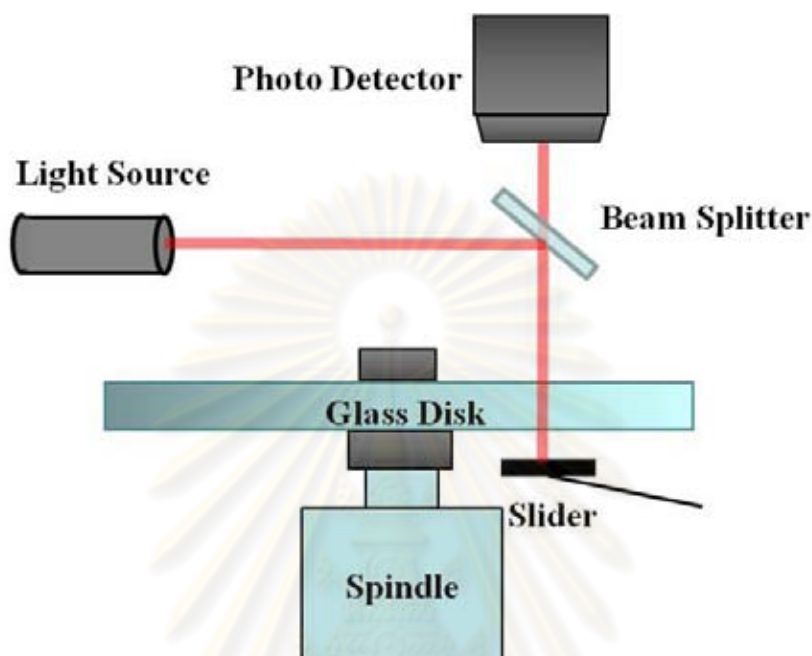


รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมแสดงถึง Flying height หรือความสูง (h) ที่หัวอ่าน/เขียนบินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็ก [13]

2.2.1 เครื่องวัด Flying height แบบ Intensity interferometry

เครื่องวัด Flying height แบบ Intensity interferometry มีลักษณะและอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.4 [6] โดยจะจำลองลักษณะการบินของหัวอ่าน/เขียนในการใช้งานจริงของฮาร์ดดิสก์แต่ใช้งาน

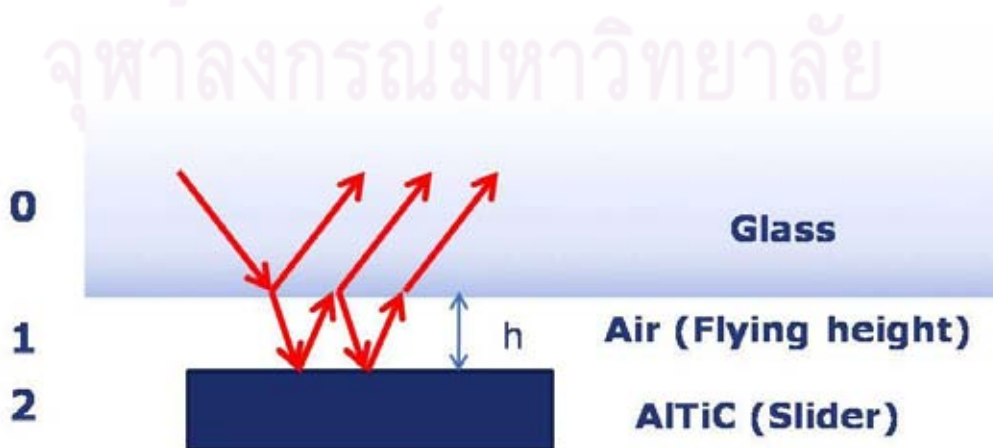
แก้วใสแทนแผ่นจานแม่เหล็กแสงจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนที่ผิวของจานแก้วและหัวอ่าน/เขียน และกลับมาที่ Photo detector เพื่อทำการวิเคราะห์และวัด Flying height จากปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว [14]



รูปที่ 2.4 ใต้อะแกรมของเครื่องวัด Flying height แบบ intensity interferometry

2.2.2 การคำนวณ Flying height ด้วยวิธี Intensity interferometry เมื่อใช้จานแก้ว [6]

จากรูปที่ 2.4 [6] แสงที่ใช้ในการวัดเป็นแสงที่ทำมุมตั้งฉากกับผิวของจานแก้วซึ่งที่รอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้วแสงจะสะท้อนกลับไปที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 โดยที่จะพิจารณาแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากรอยต่อ (Interface) ระหว่างชั้นของแก้วและอากาศกับรอยต่อของชั้นอากาศและหัวอ่าน/เขียน (AITiC Slider)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการสะท้อนของแสงที่รอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว

ซึ่งในกรณีนี้ความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาจากรอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) ซึ่งสามารถดูที่มาของสมการเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

$$I_s = I_0 \left[\frac{r_{01} + r_{12} e^{2i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{2i\beta_1}} \right]^2 \quad \text{--- (2.1)}$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\beta_1 = 2\pi \left(\frac{h}{\lambda} \right) n_1 \quad \text{--- (2.2)}$$

$$r_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad \text{--- (2.3)}$$

$$r_{12} = \frac{n_1 - (n_2 + ik_2)}{n_1 + (n_2 + ik_2)} \quad \text{--- (2.4)}$$

โดยที่ h คือ Flying height

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

n_0 คือ ดรรชนีหักเหของจานแก้ว

n_1 คือ ดรรชนีหักเหของอากาศ

$n_2 + ik_2$ คือ ดรรชนีหักเหของหัวอ่าน/เขียน

r_{01} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่บริเวณจานแก้วและอากาศ

r_{12} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่บริเวณอากาศและหัวอ่าน/เขียน

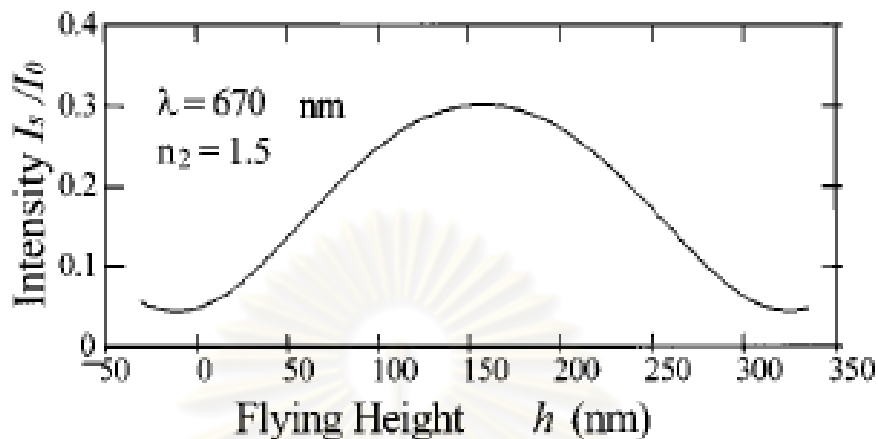
β_1 คือ การเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจากแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ 1

I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบบนจานแก้ว

I_s คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากรอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว

กำหนดให้ดรรชนีหักเหของของอากาศ จานแก้ว และ หัวอ่าน/เขียนเป็น 1, 1.5 และ $2.2+0.4i$ ตามลำดับและใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 670 นาโนเมตร Flying height อยู่ในช่วง 0 ถึง 350 นา

โนเมตร ซึ่งผลของการคำนวณแสดงไว้ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Flying height กับ อัตราส่วนความเข้มแสง ($\frac{I_s}{I_0}$) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 [6]



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flying height กับ อัตราส่วนความเข้มแสง [6]

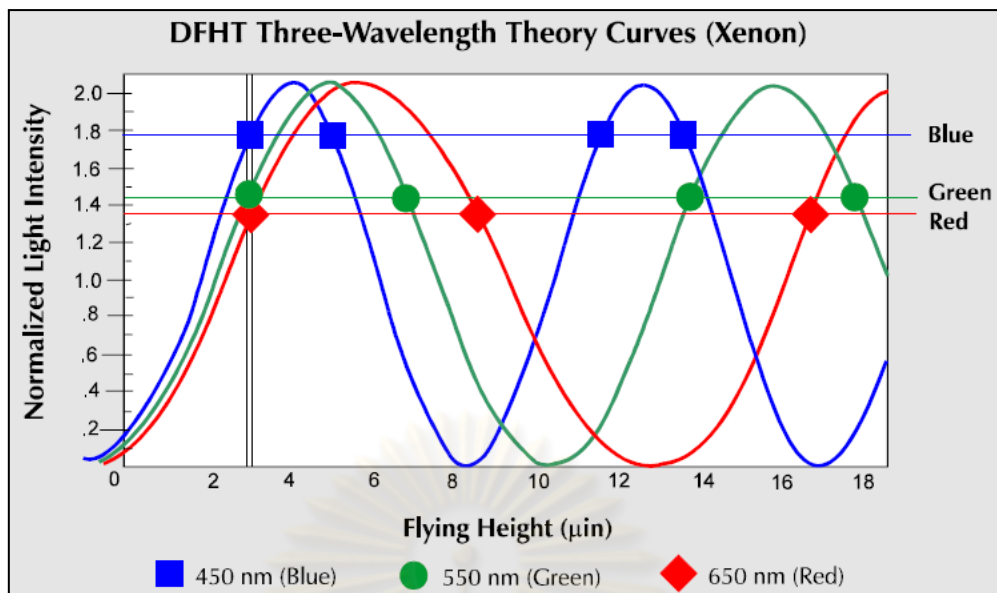
ซึ่งในปัจจุบันนั้นเครื่องวัด Flying height แบบ Interferometry ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสก์นั้นจะมีความซับซ้อนกว่านี้มากเช่นเครื่องวัด Flying height รุ่น DFHT5 (Dynamic flying height tester) ของบริษัท KLA-Tencor ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยที่ไดอะแกรมของ เครื่องวัดแสดงไว้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเครื่องวัดนี้จะใช้หลักการของ Three wavelength interferometry ในการวัด Flying height โดยจะวัดการแทรกสอดของความเข้มแสงของแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน 3 ความยาวคลื่น (450, 550 และ 650 นาโนเมตร) ซึ่งจะให้ ความแม่นยำในการวัดมากกว่าเครื่องวัด Flying height แบบ Interferometry ที่ใช้ความยาวคลื่นเดียว โดยปกติแล้วการวัด Flying height นั้นจะใช้งานแก้วในการวัดซึ่งต้องใส่ค่าดรรชนีหักเหของงาน แก้วทั้ง 3 ความยาวคลื่นก่อนทำการวัด โดยที่เครื่องวัด Flying height จะทำการสร้างเส้นโค้ง ของความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height (Theory curve) ในขั้นตอนของการ Calibration โดยการคำนวณทางทฤษฎีดังที่ได้อธิบายไว้แล้วซึ่งจะใช้ ค่าดรรชนีหักเหของงานแก้วในการคำนวณ หลังจากนั้นในขั้นตอนของการวัดเครื่องวัดจะทำการ วัดความเข้มแสงตามตำแหน่งของ ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ได้กำหนดไว้ (ในกรณีนี้เครื่องวัดใช้ แสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน 3 ความยาวคลื่นในการวัดจึงทำให้ค่าความเข้มแสงที่อ่านมา ได้มี 3 ค่า) และนำความเข้มแสงที่อ่านค่าได้มาเปรียบเทียบกับ Theory curve โดยสามารถอ่าน ค่า Flying height ได้จากจุดตัดกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและ Theory curve ดังที่แสดง ไว้ในรูปที่ 2.8 โดยจะเห็นว่าข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดของทั้ง 3 ความยาวคลื่นที่วัด

เป็นเส้นตรงจะตัดกับ Theory curve หลายจุด ซึ่งอัลกอริทึมในเครื่องวัด Flying height จะพิจารณาจุดตัดของทั้ง 3 ความยาวคลื่นที่มีค่า Flying height ใกล้เคียงกันมากที่สุดเป็นค่า Flying height ของตำแหน่งนั้นๆบน ABS ซึ่งจากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าจุดตัดของทั้ง 3 ความยาวคลื่นจะใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ค่า Flying height ประมาณ 3 ไมโครนิว ซึ่งก็คือค่า Flying height ของตำแหน่งที่ทำการวัด [15]



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมของเครื่องวัด Flying height DFHT5 ของบริษัท KLA-Tencor [15]

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมในแปลงค่าความเข้มแสงเป็นค่า Flying height โดยใช้หลักการ Three wavelength inteferometry [15]

2.3 คุณสมบัติของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใส

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วที่ใช้ในเครื่องวัด Flying height โดยมีแนวทางในการปรับปรุง 2 แนวทางคือ 1. การเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำจานแก้วให้มีความแข็งแรงขึ้นและ 2. การเคลือบจานแก้วด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง (ซึ่งได้เลือกแนวทางที่ 2 ในภายหลัง เนื่องจากแนวทางแรกนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงมากในการสร้างจานแก้วจากวัสดุทางเลือก) และมีเงื่อนไขคือดิสก์ที่ผ่านขั้นตอนการปรับปรุงความแข็งแรงทั้ง 2 วิธีนั้นต้องสามารถวัด Flying height ได้ถูกต้องด้วยดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้แทนหรือเคลือบจานแก้วนั้นต้องยอมให้แสงเดินทางผ่านได้เนื่องจากเครื่องวัด Flying height นั้นใช้หลักการทางแสงในการวัด ระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นแม่เหล็กซึ่งจากหลักการในการวัดที่ได้อธิบายไปแล้ว แสงจากแหล่งกำเนิดในเครื่องวัดนั้นต้องสามารถเดินทางผ่านจานแก้วและสะท้อนกลับจากหัวอ่าน/เขียนมายังเครื่องวัด Flying height ได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาความแข็งแรงของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใสที่สามารถให้ความโปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงในช่วง 450 ถึง 650 นาโนเมตรดังนี้

2.3.1 Fused silica (SiO₂) [16]

Fused silica คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) สังกะระห์ที่มีความบริสุทธิ์มากมีลักษณะไม่เป็นผลึก ไม่มีสี มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีคุณสมบัติทางแสงดีมากและ

โปร่งใสในหลายช่วงความยาวคลื่นแสงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) สามารถทนต่อการขีดข่วนและการช็อคทางความร้อน (Thermal shock) ได้

2.3.2 BK-7 (BK-7 Glass) [17]

BK-7 คือแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีซึ่งทำให้นิยมใช้กันในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น และช่วงอินฟราเรด (Infrared) เช่นการทำหน้าต่าง เลนส์ และ ปริซึมที่ใช้ใน Laser และอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ

2.3.3 Fused quartz (SiO₂) [18]

Fused quartz คือแก้วชนิดหนึ่งที่มีลักษณะการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมีลักษณะโปร่งใส มีคุณสมบัติทางด้านความร้อนและด้านแสงเหนือกว่าแก้วธรรมดาเนื่องจากความบริสุทธิ์ที่มากกว่าดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำโดยที่ Fused quartz มีความโปร่งใสในช่วงอัลตราไวโอเล็ตมากกว่าแก้วชนิดอื่นๆ

2.3.4 Sapphire (Al₂O₃) [19]

แซฟไฟร์ (Sapphire) คืออัญมณีประเภทคอร์ันดัม (Corundum) ซึ่งสีจะขึ้นอยู่กับแร่ที่ปะปนมารวมถึงชนิดที่ไม่มีสี เนื่องจากแซฟไฟร์มีความแข็งแรงมากจึงนิยมนำมาใช้ในการหลากหลายเช่น อุปกรณ์ทางด้านแสงอินฟราเรด นาฬิกา กระจกที่มีความทนทานสูง และเวเฟอร์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มประเภทสารกึ่งตัวนำ

2.3.5 DLC (Diamond-like carbon) [20]

DLC (Diamond-like carbon) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้อธิบายถึงฟิล์มคาร์บอนที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งประเภทของฟิล์มประกอบด้วยประเภท Hydrogen free DLC (a-C) Hydrogenate DLC (a-C:H) Tetrahedral amorphous carbon (ta-C) Hydrogenate tetrahedral amorphous carbon (ta-C:H) และมีประเภทอื่นๆเช่นพวกที่มีส่วนผสมของซิลิกอนซึ่งความแตกต่างของ DLC ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ผสมในแต่ละประเภท ความแข็งแรงของฟิล์มที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพันธะแบบ Sp³ DLC นิยมใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิว ซึ่งการเคลือบผิวด้วย DLC จะให้ความแข็งแรงมาก ทนทานต่อการสึกหรอและมีสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมนำมาเคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มความทนทาน

2.3.6 Zinc oxide (ZnO) [21]

Zinc Oxide คือสารประกอบอนินทรีย์โดยปกติจะพบในลักษณะของผงสีขาวไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติดังนี้ โปร่งใส เรืองแสงในอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้นิยมใช้ในการทำกระจกป้องกันความร้อน LCD (Liquid crystal display) และทำเป็นฟิล์ม LED (Light- emitting diodes)

2.3.7 Silicon nitride (Si_3N_4) [22]

Silicon nitride คือสารประกอบทางเคมีของซิลิกอนและไนโตรเจนซึ่งมีลักษณะเป็นเซรามิกแข็งมีความแข็งแรงสูงในหลายช่วงอุณหภูมิ มีสัมประสิทธิ์ทางความร้อนปานกลาง ซึ่ง Silicon nitride ฟิล์มนิยมใช้เป็นฉนวนในชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ซิลิกอนเป็นฐาน และใช้เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการตรวจจับ (Sensing path) ใน AFM (Atomic force microscope)

2.3.8 คุณสมบัติทางความแข็งแรงของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใส

โปร่งใสและจานแก้ว (จานแก้ว GD-FHT บริษัท OHARA เป็นผู้ผลิตและใช้อยู่ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และ ตารางความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใส แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 วัสดุและความแข็งแรงของวัสดุโปร่งใสและจานแก้ว

Material	Chemical formula	Hardness(GPa)
Fused silica [23]	SiO_2	6.4
BK-7 [23]	BK-7 Glass	5.6
GD-FHT [23]	N/A	5.9
Fused quartz [24]	SiO_2	10
Sapphire [25]	Al_2O_3	22.5

ตารางที่ 2.2 ความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใส

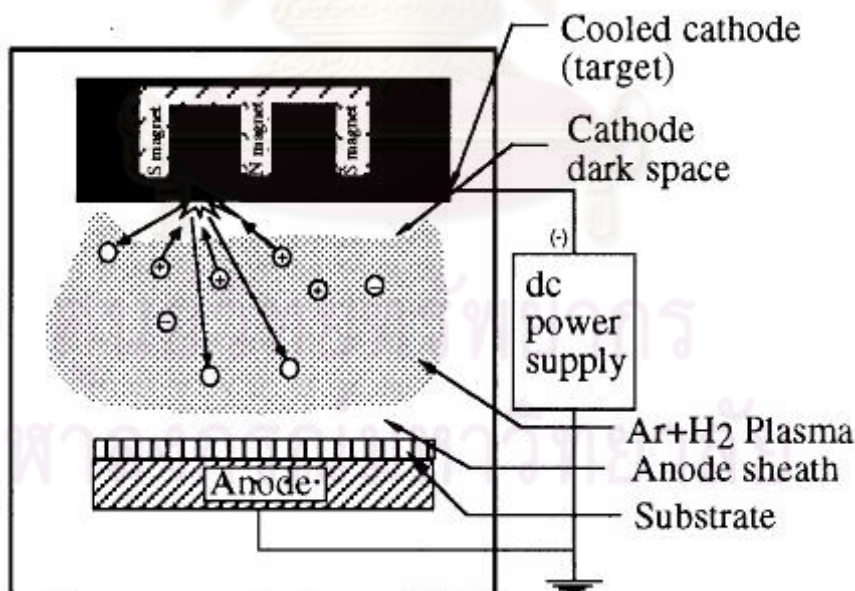
Coating Material	Deposition method	chemical formula	Hardness(GPa)
DLC [26]	Cathodic arc coating	a-C	24
	Ion beam coating	a-C:H	19
	ECR-CVD coating	a-C:H	22
	DC sputtered coating	a-C:H	15
Sapphire [27]	R.f. sputtering	Al ₂ O ₃	8.3
Zinc oxide [28]	R.f. sputtering	ZnO	8.7
Silicon nitride [29]	Chemical vapor deposition	Si ₃ N ₄	14.5

2.4 วิธีการปลูก DLC พิล์ม [20]

จากหัวข้อที่ 2.3 ในส่วนของการปรับปรุงอายุการใช้งานของงานแก้วด้วยการเคลือบผิวด้วยวัสดุเคลือบใสที่มีความแข็งแรงนั้นและจากตารางความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใสพบว่า DLC นั้นมีค่าความแข็งแรงมากที่สุดในวัสดุทางเลือกประกอบกับ DLC นั้นเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการนำมาเคลือบผิวหน้าของวัสดุเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อรอยขีดข่วนดังนั้นจึงเลือกทำการศึกษาวิธีที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม DLC ซึ่งมีวิธีการ Deposition มากมายที่สามารถใช้ในการปลูก DLC พิล์มได้ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฟิล์มจะถูกปลูกด้วยวิธี Plasma vapour deposition (PVD) หรือ Chemical vapour deposition (CVD) ซึ่งวิธีการที่แตกต่างกันในการปลูกฟิล์ม DLC เช่นทำให้มีพลังงานของประจุที่แตกต่างกัน (Ion energies) การเปลี่ยนแปลงก๊าซที่ใช้ (Precursor gas) ชนิดของวัสดุเป้าหมาย (Target material) หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะส่งผลให้ฟิล์มของ DLC มีคุณสมบัติที่หลากหลายตั้งแต่ฟิล์มชนิด a-C-H ที่นุ่มและลื่น ไปจนถึงฟิล์มชนิด ta-C ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชร ซึ่งจะอธิบายถึงตัวอย่างวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้ในการปลูกฟิล์ม DLC ดังต่อไปนี้

2.4.1 Sputtering

Sputtering เป็นวิธีที่ควบคุมการปลูกฟิล์ม DLC ได้ดีและนิยมใช้กันในกระบวนการอุตสาหกรรมไดอะแกรมของวิธีการปลูกฟิล์มแบบ Sputtering แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 ในกระบวนการ Sputtering ก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อาร์กอน (Argon) จะถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (Ionised) โดยอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากขั้ว Cathode ไอออน Ar^+ ถูกเร่งให้ไปที่ขั้ว Cathode และ Sputter สารเป้าหมายที่อยู่ขั้ว Cathode ออก กระบวนการ Sputtering ที่ใช้กันสำหรับ DLC คือ Dc diode sputtering หรือ Radio frequency (RF) sputtering นั้นจะ Sputters แกรไฟต์ได้จึงต้องมีการใช้วิธีการเพิ่มเติมเพื่อที่จะเพิ่มอัตราการปลูกฟิล์ม (Deposition rate) ซึ่งวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้กันคือ Unbalance magnetron sputtering ซึ่งในวิธีนี้จะมีแม่เหล็กวางอยู่ใต้แกรไฟต์ที่ขั้ว Cathode ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากขั้ว Cathode ซึ่งส่งผลให้เพิ่มอัตราการเกิด Plasma ionization โดยที่สนามแม่เหล็กจะถูกทำให้ไม่สมดุล (Unbalance) โดยการเรียงตัวของแท่งแม่เหล็กและจะเกิดสนามแม่เหล็กวางตัวข้าม Substrate ทำให้ไอออนของอาร์กอน bombard ที่ Substrate เช่นเดียวกันกับที่สารเป้าหมาย ซึ่งการ Bombard ของไอออนนี้ทำให้เกิดพันธะ sp^3 ขึ้นในฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นและมีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูงขึ้น

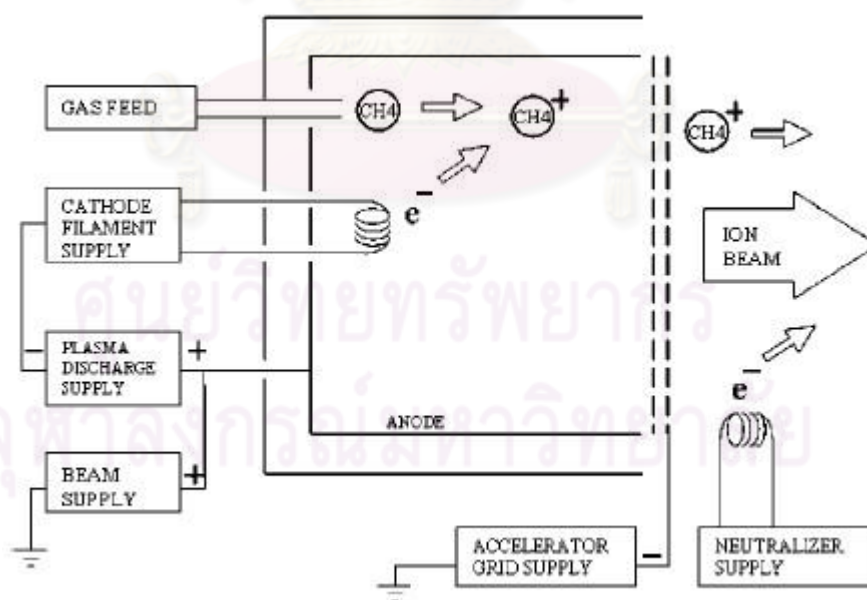


รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Sputtering [20]

2.4.2 Ion beam deposition

Ion beam deposition หรือ Ion beam sputtering จะใช้ลำอนุภาคของอาร์กอนไอออน (Beam of Argon ion) เพื่อที่จะ Sputter คาร์บอนออกจากแกรไฟต์ (Graphite target)

ไต่อะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Ion beam deposition แสดงไว้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือจะให้ฟิล์มที่มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามจะมีอัตราการปลูกฟิล์มที่ต่ำและฟิล์มจะมีความหนาแน่นต่ำเนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยในกระบวนการปลูกฟิล์ม อีกทั้งยังต้องมีการเตรียม Substrate ให้ดีเพื่อที่จะให้ได้ฟิล์มที่มีความราบเรียบ (Uniform film) กระบวนการ Ion beam สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้หลายวิธีเช่นการให้ความร้อนกับ Substrate หรือการปล่อยให้ปฏิกิริยา Bombardment ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวิธีการให้ความร้อนกับ Substrate อาจนำไปสู่การได้ฟิล์มที่ผิวดูปร่างหรือนิ่มซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ โดยที่วิธีการ Ion plating หรือวิธี Ion beam assisted deposition (IBAD) จะนิยมมากกว่า ในวิธีการ Ion plating จะมีการให้ประจุขนาดเล็กกับส่วนที่จะถูกเคลือบและอัตราส่วนของ Coating flux ที่ถูกทำให้เป็นไอออนจะแปรผันตรงกับ Flux ที่ผ่านเข้าไปให้กับพลาสมาหรือโดยการใช้ขดลวดความร้อนเพื่อที่จะสร้าง Flux ของอิเล็กตรอนให้กับระบบ ใน IBAD ลำอนุภาคของไอออนอาร์กอนที่ 2 จะใช้ Bombard ฟิล์มเพื่อช่วยให้ฟิล์มมีความหนาแน่นและสร้างพันธะ sp^3 ปฏิกิริยา Bombardment ของไอออนจะส่งผลให้ Substrate ร้อนดังนั้นจึงต้องมีความระมัดระวังในการควบคุมวิธีการนี้ โดยที่ IBAD ก็เป็นวิธีการปลูกฟิล์มที่ใช้กันในอุตสาหกรรม

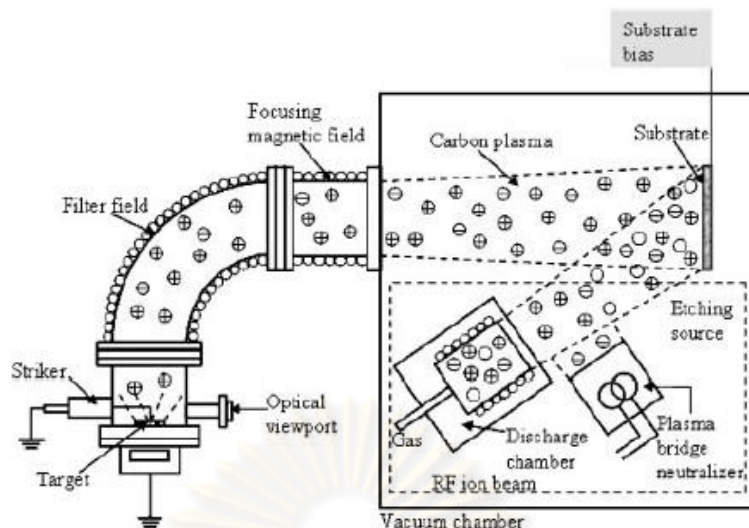


รูปที่ 2.10 ไต่อะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Ion beam deposition [20]

2.4.3 Cathodic arc

Cathodic arc เป็นวิธีที่ซับซ้อนที่สุดในการปลูกฟิล์ม DLC แต่มีข้อได้เปรียบคือฟิล์มมีคุณสมบัติทางกลที่ดีมากซึ่งวิธีการนิยมนี้นำใช้ในการปลูกฟิล์มในอุตสาหกรรม สำหรับฟิล์ม DLC แกรไฟต์ที่ขั้ว Cathode จะถูกชนด้วยคาร์บอนที่สูญญากาศจากนั้นก็เลยสูญญากาศออกเพื่อที่จะทำให้เกิด Arc ที่ปล่อยออกมาซึ่งส่งผลให้เกิดพลาสมาที่มีพลังงานและมีความหนาแน่นของไอออนสูงมาก ตำแหน่งของ Arc จะเกิดขึ้นที่ขั้ว Cathode โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 10 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงมากซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้เกิดพลาสมาแต่ยังปล่อยอนุภาคเล็กๆขนาดไมโครเมตรออกมาจากขั้ว Cathode ซึ่งเป็นผลให้เกิดความหยابขึ้นบนฟิล์มและทำให้ฟิล์มเสียหายเนื่องจากเกิดรอยแตกที่ขอบตามลำดับ การเกิดอนุภาคนี้อาจถูกทำให้หายไปโดยผลของกระบวนการ Explosive emission ซึ่งกำจัด Evaporant species จากพื้นผิวของขั้ว Cathode และพลาสมาจะถูกบังคับให้เดินทางผ่านที่กรองสนามแม่เหล็ก (Magnetic filter) เพื่อที่จะลดผลกระทบ โดยที่วิธีการนี้รู้จักกันในชื่อ Filtered cathodic vacuum arc (FCVA) โดยที่ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี FCVA แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11 ใน FCVA สนามไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic field) จะถูกสร้างขึ้นเนื่องจากพลาสมาอิเล็กตรอนหมุนวนเป็นวงรอบที่กรองสนามแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลให้เกิดการดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกให้เดินทางตามเส้นทางของที่กรองเนื่องจากอนุภาคเล็กๆไม่สามารถเดินทางตามเส้นทางได้ทำให้อนุภาคเหล่านี้เกาะติดตามผิวตลอดเส้นทางของที่กรอง วิธีการปลูกฟิล์มแบบ FCVA นั้นจะทำให้ได้คาร์บอนฟิล์ม (a-C) ที่มี Hardness, Young's modulus, Scratch resistance ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกฟิล์มแบบ Ion beam deposition และ Radio frequency sputtering

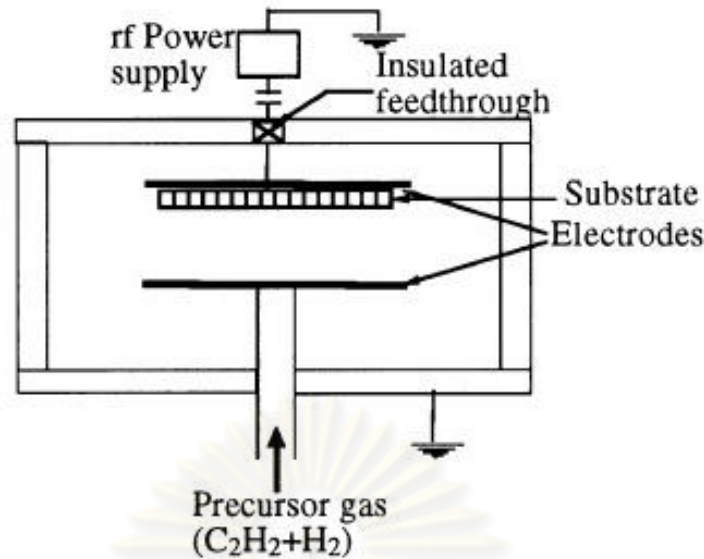
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 ไตอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Filtered cathodic vacuum arc [20]

2.4.4 Chemical vapour deposition

Chemical vapour deposition (CVD) เป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิสูงและกระบวนการทาง Thermochemical ซึ่งทำให้อุณหภูมิของ Substrate อยู่ในช่วง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ในกระบวนการ CVD ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นเหนือ Substrate ซึ่งสารเคมีจะแตกตัวออกและรวมตัวกันเพื่อที่จะสร้างฟิล์มบน Substrate กระบวนการ CVD จะให้ฟิล์มที่มีความราบเรียบ (Uniform) มีความแข็งแรงสูง (Hardness) และมีการยึดติดที่ดี (Adhesion) อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดคือไม่สามารถปลูกฟิล์มที่หนาเกิน 10 ไมโครเมตรได้ เนื่องจากความแตกต่างของการขยายตัวทางความร้อนทำให้เกิดความเครียดสูง (Stress) และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทำให้วิธี CVD สามารถปลูกฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำๆได้ โดยที่ไตอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี PECVD แสดงไว้รูปที่ 2.12 PECVD นั้นเป็นวิธีการปลูกฟิล์มที่รวมกันระหว่างกระบวนการ CVD และการกระตุ้นด้วยพลังงานอิเล็กตรอน (Energetic electron 100-300 eV) ภายในพลาสมา โดยทั่วไปแล้วกระบวนการ PECVD จะใช้ความดัน 0.01 ถึง 5 torr



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Plasma enhanced chemical vapour deposition [26]

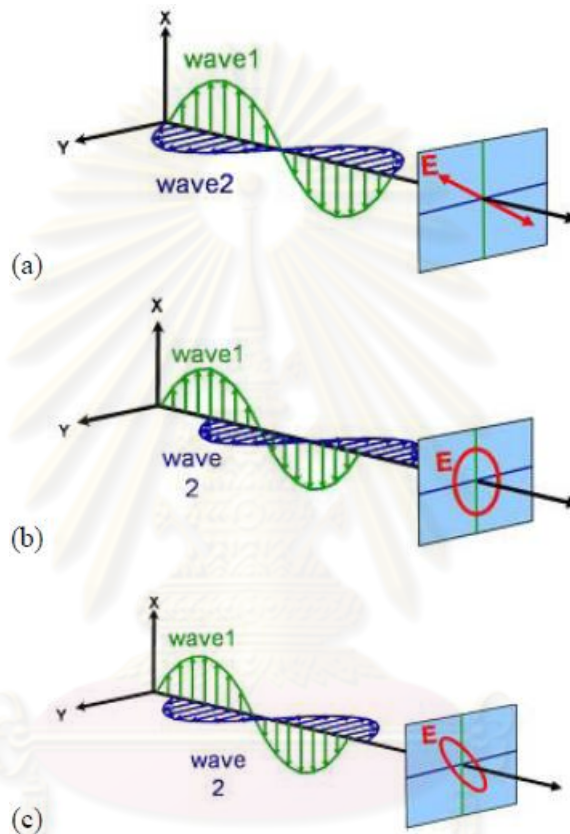
2.5 การวัดดรรชนีหักเหของวัสดุเคลือบใส

การวัดดรรชนีหักเหของวัสดุเคลือบใสสามารถวัดโดยใช้เครื่องวัด Ellipsometry ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน (Polarization) ของแสงเนื่องจากแสงสะท้อนหรือเดินทางผ่านวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude ratio, Δ) และความแตกต่างของเฟส (Phase difference, ψ) ซึ่งการวัดจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติเชิงแสงของวัสดุ (Optical properties) ดังนั้น Ellipsometry จึงนิยมใช้ในการวิเคราะห์ความหนาและดรรชนีหักเหของฟิล์มซึ่งสามารถวัดฟิล์มที่ความหนาในระดับนาโนเมตรได้ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น Biosensor สารกึ่งตัวนำ และ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ในการวัดคุณสมบัติของฟิล์มต่างๆ เช่น โลหะ สารกึ่งตัวนำ สารอินทรีย์ และ วัสดุผสม [30]

2.5.1 Polarization ของแสง

แสงโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใน Ellipsometry จะอธิบายถึงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงว่า Polarization สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจะตั้งฉากกับทิศทางที่แสงเดินทางเสมอ ดังนั้นถ้าแสงเดินทางไปแกน Z สนามไฟฟ้าก็จะอยู่ในทิศทางแกน X และแกน Y ในกรณีที่แสงมีการวางตัวแบบสุ่มทั้งทิศทางและเฟสจะพิจารณาว่าเป็นแสงที่ Unpolarized สำหรับ Ellipsometer ซึ่งสนใจแสงที่เรียงตัวอย่างมีทิศทางและวางตัวเป็นรูปร่างที่ชัดเจนในทุกๆตำแหน่งซึ่งเรียกว่าแสงที่ Polarized ในกรณีที่สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉาก

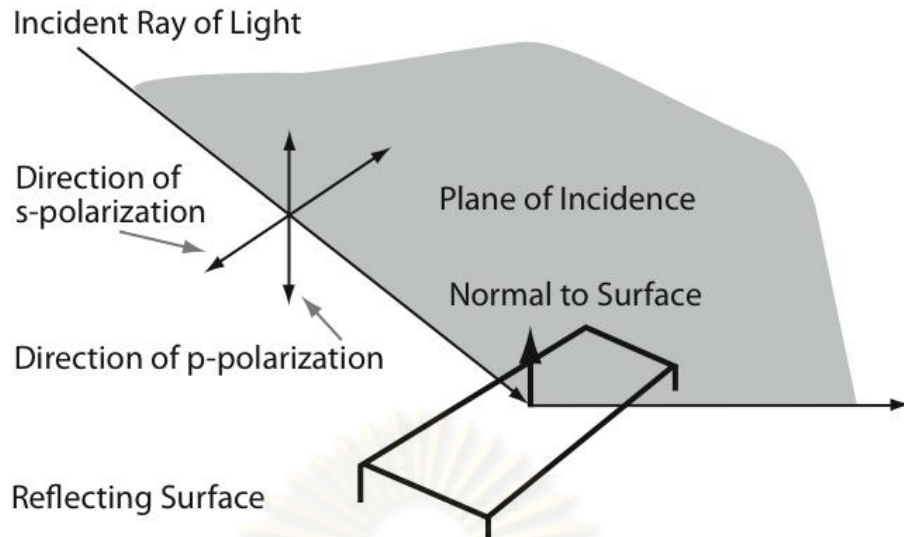
กันมีเฟสเท่ากันจะเรียกแสงประเภทนี้ว่า Linear polarized ส่วนแสงที่มีสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกัน มีเฟสต่างกัน 90 องศาและมีแอมพลิจูดเท่ากันจะเรียกว่า Circularly polarized ในกรณีที่ สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันมีทั้งเฟสและแอมพลิจูดต่างกันซึ่งเป็นลักษณะที่ธรรมดาที่สุดของ Polarization เรียกว่า Elliptical polarized ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ Ellipsometry ซึ่งลักษณะต่างๆ ของ Polarization ที่อธิบายไปแล้วแสดงไว้ดังรูปที่ 2.13 [30]



รูปที่ 2.13 ลักษณะต่างๆของ Polarization โดยที่ a) คือ Linear polarization b) คือ Circularly polarization และ c) คือ Elliptical polarization [30]

2.5.2 p- และ s-polarization

รูปที่ 2.14 [31] แสดงถึงการสะท้อนของแสงบนผิวของวัตถุ เมื่อแสงสะท้อนหรือผ่าน ทะลุวัตถุในลักษณะทำมุมเอียงแสงจะถูกแบ่งออกเป็นคลื่นแสง p- และ s-polarization ซึ่งขึ้นกับ ทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าซึ่ง p- และ s-polarization จะมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าที่ แตกต่างกันใน p-polarization คลื่นสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบและสะท้อนจะมีทิศทางการ สั่นอยู่ในระนาบเดียวกันซึ่งเรียกระนาบนี้ว่าระนาบตกกระทบ (Plane of incident) [32] ส่วน s- polarization จะมีคลื่นสนามไฟฟ้าของแสงที่สะท้อนและตกกระทบอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับ ระนาบตกกระทบ [33]



รูปที่ 2.14 การสะท้อนของ p- และ s-polarization [31]

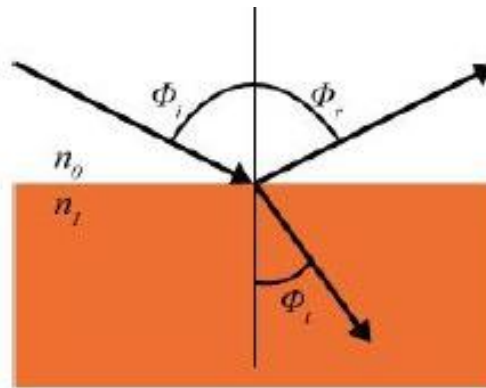
โดยที่ทั้ง p- และ s-polarization และนั่นเป็นอิสระต่อกันและสามารถคำนวณแยกกันได้ ซึ่ง Fresnel ได้อธิบายถึง p- และ s-polarization ของแสงที่สะท้อนบนผิววัตถุไว้ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6) และ p- และ s-polarization ของแสงที่เดินทางผ่านทะลุวัตถุไว้ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) โดยที่ความหมายของตัวแปรต่างๆในสมการได้อธิบายไว้ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ r คือแอมพลิจูดของคลื่นแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างชั้นตัวกลางและ t คือแอมพลิจูดของคลื่นแสงที่เดินทางผ่านทะลุรอยต่อระหว่างชั้นตัวกลาง ส่วนตัวห้อย p และ s แสดงถึง p- และ s-polarization

$$r_s = \frac{n_0 \cos \phi_i - n_1 \cos \phi_t}{n_0 \cos \phi_i + n_1 \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.5)}$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos \phi_i - n_0 \cos \phi_t}{n_0 \cos \phi_i + n_1 \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.6)}$$

$$t_s = \frac{2n_0 \cos \phi_i}{n_0 \cos \phi_i + n_1 \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.7)}$$

$$t_p = \frac{2n_0 \cos \phi_i}{n_0 \cos \phi_i + n_1 \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.8)}$$

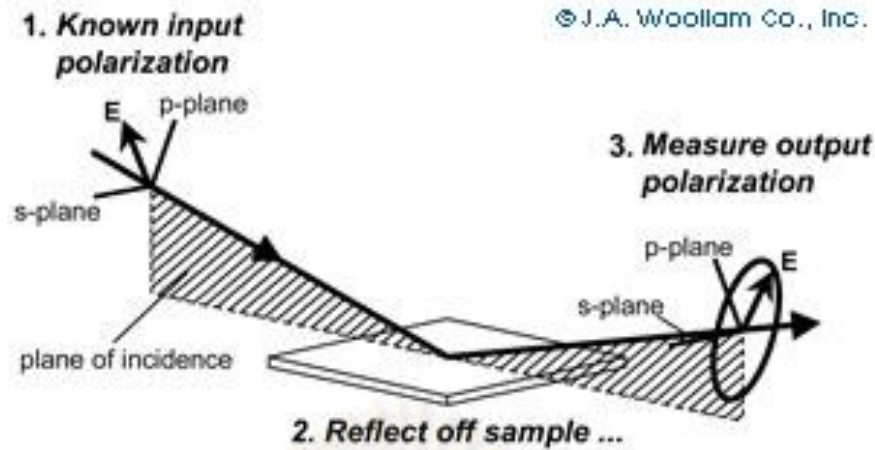


รูปที่ 2.15 ความหมายของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในสมการที่ (2.5) ถึง (2.8) [30]

2.5.3 หลักการทำงานของ Ellipsometry

Ellipsometry จะวัดการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของ p- และ s-polarization ของแสงซึ่งจะใช้แสงอ้างอิงซึ่งรู้ Polarization ในการวัดเมื่อแสงอ้างอิงสะท้อนหรือเดินทางผ่านวัสดุตัวอย่างซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarization ซึ่ง Ellipsometry จะวัดแสงที่เปลี่ยนแปลง Polarization เปรียบเทียบกับแสงอ้างอิง โดอะแกรมของการวัด Ellipsometry แสดงไว้ดังรูปที่ 2.16 [30] แสงที่ตกกระทบเป็นแบบ Linear polarized ซึ่งเรียกว่าแสงที่รู้ Polarized เมื่อแสงที่รู้ Polarized สะท้อนออกจากผิวของวัตถุทำให้แอมพลิจูดและเฟสของ p- และ s-polarized ของแสงเป็นลักษณะ Elliptical polarized ซึ่ง Ellipsometry จะวัดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด (Δ) และเฟส (ψ) ของ p- และ s-polarized ซึ่งการเปลี่ยนแปลง Polarization ของแอมพลิจูดของแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างตัวกลางสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (2.9) โดยที่ ρ คือการเปลี่ยนแปลง Polarization, Δ คืออัตราส่วนความเข้มแสงและ ψ คือความแตกต่างของเฟส [30]

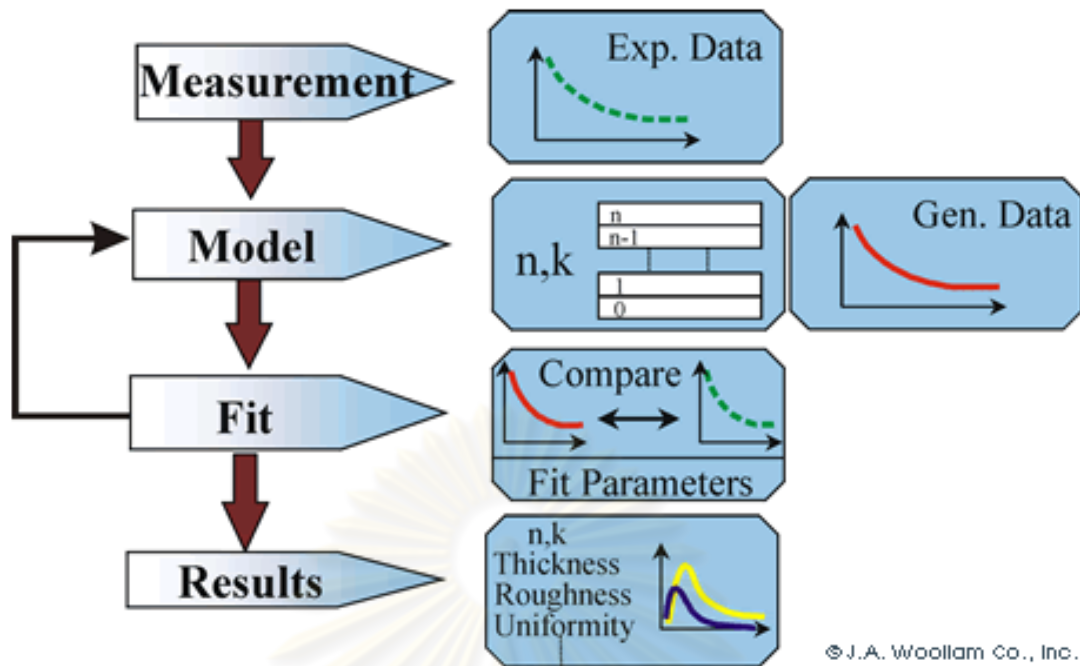
$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi)e^{i\Delta} \quad \text{--- (2.9)}$$



รูปที่ 2.16 ลักษณะของ Ellipsometry ทั่วไป [30]

2.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลของ Ellipsometry [30]

Ellipsometry จะวัดการเปลี่ยนแปลง Polarization ของแสง ซึ่งในการวัดนั้นจะใช้แสงความยาวคลื่นหลายค่า และมีมุมที่ใช้ในการวัดคงที่หรือหลายมุม เพื่อระบุคุณสมบัติของชั้นงานที่วัด เช่น ความหนาของฟิล์ม, ค่าดัชนีหักเหของวัสดุแต่ละชั้น และความหยาบของพื้นผิว ซึ่งกระบวนการทั่วไปที่ Ellipsometry ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุแสดงไว้ดังแผนผังในรูปที่ 2.17 [30] โดยมีขั้นตอนดังนี้ หลังจากที่ได้ทำการวัดชั้นงานตัวอย่างแล้วแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นมาเพื่ออธิบายลักษณะของชั้นงานตัวอย่างซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้ในการคำนวณและทำนายผลจากสมการ Fresnel's (Fresnel's equation) ซึ่งอธิบายถึงความหนา, ค่าดัชนีหักเหของวัสดุแต่ละชั้น และความหยาบของพื้นผิว ซึ่งถ้าไม่รู้ค่าเหล่านี้ Ellipsometry จะทำการประมาณค่าเริ่มต้นเพื่อจุดประสงค์ในการคำนวณเบื้องต้นซึ่งค่าที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุที่ไม่รู้ค่า เช่น ความหนา ดรรชนีหักเหและความหยาบของพื้นผิวเพื่อที่จะปรับปรุงความเข้ากันของข้อมูลจากการคำนวณและการวัด โดยทั่วไปในการหาความเข้ากันที่ดีที่สุดของข้อมูลจากการคำนวณและจากการวัดจะใช้วิธี Regression ซึ่งใช้ ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) เป็นตัวพยากรณ์เพื่อปรับปรุงความแตกต่างระหว่างข้อมูลจากการคำนวณและข้อมูลจากการวัดให้ดีขึ้นซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่รู้ค่า เช่น ความหนา ดรรชนีหักเหและความหยาบจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้จนกว่าจะได้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด โดยที่คำตอบ (ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนา ดรรชนีหักเหและความหยาบ ที่ทำการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งได้ที่ MSE มีค่าน้อยที่สุด) ที่ถูกต้องที่สุดจะสัมพันธ์กับค่า MSE ที่น้อยที่สุด



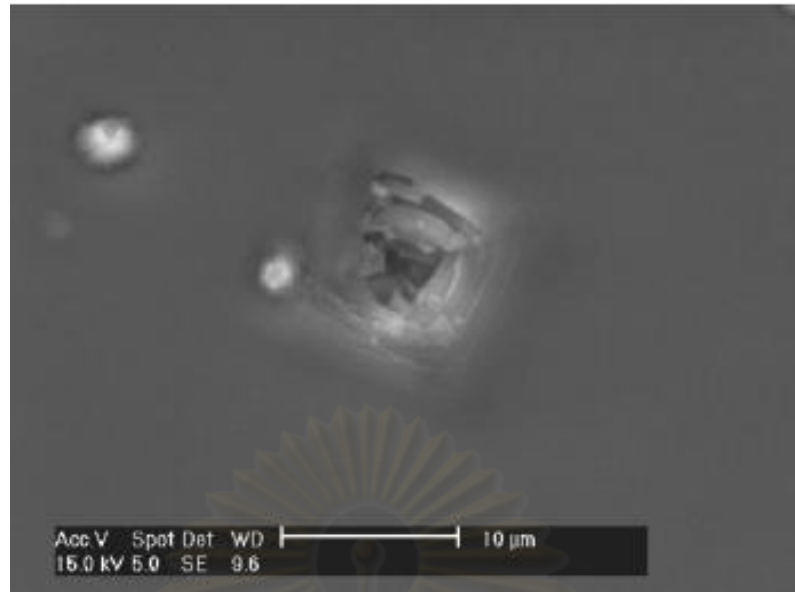
รูปที่ 2.17 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูลของ Ellipsometry [30]

2.6 การวัดคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม

โดยทั่วไปมีอยู่หลากหลายวิธีในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของพื้นผิวและคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม DLC การทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติทางกลจะประกอบด้วย การวัดความแข็งแรง (Hardness and nanoindentation test) การวัดความสามารถในการยึดเกาะ (Adhesion) โดยการทดสอบ Scratch (Scratch test) และการทดสอบการคงทนต่อรอยขีดข่วน (Wear test) [20, 26]

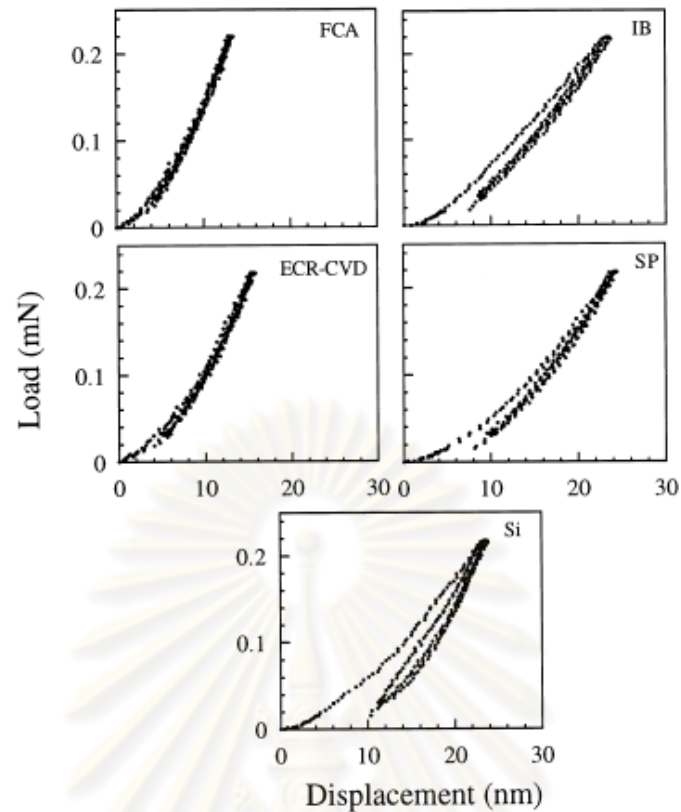
2.6.1 การวัดความแข็งแรงของฟิล์ม

การวัดความแข็งแรง (Hardness test) ถูกใช้เพื่อวัดคุณสมบัติของฟิล์มมานานแล้ว การวัดด้วย Microindentation มีข้อดีคือประหยัด ไม่ซับซ้อนและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ในการวัด Hardness นั้นยากที่จะแยกผลของกระแทกของ substrate ที่มีต่อ Hardness ออกจากฟิล์ม ยิ่งไปกว่านั้นในการวัด DLC ฟิล์มการเกิดรอยแตกนั้นเป็นเรื่องปกติและอาจเกิดขึ้นในลักษณะ Nested crack รอบๆเส้นรอบวงของรอยกดตั้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 [20] ดังนั้นจึงยากที่จะระบุขนาดของรอยกดได้อย่างแม่นยำและนำไปสู่ความไม่แน่นอนในการคำนวณ Hardness [20]



รูปที่ 2.18 Nested crack ที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธี Microindentator บนฟิล์ม DLC [20]

ในปัจจุบัน Nanoindentation นั้นกลายเป็นวิธีที่นิยมในการวัด Elastic modulus และ Hardness ของฟิล์ม ในการวัด Nanoindentation แรงและความลึกที่กดลง (Displacement) ไปบนวัตถุตัวอย่าง (Sample) จะถูกบันทึกไว้เป็นฟังก์ชันของเวลาเพื่อที่จะสร้าง Mechanical fingerprint ของการตอบสนองทางกลในการกด ข้อดีของ Nanoindentation ที่เหนือกว่าการวัด Hardness แบบทั่วไปคือสามารถวัดคุณสมบัติทางกลของฟิล์มแยกกับ Substrate ได้ซึ่งมีกฎอยู่ว่าการที่จะสามารถวัด Hardness ของฟิล์มเพียงอย่างเดียวความลึกในการกดต้องอยู่ที่ประมาณ 10% ของความหนาของฟิล์ม [20] ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดและความลึกที่กดลงไปโดยการใช้ Nanoindentation บน DLC ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกันแสดงไว้ดังรูปที่ 2.19 [26] โดยใช้แรงในการกด 0.2 ถึง 10 มิลลินิวตันโดยจะมีการตรวจจับและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับความลึกที่กดลงไป (Load displacement curve) DLC ที่ใช้ในการทดสอบมีความหนา 100 นาโนเมตรปลูกบนซิลิกอน Substrate โดยที่วิธี FCA (Filter cathodic arc) มีค่า Hardness สูงที่สุดและตามมาด้วย ECR-CVD (ECR-chemical vapour deposition), IB (Ion beam deposition, IBD), SP (Sputtering) และซิลิกอน Substrate ตามลำดับโดยที่ความลึกของรอยกดจะแปรผกผันกับ Hardness [26]

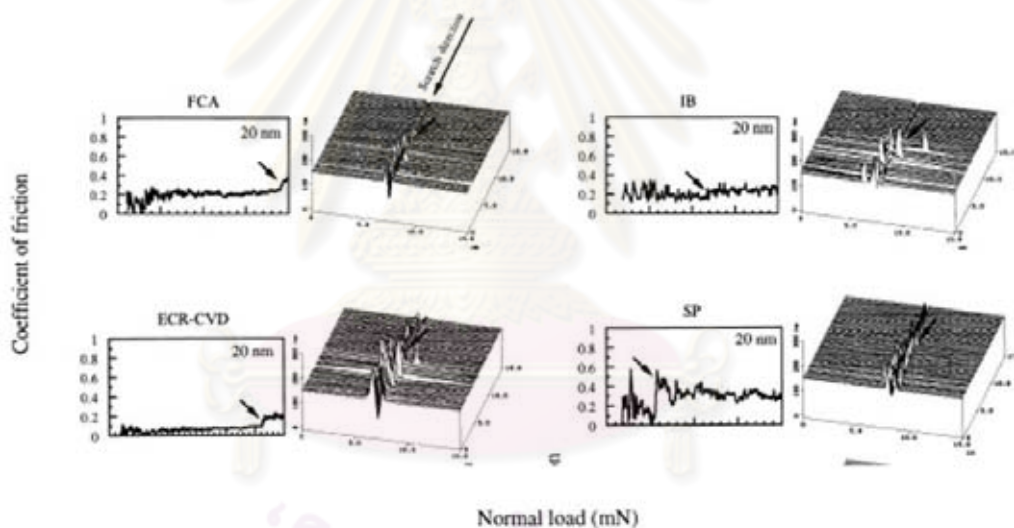


รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับความลึกของรอยกดของ DLC หนา 100 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีต่างๆบนซิลิกอน Substrate และซิลิกอน Substrate [26]

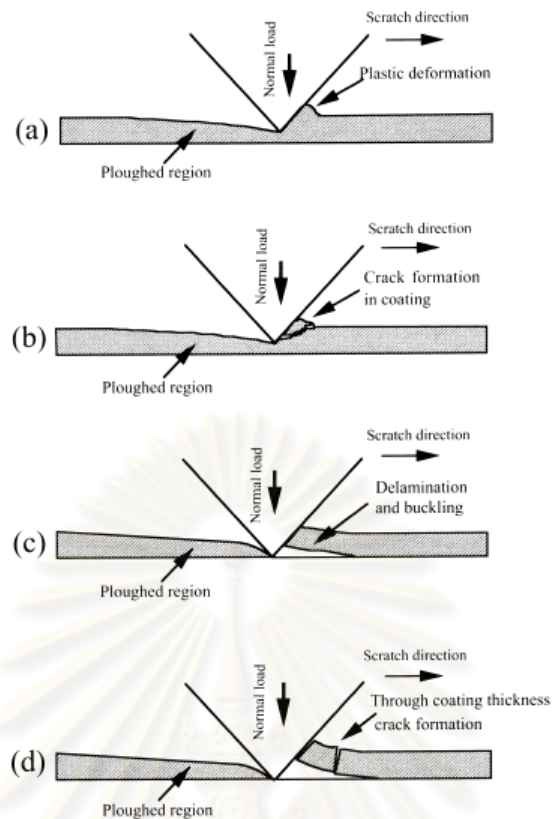
2.6.2 Microscratch [26]

ในการศึกษา Microscratch ใช้หัวกด (Indenter) ที่มีลักษณะเป็นกรวยโดยมีปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตรลากบนผิวของวัตถุตัวอย่างและเพิ่มแรงกดจนกระทั่งเกิดความเสียหายขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุตัวอย่างโดยจะตรวจจပ်โดยใช้สัมประสิทธิ์ของความเสียหายที่สัมพันธ์กับความเสียหายจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการขูดขึ้นโดยที่การเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายจะสัมพันธ์กับ Scratch resistance หรือความแข็งแรงในการยึดเกาะของฟิล์ม (Adhesion strength) Microscratch เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการยึดเกาะของฟิล์ม (Adhesion) และความทนทานต่อการสึกหรอเชิงกล (Mechanical durability) ของการปลูกฟิล์มวิธีต่างๆ ในการทดสอบ Scratch การเกิดรอยแตกหรือการลอกออกของฟิล์ม (Delamination) จะถูกตรวจจပ်โดยการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายซึ่งแรงกดที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายคือ Critical load กราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายกับแรงกดและรูปร่างของพื้นผิวที่เกิดความเสียหายจากการทดสอบ Scratch ที่ได้จากการวัด AFM (Atomic force microscope) ของฟิล์ม DLC หนา 20 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีที่

แตกต่างกันบนซิลิกอน Substrate แสดงไว้ดังรูปที่ 2.20 [26] โดยที่ลูกศรในภาพระบุถึง Critical load ซึ่งแสดงให้เห็นว่า FCA และ ECR-CVD มีการยึดเกาะของฟิล์มดีกว่า IB และ SP ซึ่ง Critical load จะแปรผันตรงกับความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มโดยที่สามารถวิเคราะห์รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากรูปร่างของรอยขีดข่วนที่ได้จากการวัด AFM ไดอะแกรมลักษณะการลอกออกของ DLC ฟิล์มแสดงไว้ดังรูปที่ 2.21 [26] ก่อนที่จะเกิดการลอกออกของฟิล์มถ้าฟิล์มมีความแข็งแรงและความเหนียวดี (Toughness) การขีดจะทำให้วัสดุที่ใช้เคลือบเสียหายรูปร่างเนื่องจากเกิดความเสียหายขึ้นที่พื้นผิว (รูปที่ 2.21a) อย่างไรก็ตามถ้าฟิล์มมีความแข็งแรงและความเหนียวน้อยการขีดจะทำให้เกิดเศษเล็ก ๆ ของวัสดุที่ใช้เคลือบ (รูปที่ 2.21b) เมื่อแรงกด (Normal load) เพิ่มขึ้นจนถึง Critical load จะเกิดการลอกของฟิล์มที่รอยต่อระหว่างฟิล์มกับ Substrate (รูปที่ 2.21c) ถ้าเพิ่มแรงกดให้มากกว่า Critical load จะทำให้เกิด Breakdown ของฟิล์มขึ้นเนื่องจากฟิล์มจะแตกออก (รูปที่ 2.21d)



รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกดและรูปร่างของพื้นผิวที่เกิดความเสียหายของฟิล์ม DLC หนา 20 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกันบนซิลิกอน Substrate [26]



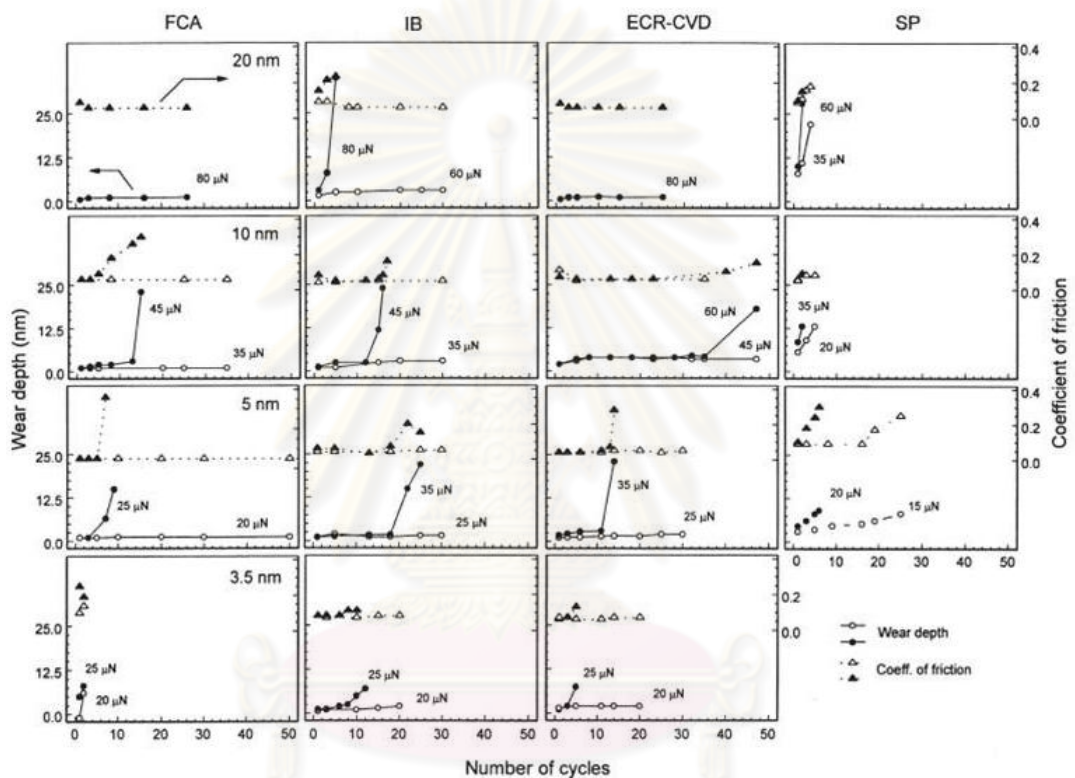
รูปที่ 2.21 ไดอะแกรมกลไกการเกิดความเสียหายของฟิล์ม DLC (a) ฟิล์มเสียรูปร่างเนื่องจากการขีด (b) เกิดเศษของฟิล์มขึ้นเนื่องจากการขีด (c) ฟิล์มเกิดการลอกออกจาก Substrate (d) เกิดฟิล์ม Breakdown ขึ้นเนื่องจากฟิล์มเกิดรอยแตกขึ้น [26]

2.6.3 การทดสอบรอยขีดข่วน [24]

การศึกษา Microwear สามารถทำได้โดยใช้ AFM (Atomic force microscope) โดยใช้หัวกดเพชรที่มีรูปทรงพีระมิดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตรโดยใช้แรงในการกดตั้งแต่ 1 ถึง 150 ไมโครนิวตัน หัวกดเพชรจะยึดติดกับคานที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) โดยที่จะลากไปบนผิวของวัตถุตัวอย่างในทิศทางตั้งฉากกับแกนยาวของคานโดยทั่วไปใช้อัตราความเร็ว 0.5 รอบต่อวินาที หัวกดเพชรจะติดอยู่ที่ปลายคาน สำหรับการศึกษ Microwear โดยทั่วไปจะใช้หัวกดเพชรลากไปบนวัตถุตัวอย่างเป็นพื้นที่ 2 ไมโครเมตร x 2 ไมโครเมตรและลากซ้ำตามจำนวนรอบที่กำหนด

Microwear ทดสอบกับ DLC ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธีที่ต่างกับบนซิลิกอน Substrate ตามที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.22 [24] โดยที่ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี FCA กับ ERCVD ที่มีความหนา 20 นาโนเมตรมีความทนทานต่อรอยขีดข่วนได้ดีเยี่ยมโดยสามารถทนได้ที่แรงมากถึง 80 ไมโครนิวตันซึ่งที่แรงกดนี้จะทำให้ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี IB นั้นเสียหายได้ ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี SP จะเสียหายด้วยแรงเพียง 35 ไมโครนิวตัน ที่ฟิล์มหนา 10 นาโนเมตรฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี ERCVD

ต้องใช้แรง 65 ไมโครนิวตันโดยทำการขูดซ้ำไปซ้ำมาถึง 45 รอบถึงจะเกิดความเสียหายขึ้นใน ขณะที่ IB และ FCA เกิดความเสียหายที่ 45 ไมโครนิวตันโดยที่ผลจากการทดสอบพบว่า การปลูกฟิล์มด้วยวิธี FCA และ ERCVD ที่มีความหนาฟิล์ม 10 ถึง 20 นาโนเมตร มีความสามารถในการทนทานต่อรอยขีดข่วนดีที่สุด โดยที่ความสามารถในการทนทานต่อรอยขีดข่วนสามารถระบุได้จากความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น ปริมาณแรงกดที่สามารถทนได้ สัมประสิทธิ์ของความเสียหาย และจำนวนรอบที่สามารถทนได้



รูปที่ 2.22 ข้อมูลทดสอบ Wear บนฟิล์ม DLC ที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ความหนาฟิล์มในแถวเดียวกันจะเท่ากัน โดยที่แต่ละกราฟจะแสดงความลึกของรอยขีดข่วนและสัมประสิทธิ์ของความเสียหาย [26]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การสร้างดิสก์ต้นแบบ

ในงานวิจัยนี้มีแนวทางในการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วโดยการพัฒนาจานแก้วที่เคลือบผิวหน้าด้วยวัสดุแข็งเช่น DLC (Diamond-like-coating) ซึ่งจะแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็น 2 ข้อคือ ปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้ว และการเพิ่มความไวในการวัด Flying height ของจานแก้วโดยมีขั้นตอนในการดำเนินโครงการ 3 ขั้นตอนคือ 1.การสร้างดิสก์ (Disk fabrication) เป็นการพัฒนาดิสก์ให้มีความแข็งแรงทนทาน (บทที่ 3) 2.การประเมินผลดิสก์ (Evaluation) เป็นการตรวจสอบคุณภาพของดิสก์และอายุการใช้งาน (บทที่ 4 และ 5) 3.การเพิ่มความไวในการวัด Flying height (Sensitivity improvement) เพื่อพัฒนาดิสก์ให้มีความไวสูงขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถวัดค่า Flying height ได้ละเอียดขึ้น (บทที่ 7)

เนื่องจากในกลุ่มวัสดุเคลือบผิวชนิดที่โปร่งใส นั้น DLC มีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุเคลือบชนิดอื่นและนิยมนำมาใช้เคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มความทนทานต่อรอยขีดข่วน [26, 34, 35] เช่นไบเมตโกน, อุปกรณ์ทางการแพทย์, ประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) รวมถึงในแผ่นจานแม่เหล็กที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ก็มีการเคลือบชั้นของ DLC เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนด้วย [20, 36-38] อีกทั้งยังสะดวกในการปลูกฟิล์มเนื่องจากสามารถเข้าไปใช้เครื่องมือได้ที่บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย)

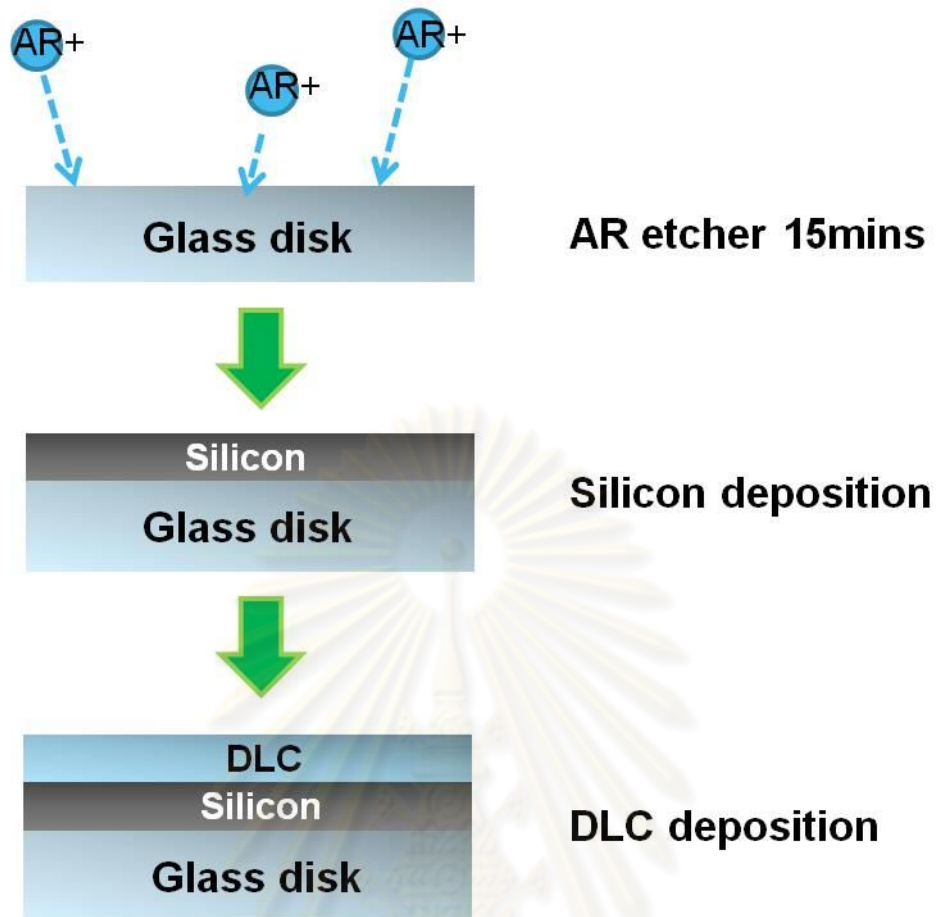
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือก DLC เป็นวัสดุเคลือบบนผิวจานแก้วเพื่อเพิ่มความทนทานของจานแก้ว ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงกระบวนการในการสร้างดิสก์ด้วยวิธีการ Ion beam deposition (บทที่ 3.1) ตลอดจนปัญหาที่เกิดขึ้น และการปรับปรุงแก้ไข (บทที่ 3.2) และทดสอบการใช้งานดิสก์ที่สร้างขึ้นในเครื่อง flying height tester (บทที่ 3.3)

3.1 กระบวนการสร้างดิสก์

ในการสร้างดิสก์นี้ใช้วิธีการปลูกฟิล์มแบบ Ion beam deposition โดยมีกระบวนการต่างๆดังต่อไปนี้ โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์มแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1 และขั้นตอนในการปลูกฟิล์มซิลิกอนและ DLC แสดงไว้ดังรูปที่ 3.1

1. ทำความสะอาดภาควางดิสก์ด้วยน้ำยา IPA (Iso Propyl Alcohol)
2. ใช้ปืนยิงไนโตรเจนในการเป่าสิ่งสกปรกออกจากผิวของจานแก้ว (รูปที่ 3.2)

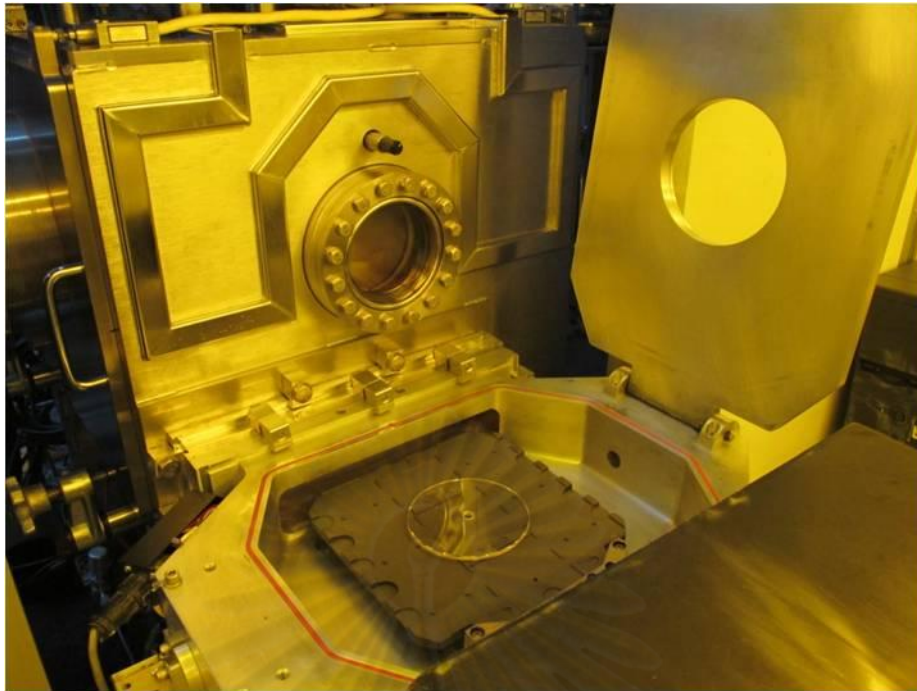
3. นำจานแก้วไปวางบนถาดวางดิสก์และใส่เข้าไปในเครื่อง Ion beam deposition (RF-Load lock, Commonwealth Scientific Corporation (CSC), รูปที่ 3.3)
4. ทำการกัดผิวหน้าของดิสก์เพื่อทำความสะอาดทั้ง Organic และ Inorganic contamination ด้วยกระบวนการ Dry etching ด้วยก๊าซ Argon เป็นเวลา 15 นาทีโดยใช้แหล่งกำเนิดไอออนขนาด 16 เซนติเมตร ซึ่งมี RF power 320 วัตต์และกระแสของลำไอออน 120 มิลลิแอมแปร์
5. ปลูกฟิล์มซิลิกอนตามความหนาที่ต้องการโดยใช้แหล่งกำเนิดไอออนขนาด 12 เซนติเมตร ซึ่งมี Discharge voltage 40 โวลต์และกระแสของลำไอออน 50 มิลลิแอมแปร์
6. ปลูกฟิล์ม DLC ตามความหนาที่ต้องการ โดยที่การสร้างฟิล์ม DLC นั้นจะใช้สารตั้งต้นคือมีเทน (Methane, CH_4) และ เอทีลีน (Ethylene, C_2H_4) ซึ่งมีอัตราการไหลของก๊าซคือ 7 และ 5.6 sccm (Standard cubic centimeter) ตามลำดับ โดยใช้แหล่งกำเนิดไอออนขนาด 16 เซนติเมตร ซึ่งมี RF power 320 วัตต์และกระแสของลำไอออน 100 มิลลิแอมแปร์ ส่วนความดันที่ใช้ในการปลูกฟิล์มทั้งหมดคือ 64.6 มิลลิทอร์ (mTorr) โดยที่งานแก้วหลังจากผ่านขั้นตอนการปลูกฟิล์มจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ส่วนรูปของงานแก้วก่อนและหลังผ่านกระบวนการปลูกฟิล์มแสดงเปรียบเทียบไว้ดังรูปที่ 3.4 โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการปลูกฟิล์มแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการปลูกฟิล์มและลักษณะของดิสก์หลังจากผ่านกระบวนการปลูกฟิล์ม



รูปที่ 3.2 ปืนไนโตรเจน (ซ้าย), ใช้ปืนไนโตรเจนเป่าสิ่งสกปรกออกจากผิวของจานแก้ว (ขวา)



รูปที่ 3.3 ขณะนำดีสใส่เข้าไปในเครื่อง RF-load lock เพื่อทำการปลูกฟิล์ม



รูปที่ 3.4 จานแก้วก่อนและหลังผ่านกระบวนการปลูกฟิล์ม

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์ม

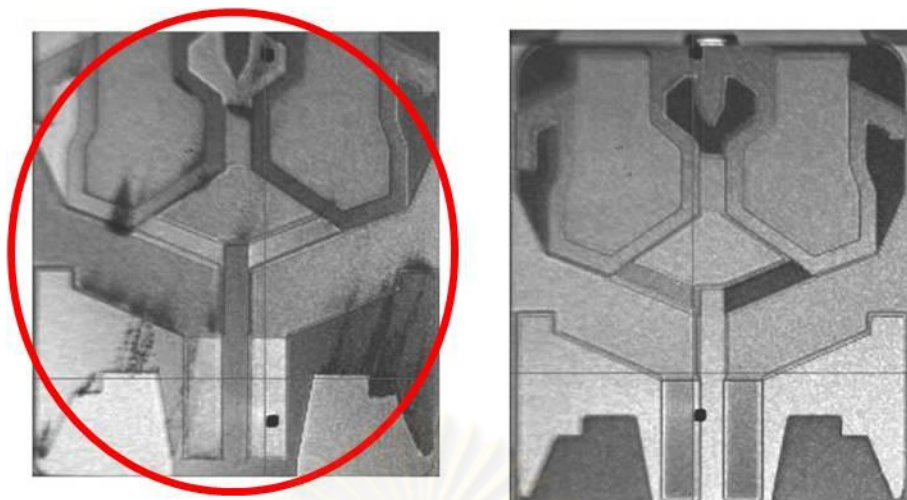
Process Parameter	AR etcher 16cm ion source	Si deposition 12cm ion source	DLC deposition 16cm ion source	Unit
PBN Argon	12	12	12	sccm
16cm Argon	15	-	-	sccm
12cm Argon	-	15	-	sccm
16cm Methane	-	-	7	sccm
16cm Ethylene	-	-	5.6	sccm
Beam volt	120	500	120	Volt
Beam current	120	50	100	mA
Acc. Volt	200	150	320	Volt
RF forward	320	-	320	Watt
Discharge volt	-	40	-	Volt

3.2 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้างดิสก์

3.2.1 ดิสก์ที่เคลือบด้วยฟิล์ม DLC เพียงอย่างเดียว

ปัญหาที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบโดยการนำไปใช้ในเครื่อง Flying height tester ในเบื้องต้นพบว่า หัวอ่าน/เขียนไม่สามารถบินได้เนื่องจากมีเศษของ DLC ติดอยู่ที่ ABS ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 3.5 ทำให้หัวอ่านสูญเสียความสามารถในการบินซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคือการยึดติด (Adhesion) ของ DLC และจานแก้วไม่ดีทำให้ DLC ลอกออก (Delamination) จากจานแก้วเมื่อเกิดการสัมผัสระหว่างหัวอ่าน/เขียนและดิสก์ทำให้เกิดเศษของ DLC ที่หลุดลอกไปติดที่ ABS



รูปที่ 3.5 ABS หลังการทดสอบของดิสก์ที่มี DLC (ซ้าย), งานแก้วธรรมดา (ขวา) ซึ่งวงกลมแสดงให้เห็นถึงเศษของ DLC ที่มาเกาะกับ ABS

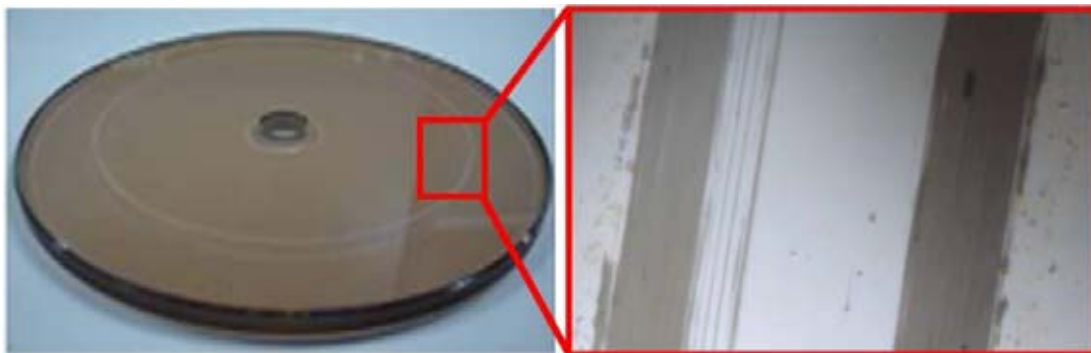
แนวทางการแก้ไขและปรับปรุง

โดยการใช้ชั้นช่วยยึดเกาะ (Adhesion layer) ซึ่งเลือกใช้ชั้นซิลิกอนใส่ระหว่าง DLC และงานแก้วเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติด

3.2.2 ดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนและชั้นของ DLC แต่มีชั้นของฟิล์ม DLC บางเกินไป

ปัญหาที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบโดยการนำไปใช้ในเครื่อง Flying height tester ในเบื้องต้นซึ่งพบว่าหัวอ่าน/เขียนสามารถบินได้ที่ Flying height 14 นาโนเมตรขึ้นไปโดยไม่เกิดรอยขีดข่วนส่วนการทดสอบบินที่ 12 นาโนเมตรพบว่าหัวอ่าน/เขียนไม่สามารถบินได้โดยพบที่เกิดรอยขีดข่วนขึ้นที่ดิสก์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งจากการวิเคราะห์รอยที่เกิดขึ้นจากกล้องจุลทรรศน์พบว่าขอบรอยที่เกิดขึ้นมีลักษณะค่อนข้างคมจึงน่าจะเป็นสาเหตุมาจากที่ชั้นของ DLC มีความแข็งแรงไม่พอทำให้เกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนผิวของดิสก์และไม่พบการลอกออกของ DLC ในเบื้องต้นทำให้สันนิษฐานว่าการยึดติดของฟิล์มค่อนข้างดีแล้ว



รูปที่ 3.6 รอยขีดข่วนที่เกิดบนดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนแต่มีชั้นของฟิล์ม DLC บางเกินไป (ซ้าย) ภาพถ่ายของรอยขีดข่วนจากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า (ขวา)

แนวทางการแก้ไขและปรับปรุง

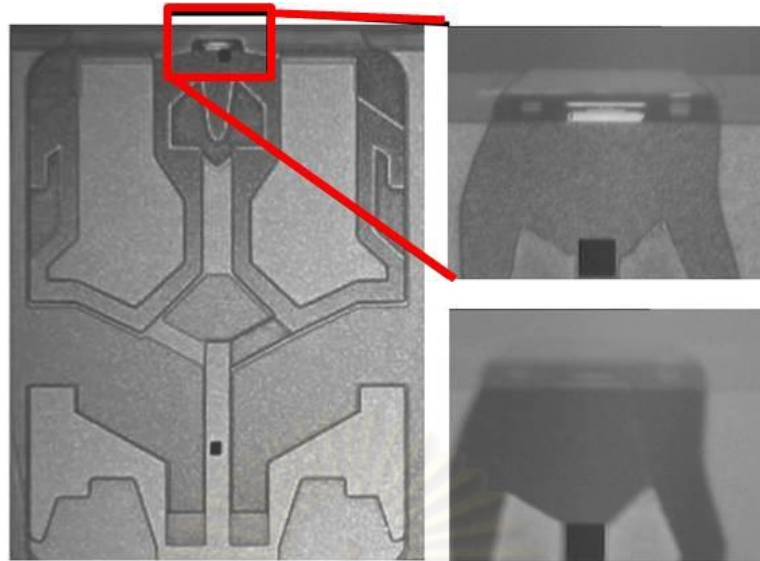
เพิ่มความหนาของฟิล์ม DLC เพื่อเพิ่มความแข็งแรง

3.2.3 ดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนและชั้นของ DLC แต่มีชั้นของซิลิกอนหนาเกินไป

ปัญหาที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบโดยการนำไปใช้ในเครื่อง Flying height tester โดยใช้ดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนหนา 7.5 นาโนเมตรและชั้นของ DLC 10 นาโนเมตรในเบื้องต้นซึ่งพบว่าหัวอ่าน/เขียนสามารถบินได้ที่ Flying height 12 นาโนเมตรโดยไม่เกิดรอยขีดข่วนแต่พบปัญหาในการมองเห็น Pole-tip ของโปรแกรมในเครื่องวัด Flying height tester ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนจะมองเห็น Pole-tip ได้ลำบากกว่าจานแก้วทั่วไปซึ่งเป็นผลมาจากดิสก์มีชั้นของซิลิกอนหนาเกินไป โดยจะสังเกตได้จากรูปที่ 3.6 ทางด้านซ้ายว่าดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนจะทำให้สีของดิสก์เข้มขึ้นซึ่งต่างไปจากเดิมซึ่งมีลักษณะโปร่งใส โดยจะกล่าวถึงความสำคัญของ Pole-tip ในหัวข้อที่ 3.3

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งของ Pole-tip บน ABS (ซ้าย) Pole-tip ของจานแก้วทั่วไป (ขวาบน) Pole-tip ของดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนหนาเกินไป (ขวาล่าง)

แนวทางการแก้ไขและปรับปรุง

ลดความหนาของชั้นซิลิกอนเพื่อปรับปรุงการมองเห็น Pole-tip

3.3 การทดสอบความสามารถในการบินของหัวอ่าน/เขียนด้วยดิสก์ต้นแบบ (Flyability)

การทดสอบนี้จะเป็นการใช้ตรวจสอบดิสก์ในเบื้องต้นโดยการนำดิสก์ต้นแบบไปใช้งานในเครื่อง Flying height เพื่อทดสอบการบินของหัวอ่าน/เขียนว่าสามารถบินได้ตามปกติหรือไม่ ถ้าหัวอ่าน/เขียนไม่สามารถบินได้ก็ปรับปรุงดิสก์พารามิเตอร์ (ความหนาของชั้นฟิล์ม) โดยอ้างอิงจากผลจากภาพถ่ายของ ABS และการตรวจสอบดิสก์หลังจากการใช้ซึ่งการทดสอบนี้สามารถบอกถึงความแข็งแรงของดิสก์ และ ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการนำดิสก์ไปใช้ในเครื่องวัด Flying height tester ในเบื้องต้นได้

ในการทดสอบนี้พบว่าดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 7.5 นาโนเมตรและ DLC 10 นาโนเมตรนั้นหัวอ่าน/เขียนสามารถบินได้โดยไม่เกิดรอยขีดข่วนแล้วแต่แต่เนื่องจากดิสก์ที่ใช้ซิลิกอนที่หนาเกินไปจะทำให้สีของดิสก์นั้นเข้มขึ้นกว่าจานแก้วมากซึ่งจะเป็นปัญหาในการวัด Flying height คือมองเห็น Pole-tip ได้ไม่ชัดเจนทำให้เครื่องวัดไม่สามารถระบุตำแหน่ง Pole-tip ได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 โดยที่ Pole-tip ถือเป็นตำแหน่งสำคัญที่โปรแกรมในเครื่อง Flying height tester ใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการระบุตำแหน่งต่างๆบน ABS ดังนั้นจึงต้องจำกัดความหนาของชั้นซิลิกอนเพื่อไม่ให้เป็นการอุปสรรคการมองเห็น Pole-tip

บทที่ 4

การทดสอบความหนาของซิลิกอนที่มีผลต่อการมองเห็น Pole-tip และความแข็งแรงของดิสก์

เนื่องจากความหนาของซิลิกอนจะมีผลต่อความแข็งแรงดิสก์และการมองเห็น Pole-tip จึงต้องทำการศึกษาความหนาของซิลิกอนที่เหมาะสมเพราะถ้าซิลิกอนบางเกินไปก็จะผลต่อการยึดติดของฟิล์มไม่ดีซึ่งอาจทำให้เกิดการลอกออกของฟิล์มได้ (Delamination) แต่ถ้าซิลิกอนมีความหนาเกินไปก็จะทำให้เป็นอุปสรรคต่อการมองเห็น Pole-tip จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาความหนาของซิลิกอนที่เหมาะสมดังนั้นจึงทำการสร้างดิสก์ตามกระบวนการสร้างในหัวข้อที่ 3.1 จำนวน 5 แผ่นโดยที่แต่ละดิสก์จะมีความหนาซิลิกอนแตกต่างกันโดยมีความหนาตั้งแต่ 1, 3, 5, 7 และ 9 นาโนเมตรโดยที่ความหนาของ DLC คงที่ที่ 15 นาโนเมตรเนื่องจากความหนาของ DLC ไม่มีข้อจำกัดจึงเลือกความหนาที่ 15 นาโนเมตรเพื่อเน้นด้านความแข็งแรงของดิสก์จากนั้นก็จะไปทดสอบความหนาของซิลิกอนที่มีผลต่อความชัดเจนของ Pole-tip โดยนำไปใช้งานในเครื่อง Flying height tester ส่วนความแข็งแรงของดิสก์จะทดสอบโดยการทำ Wear test เพื่อวัดการยึดติดของฟิล์ม [20, 26, 39-41] หลังจากนั้นดิสก์ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด กล่าวคือดิสก์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุดโดยที่ยังสามารถมองเห็น Pole-tip ได้อย่างชัดเจน จะถูกนำไปทดสอบในการวัดอายุการใช้งานของดิสก์เปรียบเทียบกับจานแก้ว

4.1 การทดสอบความหนาของซิลิกอนที่มีผลต่อการมองเห็น Pole-tip

ในการทดสอบนี้จะนำดิสก์ที่สร้างขึ้นทั้ง 5 ดิสก์ไปทดสอบการมองเห็นตำแหน่ง Pole-tip ในเครื่อง Flying height tester โดยดิสก์ที่โปรแกรมอัตโนมัติในเครื่องวัด Flying height สามารถตรวจจับตำแหน่ง Pole-tip ได้โดยอัตโนมัติจะผ่านการทดสอบนี้ โดยมีเครื่องมือวัด, อุปกรณ์, ขั้นตอนการทดสอบ และ ผลการทดสอบ ดังนี้

เครื่องมือวัด

1. เครื่องวัด Flying height (DFHT5, KLA-Tencor)

อุปกรณ์

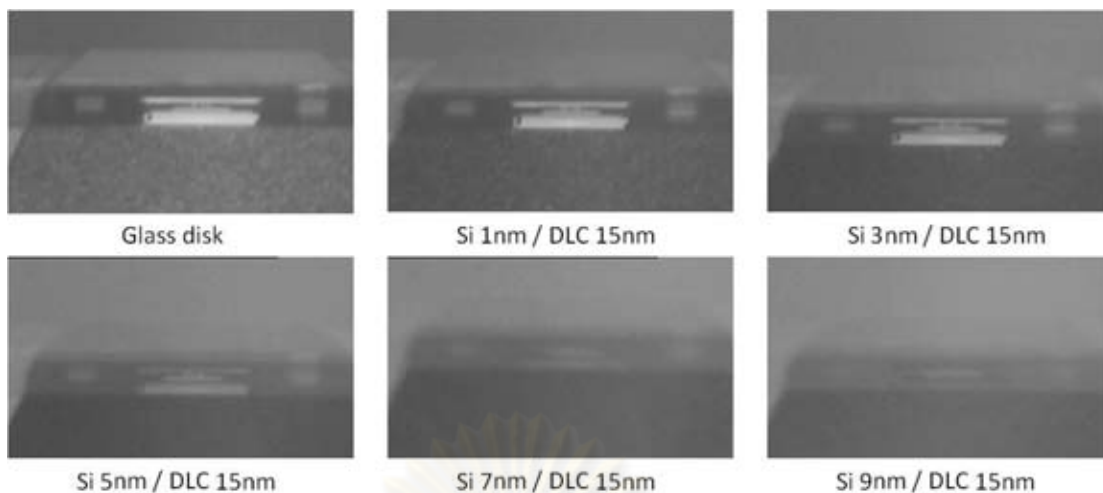
1. ดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอน (1, 3, 5, 7 และ 9 นาโนเมตร) และ DLC 15 นาโนเมตร
2. หัวอ่าน/เขียนที่บินด้วยความสูง 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำดิสก์ใส่ในเครื่องวัด Flying height tester
2. ทดสอบให้โปรแกรมอัตโนมัติหาตำแหน่ง Pole-tip

ผลการทดสอบ

ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตร และ 3 นาโนเมตรเท่านั้นที่ผ่านการทดสอบโดยที่โปรแกรมอัตโนมัติในเครื่องวัด Flying height สามารถตรวจจับตำแหน่ง Pole-tip บน ABS ของหัวอ่าน/เขียนเมื่อทำการทดสอบด้วยดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอนน้อยกว่า 3 นาโนเมตร แต่โปรแกรมอัตโนมัติไม่สามารถตรวจจับตำแหน่ง Pole-tip เมื่อทำการทดสอบด้วยดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอนมากกว่า 3 นาโนเมตร รูปที่ 4.1 แสดงถึง Pole-tip บน ABS ของหัวอ่าน/เขียนของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1, 3, 5, 7 และ 9 นาโนเมตรโดยความหนาของ DLC ของดิสก์ทั้งหมดคงที่ที่ 15 นาโนเมตร ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า การทดสอบที่ใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 และ 3 นาโนเมตรจะสามารถมองเห็นรูปร่างของ Pole-tip ได้ชัดเจน ในทางกลับกันการทดสอบที่ใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 5, 7 และ 9 นาโนเมตร ภาพของ Pole-tip นั้นจะไม่ชัดเจนและแยกแยะตำแหน่ง Pole-tip ออกจาก ABS ได้ยากจึงทำให้โปรแกรมอัตโนมัติไม่สามารถตรวจจับตำแหน่ง Pole-tip ได้



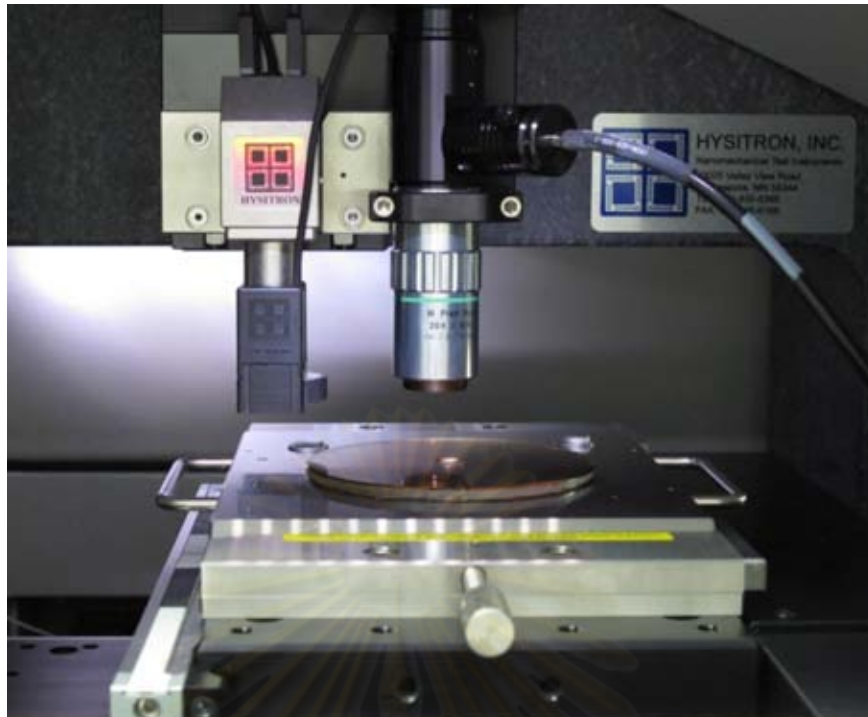
รูปที่ 4.1 แสดงความชัดเจนของ Pole-tip บน ABS เมื่อทดสอบด้วยจานแก้วและดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอนแตกต่างกัน แถวบนจากซ้ายไปขวาคือจานแก้ว, ดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 และ 3 นาโนเมตร แถวล่างจากซ้ายไปขวาคือ ดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 5, 7 และ 9 นาโนเมตร

4.2 การทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่อความแข็งแรงของดิสก์

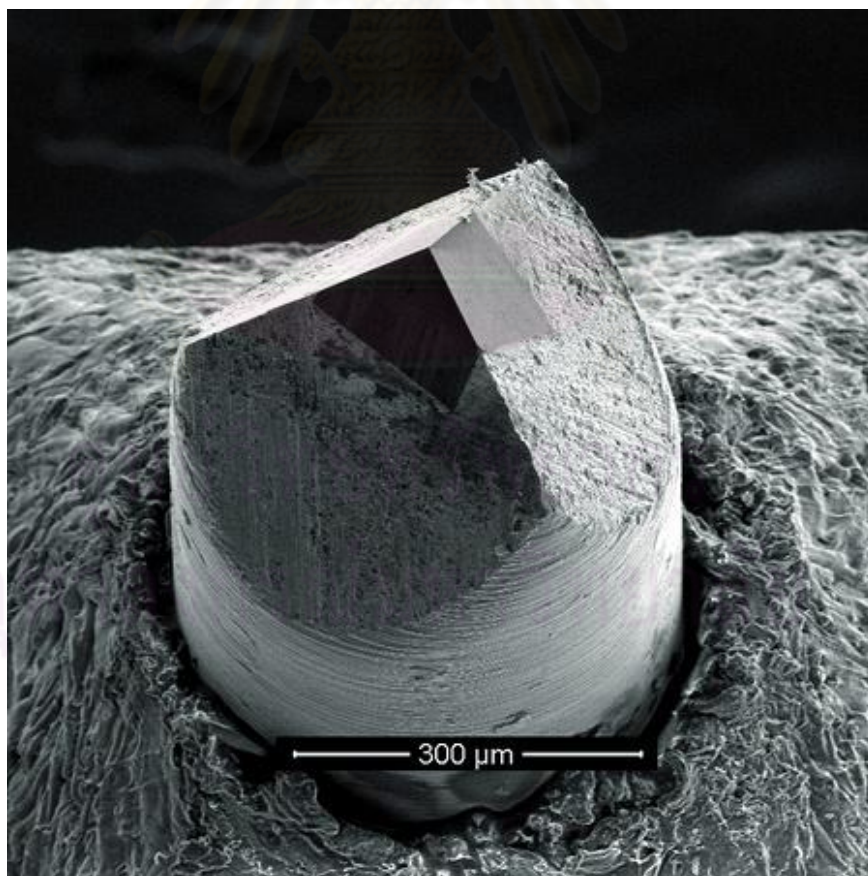
การทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่อความแข็งแรงของดิสก์จะทดสอบโดยการใช้ Wear test ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.7.3 โดยจะใช้หัวกดปลายแหลม (Probe) ที่ทำจากเพชรกดลงไปบนชั้นงานและลากหัวกดเพื่อให้เกิดรอยขีดข่วนเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Wear profile) บนชั้นงาน ซึ่งความแข็งแรงของชั้นงานจะบอกได้จากความลึกของรอยขีดข่วน โดยที่ความแข็งแรงจะแปรผกผันกับความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น ซึ่งหมายความว่ารอยขีดข่วนที่มีความลึกน้อยกว่าบ่งบอกถึงความแข็งแรงที่มากกว่า โดยการทำให้ Wear test ในการทดสอบนี้มีเครื่องมือวัด, อุปกรณ์, ขั้นตอนการทดสอบ และ ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัด

1. เครื่องวัด Triboindenter รุ่น TI-900, Hysistron (รูปที่ 4.2)
2. หัวกดเพชรปลายแหลมชนิด Cube corner ที่มีรัศมีของหัวกด 100 นาโนเมตร (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.2 เครื่องวัด Triboindenter รุ่น TI-900 ของบริษัท Hysitron



รูปที่ 4.3 หัวกดเพชรปลายแหลมชนิด Cube corner ที่มีรัศมีของหัวกด 100 นาโนเมตร [42]

อุปกรณ์

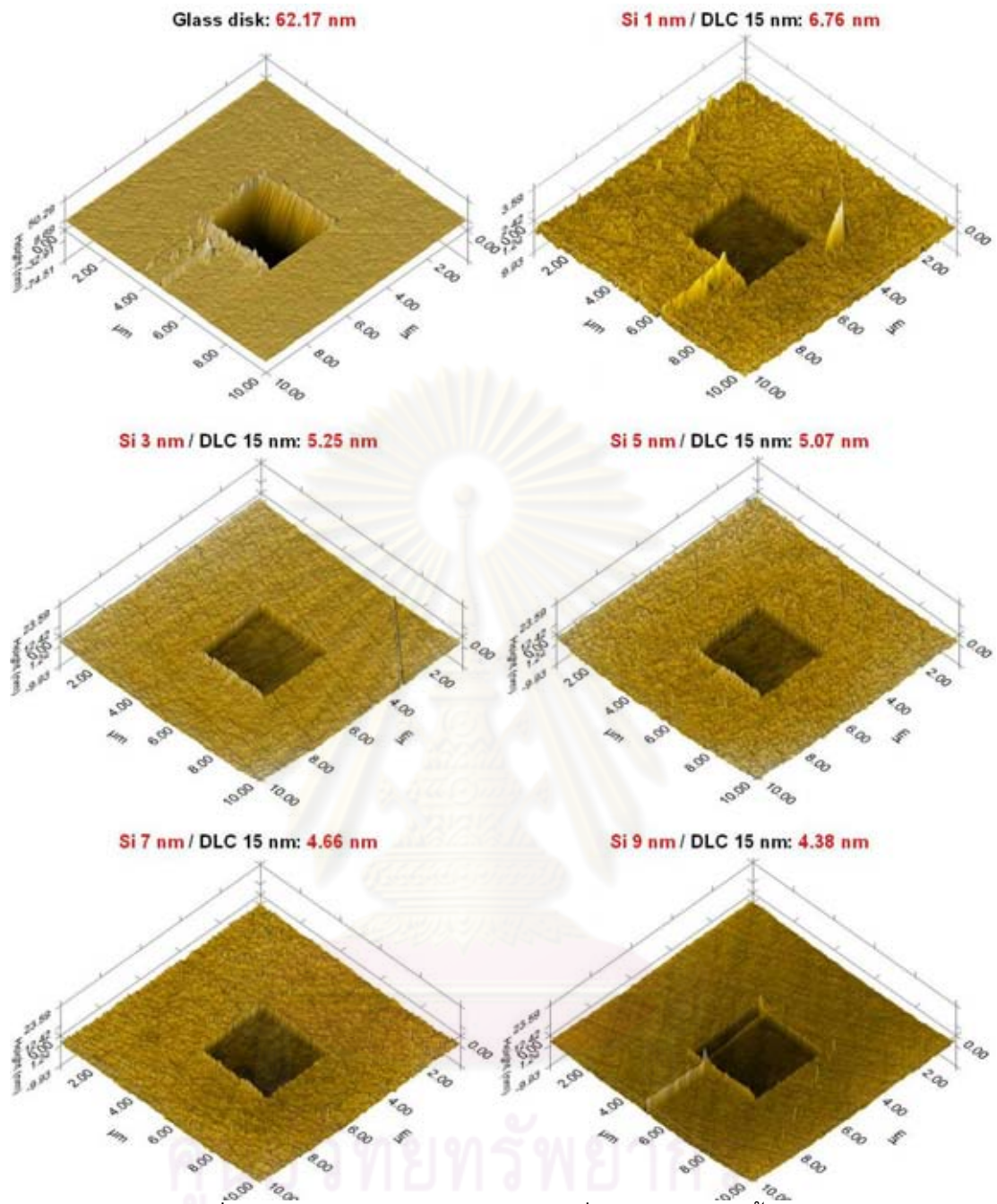
1. ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอน (1, 3, 5, 7 และ 9 นาโนเมตร) และ DLC 15 นาโนเมตร
2. จานแก้วปกติ (Glass disk)

ขั้นตอนการทดสอบ

1. หัวกดกดลงไปบนผิวหน้าของดิสก์ด้วยแรง 60 ไมโครนิวตัน
2. ลากหัวกดไปบนผิวหน้าของดิสก์เป็นลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 ไมโครเมตร x 3 ไมโครเมตรโดยทำการลากหัวกดไปและกลับด้วยความเร็ว 7.5 ไมโครเมตรต่อวินาที
3. หลังจากทำการทดสอบรอยขีดข่วนเสร็จแล้ว ภาพของรอยขีดข่วน (Wear profile) จะถูกเก็บโดยการใช้อิมิต AFM (Atomic force measurement) ของเครื่องวัด ซึ่ง จะลากหัวกดด้วยแรง 1 ไมโครนิวตันเป็นพื้นที่ 10 ไมโครเมตร x 10 ไมโครเมตร
4. ทำการทดสอบซ้ำ 2 รอบทั้งบนดิสก์ที่สร้างขึ้นทั้งหมดและจานแก้ว โดยลำดับการทดสอบในรอบแรกจะเริ่มจากจานแก้วเป็นลำดับแรกและดิสก์ที่มีซิลิกอนบางไปหา ส่วนรอบที่ 2 จะทำการทดสอบจากดิสก์ที่มีซิลิกอนหนาไปยังดิสก์ที่มีซิลิกอนบาง และจานแก้วเป็นลำดับสุดท้าย

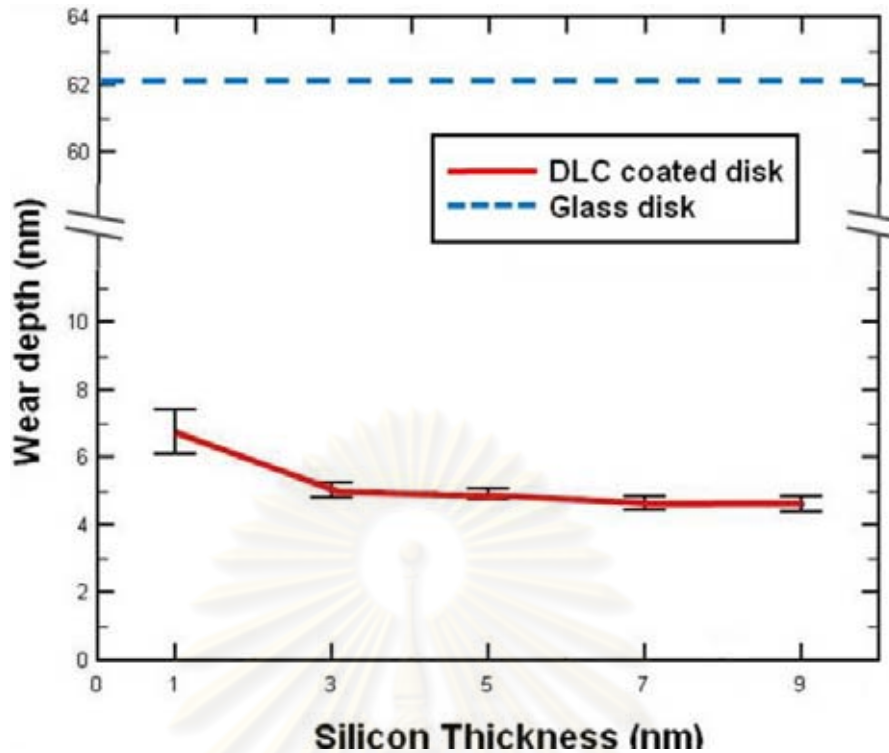
ผลการทดสอบ

รูปที่ 4.4 แสดงถึงภาพของรอยขีดข่วน (Wear profile) ของจานแก้วและดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอน และ DLC โดยที่ความลึกของรอยขีดข่วนของจานแก้วคือ 62.5 นาโนเมตรในขณะที่ความลึกของรอยขีดข่วนของดิสก์ที่เคลือบผิวหน้าและ DLC คือ 5 ถึง 7 นาโนเมตรซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าการเคลือบจานแก้วด้วยชั้นของซิลิกอนและ DLC สามารถทำให้ความลึกของรอยขีดข่วนลดลงจาก 62.5 นาโนเมตรเป็น 5 นาโนเมตรหรือลดลง 92 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการเมื่อความหนาซิลิกอนมากกว่า 3 นาโนเมตรนั้นไม่แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความลึกของรอยขีดข่วนซึ่งสามารถเห็นได้จากรูปที่ 4.5 ว่าความลึกของรอยขีดข่วนของดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรคือ 5.02 นาโนเมตรและซิลิกอนหนา 9 นาโนเมตรคือ 4.38 นาโนเมตรซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาของซิลิกอนมากกว่า 3 นาโนเมตรนั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.4 ภาพของรอยขีดข่วนบนดิสก์ที่ทำการทดสอบทั้งหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความลึกของรอยขีดข่วนกับความหนาของซิลิกอนโดยที่เส้นประแสดงถึงความลึกของรอยขีดข่วนบนจานแก้ว

4.3 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบความชัดเจนของ Pole-tip พบว่าดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอนน้อยกว่า 3 นาโนเมตรจะสามารถมองเห็น Pole-tip ได้ชัดเจนและโปรแกรมอัตโนมัติก็สามารถตรวจจับตำแหน่ง Pole-tip ได้ และจากผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนและ DLC สามารถลดความลึกของรอยขีดข่วนลงได้ถึง 92 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับจานแก้ว แต่การเพิ่มความหนาซิลิกอนให้มากกว่า 3 นาโนเมตรนั้นไม่แสดงถึงความแตกต่างของความลึกของรอยขีดข่วนอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากการทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่อความชัดเจนในการมองเห็น Pole-tip และความแข็งแรงดิสก์พบว่า ดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรเป็นดิสก์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุดที่ยังสามารถมองเห็น Pole-tip ได้อย่างชัดเจนด้วย โดยที่ดิสก์นี้จะถูกเลือกเพื่อนำไปวัดอายุการใช้งานเปรียบเทียบกับจานแก้ว

บทที่ 5

การวัดอายุการใช้งานของดิสก์

ในการทดสอบอายุการใช้งานจะเป็นการนำดิสก์ไปใช้จริงในเครื่องวัด Flying height เพื่อทดสอบว่าดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นมีอายุการใช้งานมากขึ้นเท่าไรเมื่อเปรียบเทียบกับจานแก้วโดยที่อายุการใช้งานนั้นจะพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบและความรุนแรงของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ (บทที่ 5.1) จากนั้นจะทำการตรวจสอบผลการทดสอบโดยการวัดขนาดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นทั้งบนจานแก้วและบนดิสก์ที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกัน (บทที่ 5.2) รวมถึงการประเมินค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการใช้ดิสก์ที่สร้างขึ้นโดยอ้างอิงจากผลการทดสอบวัดอายุการใช้งาน (บทที่ 5.3) และสรุปผลของการวัดอายุการใช้งาน (บทที่ 5.4)

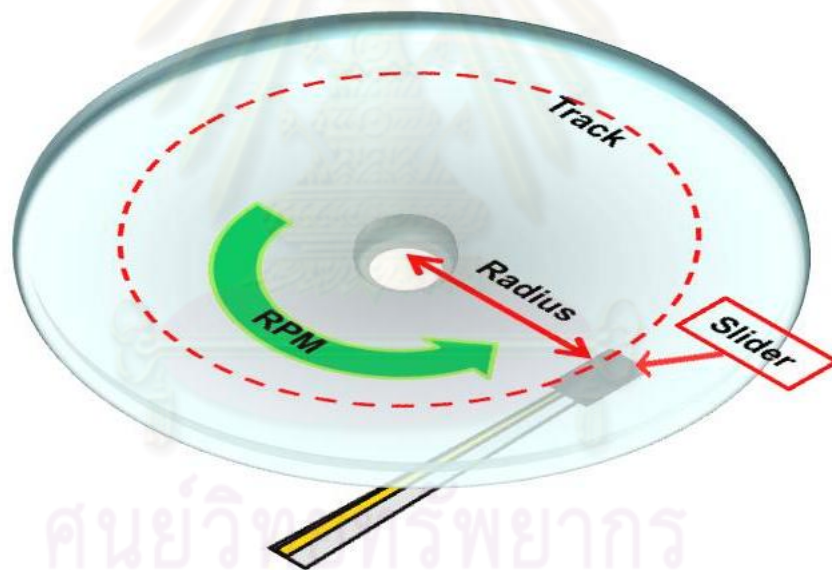
5.1 การทดสอบวัดอายุการใช้งานโดยเครื่องวัด Flying height tester

โดยปกติแล้วในการบวกรวด Flying height ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ อายุการใช้งานของจานแก้วคือจำนวนของหัวอ่าน/เขียนที่สามารถวัดได้ก่อนที่จะเกิดรอยขีดข่วนขึ้น ซึ่งรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากที่ชนกันหรือสัมผัสกันระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้วซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวอ่าน/เขียน ถ้าหัวอ่าน/เขียนที่นำมาวัดนั้นดีก็จะทำให้สามารถวัดหัวอ่าน/เขียนได้จำนวนมากและมีอายุการใช้งานยาวนาน แต่ในทางกลับกันถ้าหัวอ่าน/เขียนที่นำมาวัดนั้นไม่ดีซึ่งอาจเกิดการชนกันระหว่างจานแก้วและหัวอ่าน/เขียนทำให้เกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนจานแก้วในทันทีที่เริ่มทำการวัดทำให้อายุการใช้งานของจานแก้วที่วัดด้วยหัวอ่าน/เขียนที่ไม่ดีนั้นสั้นมาก

ในกระบวนการวัด Flying height ลักษณะของหัวอ่าน/เขียนในแต่ละกลุ่มจะมีทั้งดีและไม่ดีรวมกันในลักษณะสุ่มซึ่งทำให้อายุการใช้งานของจานแก้วนั้นไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะของหัวอ่าน/เขียนที่นำมาวัด ดังนั้นในกระบวนการวัด Flying height แบบปกติจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการทดสอบอายุการใช้งานของดิสก์ จึงทำการออกแบบการทดลองใหม่โดยเลือกเฉพาะแต่หัวอ่าน/เขียนที่ดีซึ่งก็คือ หัวอ่าน/เขียนที่สามารถบินได้ปกติและมีความสูงที่ใช้บิน (Flying height) อยู่ในค่าที่ใกล้เคียงกันมาทำการทดสอบ

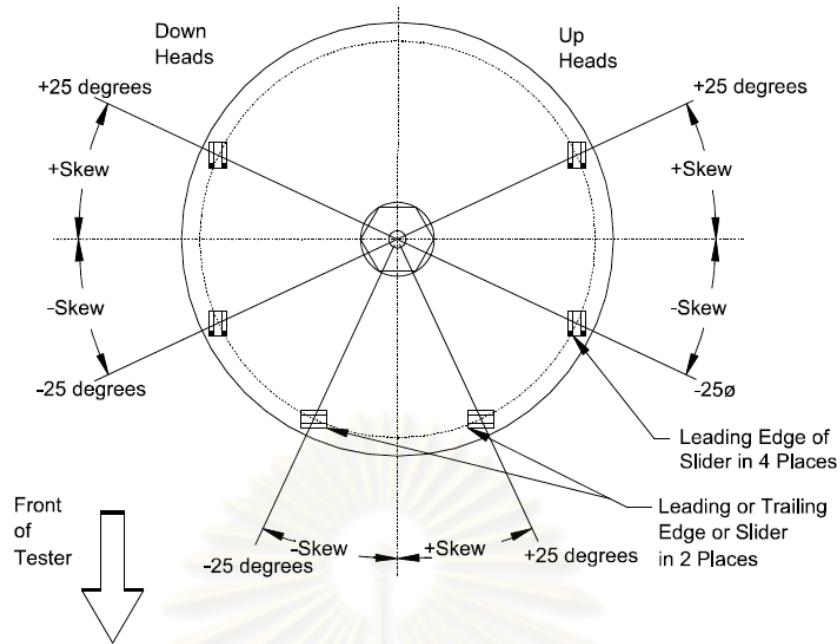
โดยที่การทดสอบนั้นจะออกแบบให้เร่งการเกิดรอยขีดข่วนบนดิสก์โดยใช้หัวอ่าน/เขียนที่ดี ซึ่งทำได้โดยการควบคุมให้หัวอ่าน/เขียนบินด้วยสภาวะที่ไม่เหมาะสม (Critical condition) โดยการปรับพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ 1. ความเร็วเชิงเส้นของดิสก์ (IPS, Inch per second) 2.

มุม Skew ของหัวอ่าน/เขียน และ 3. ระยะ Z-height ของแท่นยึดหัวอ่านเขียน โดยที่การปรับแต่ละพารามิเตอร์มีความหมายดังนี้ ความเร็วในการหมุนเชิงเส้นของดิสก์ คือ การปรับความเร็วรอบของดิสก์ (Round per minute) ความเร็วรอบของดิสก์นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามรัศมีของดิสก์ที่ใช้ทำการวัด (Measurement track) การวัด Flying height บริเวณรัศมีด้านในของดิสก์นั้นจะใช้ความเร็วรอบที่สูงในขณะที่การวัด Flying height ที่รัศมีด้านนอกของดิสก์จะใช้ความเร็วรอบที่ต่ำกว่า แต่ความเร็วเชิงเส้นนั้นจะเท่ากันในทุกๆรัศมีที่ใช้ทำการวัดดังนั้นการปรับความเร็วเชิงเส้นจะทำให้สภาวะในแต่ละรัศมีที่ทำกรวัด (Track) เหมือนกัน โดยที่ความเร็วในการหมุนเชิงเส้นของดิสก์ที่สภาวะปกติ (Normal condition) คือ 565 นิ้ว/วินาทีและจะถูกปรับลงมาที่ 209 นิ้ว/วินาที ที่ Critical condition โดย IPS ที่ต่ำลงจะทำให้ความเร็วลมที่เข้ามาปะทะกับหัวอ่าน/เขียนต่ำลงซึ่งจะทำให้แรงยกที่ทำให้หัวอ่าน/เขียนบินนั้นน้อยลง โดยที่ IPS สามารถคำนวณได้จาก $0.1417 \times \text{RPM} \times \text{รัศมีที่ใช้ทำการวัด}$ ไดอะแกรมของพารามิเตอร์ต่างๆแสดงไว้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการปรับ IPS

มุม Skew ของหัวอ่านเขียน คือ มุมที่หัวอ่านวางตัวเบี่ยงเบนไปจากเส้นรัศมีของดิสก์ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ในการทดสอบนี้มุม Skew จะเปลี่ยนแปลงจาก 0 องศาที่ Normal condition ไปเป็น -16.44 องศาที่ Critical condition โดยที่การเปลี่ยนแปลงมุม Skew ของหัวอ่าน/เขียนไปจากเดิมนั้นอาจทำให้การบินของหัวอ่าน/เขียนนั้นเอียงได้



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมของมุม Skew หรือมุมที่หัวอ่าน/เขียนวางตัวเบี่ยงเบนจากเส้นรัศมีของดิสก์

ระยะ Z-height ของที่ยึดหัวอ่านเขียน เป็นการปรับระยะห่างระหว่างส่วนที่ยึดหัวอ่าน/เขียนและดิสก์ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.3 โดยที่ในเครื่องวัด Flying height การปรับ Z-height ให้มีค่าน้อยลง หมายถึงระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและดิสก์จะมีค่าน้อยลง ในการทดสอบนี้ค่า Z-height จะถูกปรับจาก 0.7688 มิลลิเมตรที่ Normal condition ไปเป็น 0.7682 มิลลิเมตรที่ Critical condition การปรับค่า Z-height ให้น้อยลงนั้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้หัวอ่าน/เขียนและดิสก์เกิดการสัมผัสกันมากขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ถูกปรับนั้นแสดงไว้ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมของระยะความสูง Z-height ซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างที่ยึดหัวอ่านเขียน (Fixture) และดิสก์

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกปรับใน Critical condition

Parameters	Normal condition	Critical condition
ความเร็วเชิงเส้นของดิสก์ (IPS)	565 นิ้ว/วินาที	209 นิ้ว/วินาที
มุม Skew	0 องศา	-16.44 องศา
Z-height	0.7688 มิลลิเมตร	0.7682 มิลลิเมตร

จากการปรับพารามิเตอร์ดังกล่าว (IPS, มุม Skew และ Z-height) จะทำให้หัวอ่าน/เขียนสูญเสียความสามารถในการบินและจะชนกับดิสก์และจะทำให้เกิดรอยขีดข่วนบนดิสก์ อายุการใช้งานของดิสก์จะวัดจากระยะเวลาการทดสอบก่อนที่จะเกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนดิสก์ซึ่งรอยขีดข่วนสามารถสังเกตได้จากสิ่งสกปรก (Contamination) ที่มาเกาะตาม ABS ของหัวอ่าน/เขียน เนื่องจากเวลาที่ดิสก์เกิดรอยขีดข่วนขึ้นเศษสิ่งสกปรกที่เกิดจากรอยขีดข่วนจะไปเกาะตาม ABS ของหัวอ่าน/เขียน โดยที่การทดสอบนี้มีเครื่องมือ, อุปกรณ์, ขั้นตอนการทดสอบ และผลการทดสอบดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัด

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

อุปกรณ์

1. ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร
2. จานแก้ว
3. หัวอ่าน/เขียนที่บินด้วยความสูง (Flying height) 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ

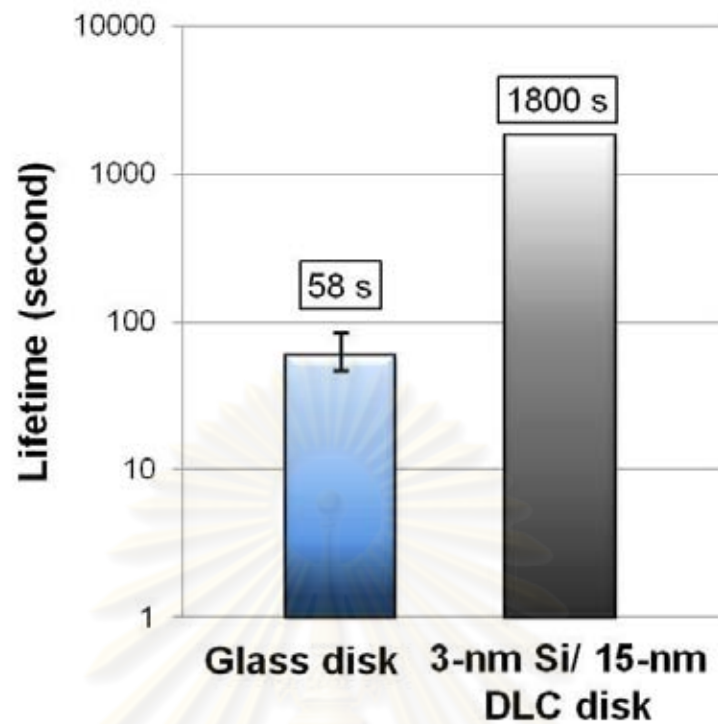
1. ทำการคัดเลือกหัวอ่าน/เขียนที่สามารถบินได้ปกติจำนวน 20 ตัวจากกลุ่ม โดยนำไปทดสอบวัดในกระบวนการวัด Flying height ตามปกติ หัวอ่าน/เขียนที่สามารถบินได้ปกติและมีค่า Flying height ประมาณ 10 ถึง 14 นาโนเมตร จะถูกเลือกออกมาจากกลุ่มเพื่อนำไปทดสอบในการวัดอายุการใช้งานของดิสก์
2. การทดสอบเริ่มโดยการปล่อยให้หัวอ่าน/เขียนบินเป็นเวลา 1 นาทีที่สภาวะปกติ (Normal condition) ที่เหมาะสมต่อการบินของหัวอ่านเขียน (ความเร็วเชิงเส้นของการหมุนของดิสก์ 565 นิ้ว/วินาที, มุม Skew 0 องศาและ ระยะ Z-height 0.7688

ไมโครเมตร) เพื่อให้แน่ใจว่าหัวอ่าน/เขียนที่จะนำมาทดสอบสามารถบินได้อย่างปกติและเป็นการตรวจสอบ ABS ของหัวอ่าน/เขียนให้แน่ใจว่าไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้น

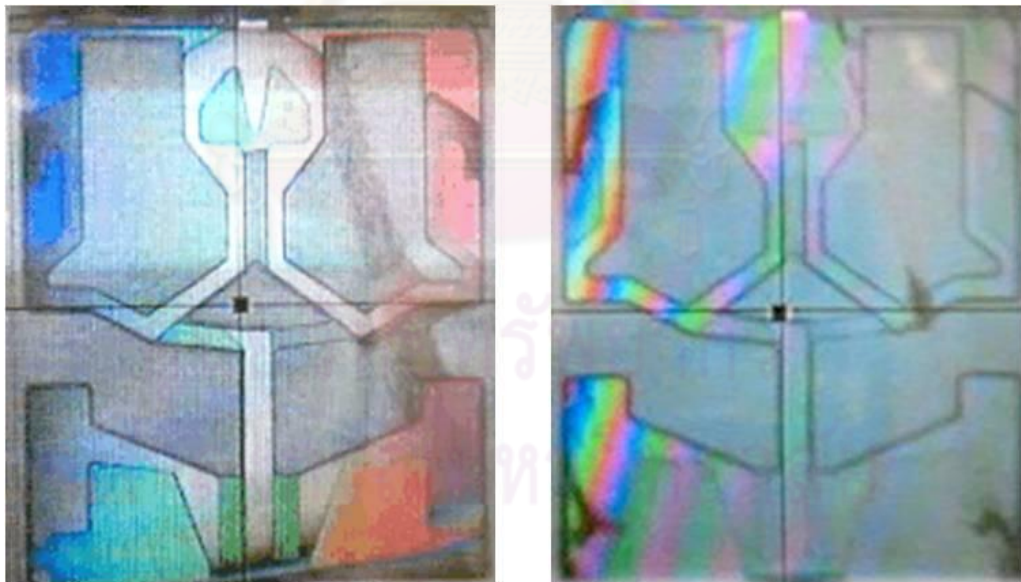
3. เปลี่ยนสภาวะที่ใช้ทดสอบเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมในการบินของหัวอ่าน/เขียน (Critical condition) โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ ความเร็วเชิงเส้นของการหมุนของดิสก์ 209 นิ้ว/วินาที, มุม Skew -16.44 องศาและ ระยะ Z-height 0.7682 ไมโครเมตร เพื่อเร่งให้เกิดการชนกันระหว่างหัวอ่าน/เขียนและดิสก์ ที่สภาวะนี้ หัวอ่าน/เขียนจะสูญเสียความสามารถในการบินและเริ่มชนกับดิสก์ ซึ่งอายุการใช้งานจะวัดจากระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบก่อนที่จะเกิดรอยขีดข่วนขึ้นบนดิสก์
4. ทำการทดสอบซ้ำ 9 Tracks บนจานแก้วและ 5 Tracks บนดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร (เนื่องจากบนจานแก้วสามารถทดสอบได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังจึงสามารถทดสอบได้ 9 Track ส่วนดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นมีการเคลือบผิวเพียงแต่ด้านเดียวดังนั้นจึงทำการทดสอบได้เพียงแต่ด้านเดียวจึงทดสอบได้เพียง 5 Track)

ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 5.4 แสดงถึงอายุการใช้งานของจานแก้ว 1 track เปรียบเทียบกับอายุการใช้งานของดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร อายุการใช้งานของจานแก้วอยู่ที่ 58 วินาทีส่วนอายุการใช้งานของดิสก์ที่เคลือบผิวหน้าด้วยซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรอยู่ที่ 1800 วินาที (30 นาที) โดยที่ภาพของ ABS ของหัวอ่าน/เขียนหลังจากการทดสอบวัดอายุการใช้งานของทั้งจานแก้วและดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรแสดงไว้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบ ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ทำการทดสอบด้วยจานแก้วที่เวลา 50 วินาทีและ ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ทำการทดสอบด้วยดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรที่เวลา 1800 วินาทีซึ่งจะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน โดยที่จะพบ Contamination เกาะอยู่เต็ม ABS ของหัวอ่าน/เขียน (รูปที่ 5.5(ซ้าย)) ในขณะที่พบ Contamination บน ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ทดสอบด้วยดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (รูปที่ 5.5(ขวา))

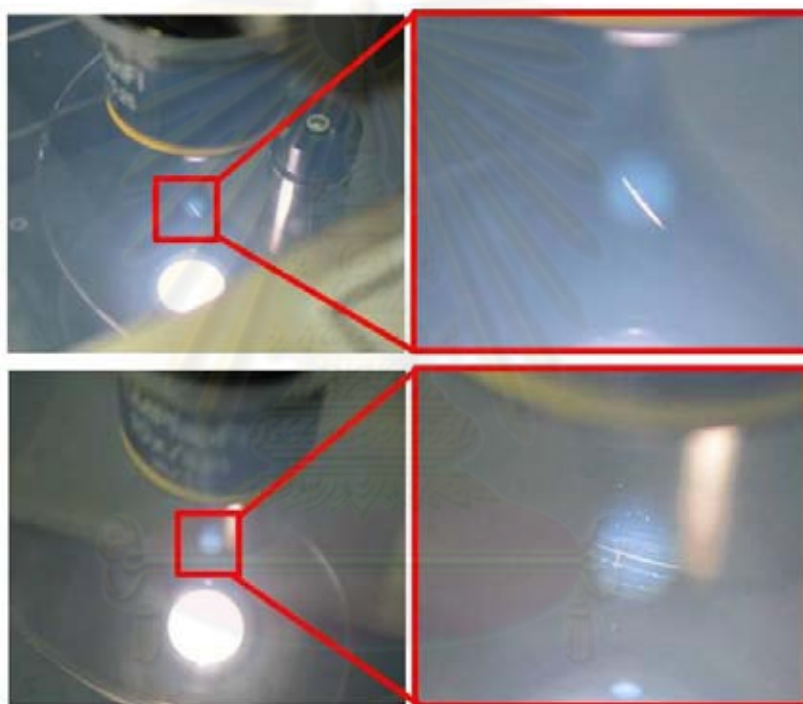


รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบอายุการใช้ของจานแก้วเปรียบเทียบกับดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตร



รูปที่ 5.5 ลักษณะ ABS ของหัวอ่าน/เขียน (ซ้าย) ABS ที่วัดด้วยจานแก้วที่เมื่อเวลาผ่านไป 50 วินาที (ขวา) ABS ที่วัดด้วยดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่เวลา 1800 วินาที

จากนั้นจึงทำการตรวจสอบรอยขีดข่วนบนผิวหน้าของทั้งจานแก้วและดิสก์ที่ใช้ทำการทดสอบ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงถึงผิวหน้าของจานแก้วและดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตร และ DLC 15 นาโนเมตรหลังจากทดสอบการวัดอายุการใช้งาน (ที่ 58 วินาทีและ 1800 วินาที ตามลำดับ) ซึ่งพบรอยขีดข่วนทั้งบนผิวหน้าของจานแก้วและบนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตร ซึ่งจากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่าเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่า รอยขีดข่วนบนจานแก้วนั้นจะสามารถมองเห็นได้ชัดเจนกว่า และเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวัดอายุการใช้งานจึงนำดิสก์ทั้ง 2 แผ่นมาวัดขนาดของรอยขีดข่วน (Scratch profile) โดยใช้เครื่อง Profiler เพื่อที่จะเปรียบเทียบลักษณะของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.6 ผิวหน้าของดิสก์หลังจากทำการวัดอายุการใช้งาน (บน) พบรอยขีดข่วนอย่างชัดเจนบนจานแก้ว (ล่าง) รอยขีดข่วนบนดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร

5.2 การตรวจสอบรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ด้วยเครื่อง Profiler

การทดสอบนี้จะเป็นการใช้เครื่อง Profiler ในการตรวจสอบรอยขีดข่วนบนดิสก์ทั้ง 2 แผ่นที่เกิดขึ้นการทดสอบวัดอายุการใช้งานด้วยเครื่อง Flying height tester ในหัวข้อที่ 5.1 โดยที่เครื่อง Profiler จะเป็นการใช้ Probe ลากไปบนผิวของดิสก์เพื่อทำการสร้างภาพของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ (Scratch profile) โดยที่จะแตกต่างจากโหมด AFM ในเครื่อง Triboindenter ที่ใช้ในบทที่ 4 คือจะมีขอบเขตในการสแกนใหญ่กว่าซึ่งจะเหมาะกับการสร้าง

ภาพของรอยขีดข่วนที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยที่การทดสอบนี้มีเครื่องมือ, อุปกรณ์, ขั้นตอนการทดสอบ และ ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัด

1. เครื่องวัด Profiler โมเดล P.16+ ของบริษัท KLA-tencor ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 เครื่อง Profiler โมเดล P. 16+ ของบริษัท KLA-Tencor

อุปกรณ์

1. ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร
2. จานแก้ว

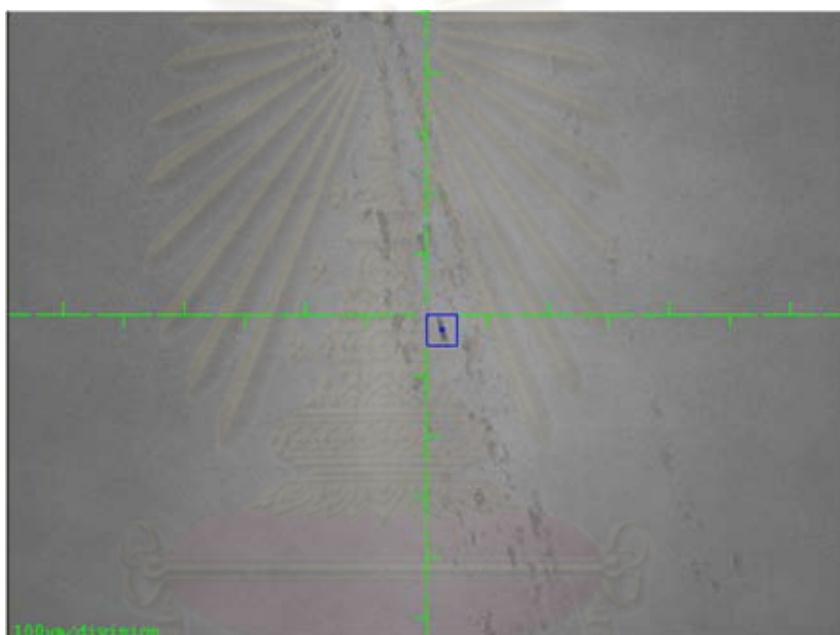
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการสแกนผิวหน้าของดิสก์บริเวณที่เกิดรอยขีดข่วนซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพบนกล้อง CCD โดยที่ทำการสแกนเป็นพื้นที่ 100 ไมโครเมตร x 100 ไมโครเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น
2. ทำการสแกนซ้ำดิสก์ละ 3 รอยขีดข่วนเพื่อยืนยันผลการทดสอบ

ผลการทดสอบ

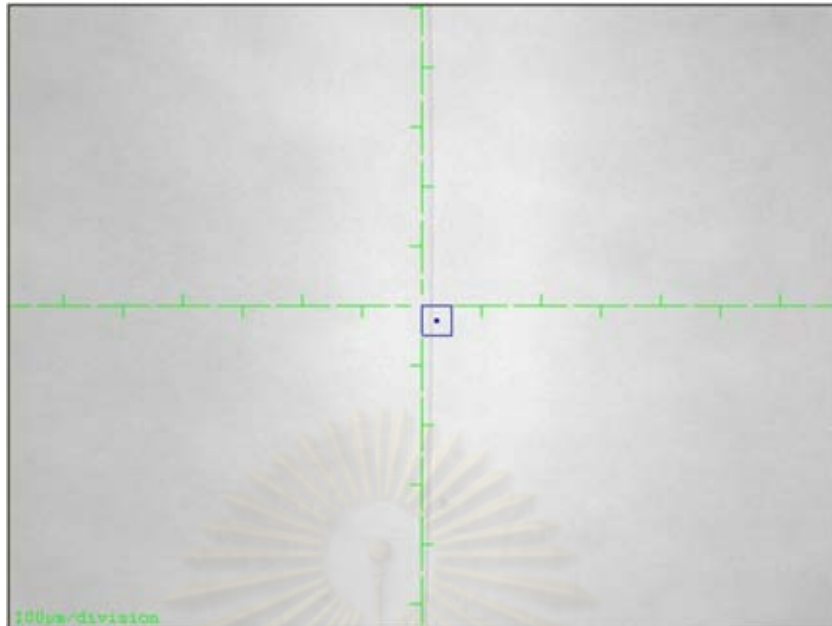
ผลจากการส่องดูด้วยกล้อง CCD ที่ติดอยู่ที่เครื่อง Profiler ในเบื้องต้นพบว่าขนาดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนจานแก้วกับดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรนั้น

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ซึ่งแสดงในหน่วยสเกล 100 ไมโครเมตรจะเห็นได้ว่ารอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนแก้วนั้นมีขนาดประมาณ 400 ไมโครเมตร ในขณะที่รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรนั้นมีขนาดเล็กกว่านั้นมาก ซึ่งรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนจานแก้วนั้นจะเป็นลักษณะไม่ต่อเนื่องกัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบเฉลี่ยนั้นเพียง 58 วินาทีหรือก็คืออายุการใช้งานของจานแก้วที่ได้จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.1 แต่รอยขีดข่วนบนดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรนั้นจะเกิดต่อเนื่องกันเป็นลักษณะตามเส้นรอบวงของดิสก์เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทดสอบวัดอายุการใช้งานนั้นมากกว่า



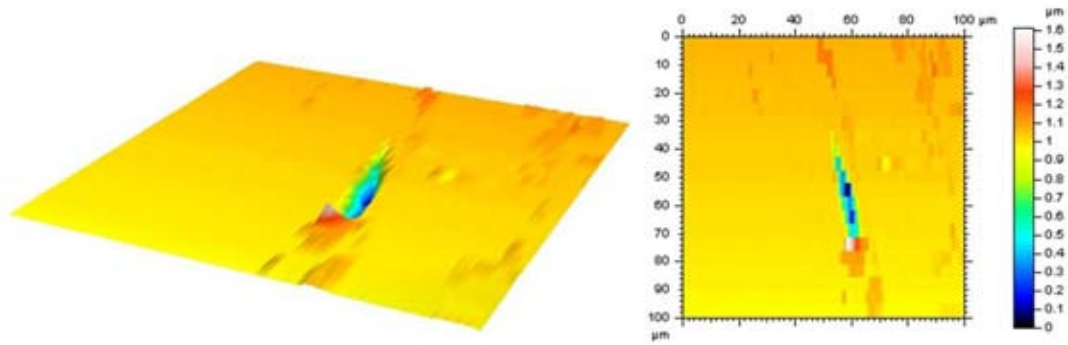
รูปที่ 5.8 รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนจานแก้วซึ่งมีขนาดประมาณ 400 ไมโครเมตรที่ได้จากการมองผ่านกล้อง CCD ของเครื่อง Profiler โดยแสดงผลในสเกล 100 ไมโครเมตร

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

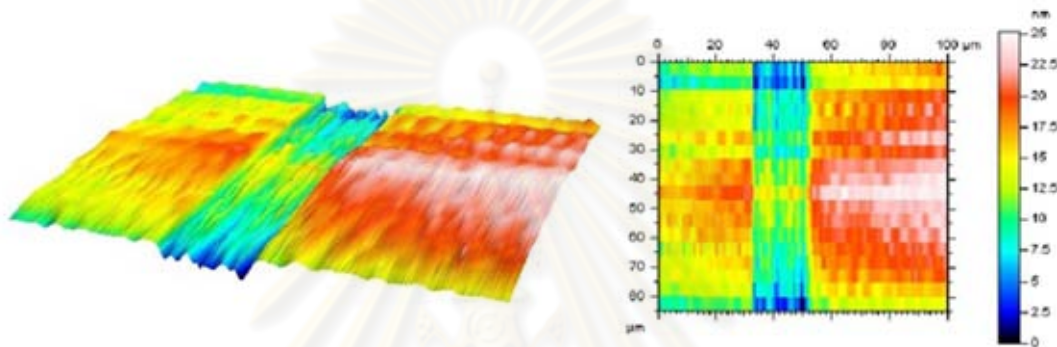


รูปที่ 5.9 รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรซึ่งมีขนาดประมาณ 18 ไมโครเมตรที่ได้จากการมองผ่านกล้อง CCD ของเครื่อง Profiler โดยแสดงผลในสเกล 100 ไมโครเมตร

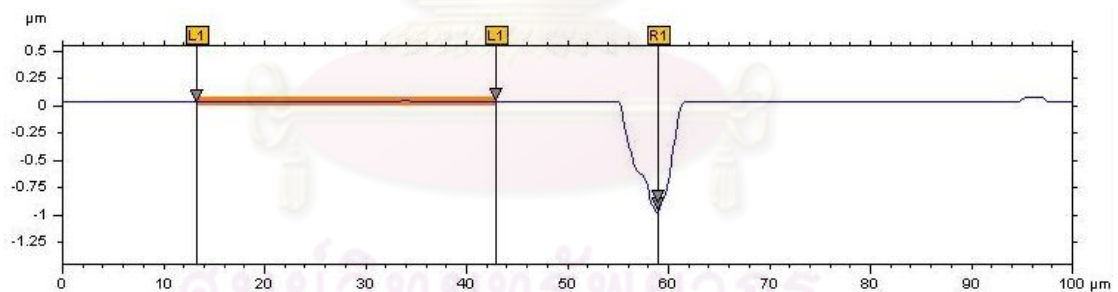
ซึ่งภาพของรอยขีดข่วนที่ได้จากเครื่อง Profiler ของจานแก้วและดิสก์ที่มีซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรแสดงไว้ดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 และจากภาพตัดขวาง (Cross section) ของรอยขีดข่วนของจานแก้วและดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความลึกของรอยขีดข่วนบนจานแก้วนั้นประมาณ 1 ไมโครเมตรส่วนความลึกของรอยขีดข่วนของดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรนั้นประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งจากภาพตัดขวางจะเห็นว่าความกว้างของรอยขีดข่วนของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร (18 นาโนเมตร) นั้นกว้างกว่ารอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนจานแก้ว (6.3 นาโนเมตร) เนื่องจากบนจานแก้วนั้นเกิดรอยขีดข่วนไม่ต่อเนื่องจึงต้องเลือกวัดในบริเวณที่สนใจซึ่งไม่ใช่ความกว้างทั้งหมดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น (ประมาณ 400 นาโนเมตร)



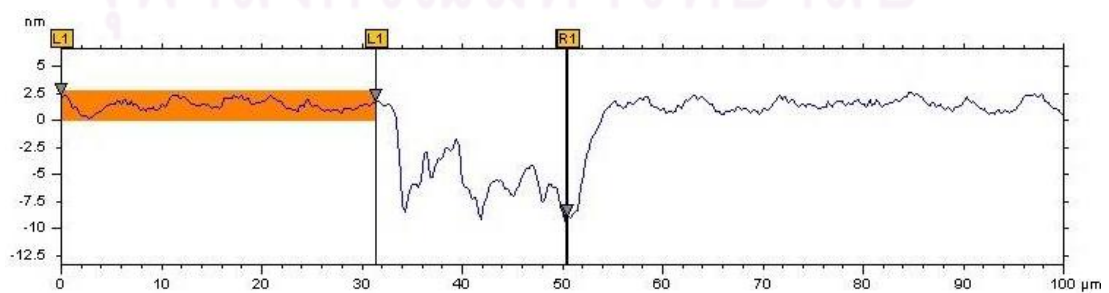
รูปที่ 5.10 ภาพของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนแก้วบนบริเวณที่ทำการวัด



รูปที่ 5.11 ภาพของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร



รูปที่ 5.12 ภาพตัดขวางของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนแก้วบนบริเวณที่ทำการวัดโดยมีความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นคือ 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.13 ภาพตัดขวางของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรโดยมีความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นคือ 10 นาโนเมตร

5.3 การประเมินค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการใช้ดิสก์ที่สร้างขึ้น

การประเมินค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้จานแก้ว และดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอนและ DLC แสดงไว้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height ระหว่างจานแก้วและดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอนและ DLC

Estimated cost	Glass disk	Fabricated disk	Unit
Glass disk cost	10,000	10,000	Baht
Fabrication cost	0	~2,000	Baht
Total cost	10,000	~12,000	Baht
Lifetime extension	1	30	Times
Total cost / Lifetime	10,000	~400	Baht
Cost reduction	1	~25	Times
WD cost	2,000,000	80,000	Baht

จากตารางจะเห็นว่าค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้ว 1 แผ่นคือ 10,000 บาท ส่วนดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอนและ DLC จะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 12,000 บาท โดยที่เป็นค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้ว 10,000 บาทและค่าใช้จ่ายในการเคลือบผิวจานแก้วประมาณ 2,000 บาท และจากผลการทดสอบอายุการใช้งานพบว่าดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอนและ DLC มีอายุการใช้งานมากกว่าจานแก้วอย่างน้อย 30 เท่า จึงทำให้สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ต่ออายุการใช้งานได้ดังนี้ จานแก้ว 10,000 บาท และดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอนและ DLC ประมาณ 400 บาท จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายนั้นสามารถลดลงได้ถึง 25 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้จานแก้ว ดังนั้นค่าใช้จ่ายในกระบวนการวัด Flying height ในส่วนของจานแก้วของบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอลสามารถลดลง

จาก 2,000,000 บาท มาเป็น 80,000 บาทเท่านั้น ซึ่งก็คือสามารถลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการวัด Flying height ลงได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์

5.4 สรุปผลการทดสอบการวัดอายุการใช้งานของดิสก์

จากผลการทดสอบวัดอายุการใช้งานโดยใช้เครื่องวัด Flying height ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 และจากการยืนยันผลการทดสอบโดยใช้เครื่อง Profiler ในการสร้างภาพของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของดิสก์ทั้ง 2 แผ่นและทำการวัดขนาดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นดังที่แสดงผลไว้ดังรูปที่ 5.8 ถึงรูปที่ 5.13 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเคลือบผิวหน้าของจานแก้วด้วยซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรสามารถปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วให้เพิ่มขึ้นได้อย่างน้อย 30 เท่าโดยที่รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรนั้นมีขนาดเล็กกว่าที่เกิดขึ้นบนจานแก้วอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height สามารถลดลงได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับจานแก้ว



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

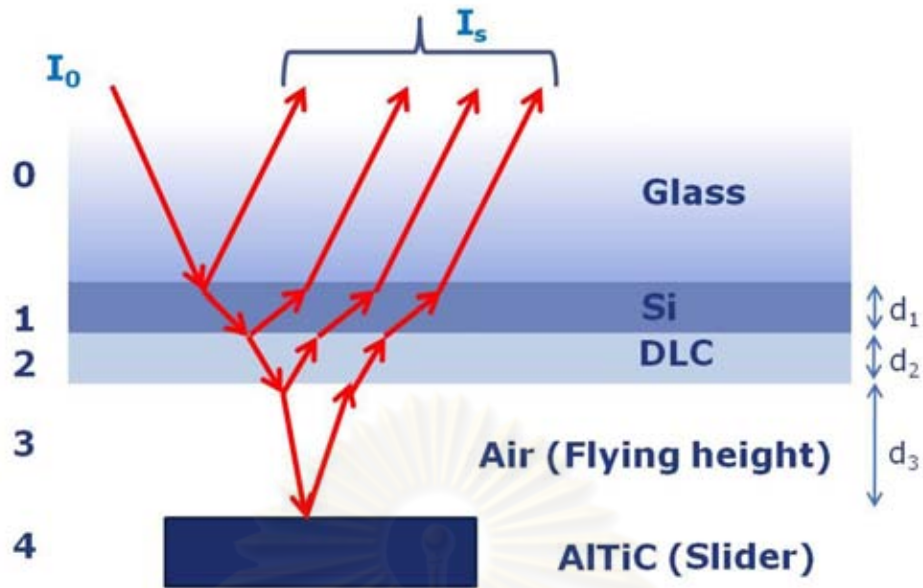
บทที่ 6

การประยุกต์ใช้งานของดิสก์ในเครื่อง Flying height tester

การทดสอบนำดิสก์ไปใช้งานคือการทดสอบความเหมาะสมในการนำดิสก์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในกระบวนการวัด Flying height โดยที่ดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นต้องสามารถใช้วัด Flying height ได้อย่างถูกต้อง แต่จากการเคลือบผิวของจานแก้วด้วยซิลิกอนและ DLC จะทำให้ค่าดรรรชนีหักเหของดิสก์ที่สร้างขึ้นแตกต่างไปจากเดิม และเนื่องจากในเครื่องวัด Flying height นั้นสามารถใส่ค่าดรรรชนีหักเหได้เพียงค่าเดียว (ไม่ได้ออกแบบมาให้ใช้ดิสก์ที่มีการเคลือบผิว) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าดรรรชนีหักเหพัทธ์ใหม่ของดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC ก่อนจะใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้นในการวัด Flying height ทั้งนี้ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณหาค่าดรรรชนีหักเหพัทธ์ดังกล่าวได้โดยประยุกต์ใช้ Thin film theory ถ้ามีโมเดลที่ถูกต้อง (ค่าความหนาและดรรรชนีหักเหของฟิล์มแต่ละชั้น) แต่เนื่องจากโมเดลนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าดรรรชนีหักเหพัทธ์ที่ถูกต้องที่สุดจึงต้องทำการวัดการวัดความเข้มของแสงสะท้อนจากดิสก์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้หาค่าดรรรชนีหักเหพัทธ์ที่เหมาะสม ในบทนี้จะกล่าวถึง Thin film theory ในการคำนวณแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบทที่ 6.1 ส่วนการหาค่าดรรรชนีหักเหพัทธ์ของดิสก์ที่พัฒนาขึ้นจะกล่าวไว้ในบทที่ 6.2 และการทดสอบใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้นในการวัด Flying height จะกล่าวถึงในบทที่ 6.3

6.1 การคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์

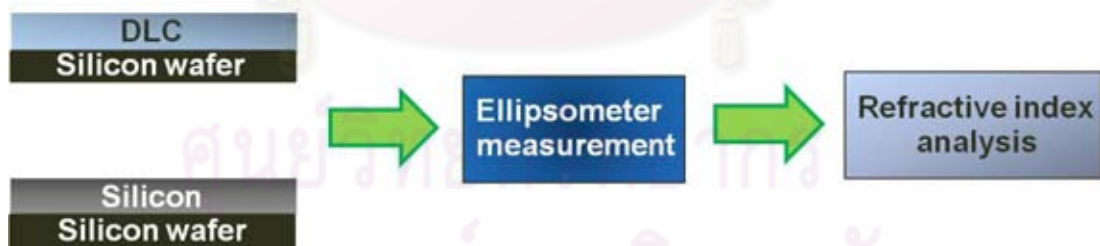
การหาความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์นั้นสามารถประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าดรรรชนีหักเหพัทธ์ของดิสก์ได้ โดยการคำนวณความเข้มแสงที่สะท้อนกลับจากดิสก์นี้กระทำโดยใช้ทฤษฎี Thin film theory ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.2 โดยดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็น 3 ชั้นประกอบด้วยชั้นของจานแก้ว, ซิลิกอน และ DLC ในการนำดิสก์ชนิดนี้ไปใช้ในเครื่องวัด 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 และรูปที่ 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 จากนั้นจะนำข้อมูลดรรชนีหักเหไปใช้เพื่อการคำนวณทางทฤษฎี

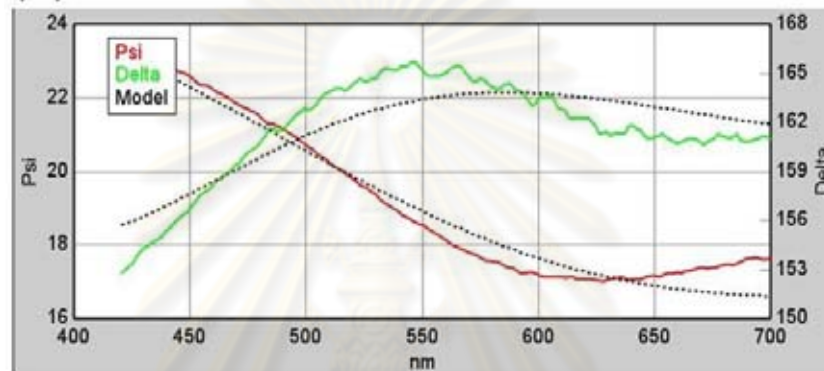
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Silicon

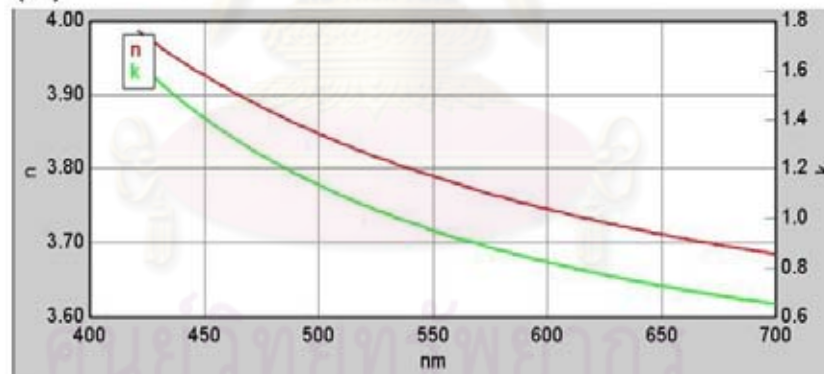
(a)

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)



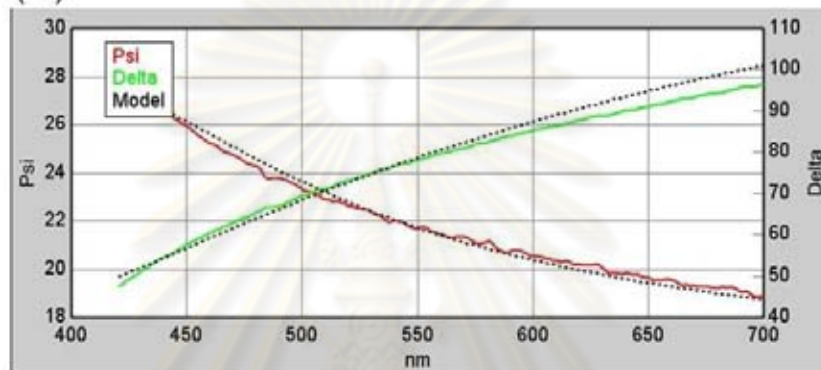
รูปที่ 6.3 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอน การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Cauchy (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c)

DLC

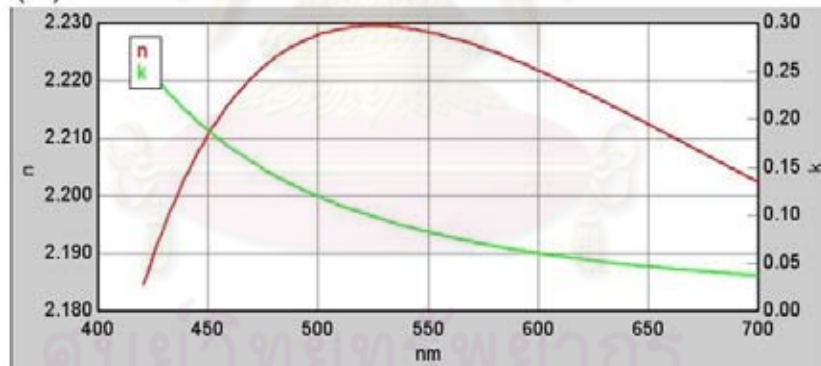
(a)

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 การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Cauchy (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC ที่แปลงมาจากผลการ 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

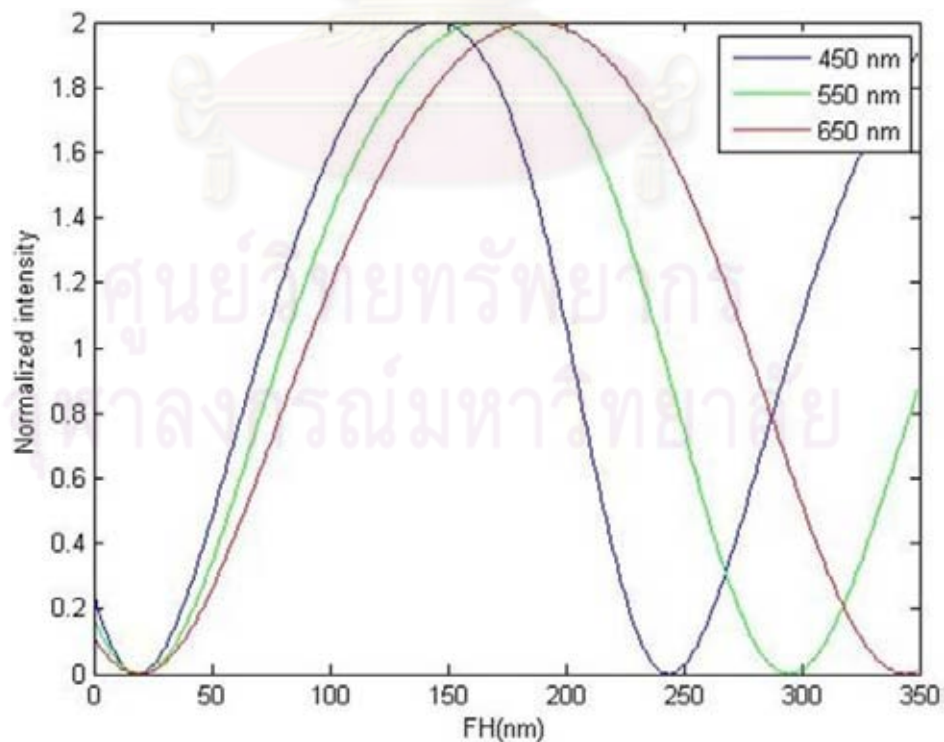
$$\frac{I_s}{I_0} = |R^2| \quad \text{---- (6.7)}$$

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

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ในทางปฏิบัติค่าตรรกะนี้หักเหและความหนาของฟิล์มที่ปลูกอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งอาจทำให้ผลการคำนวณทางทฤษฎีนั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงดังนั้นจึงต้องทำการเก็บข้อมูลความเข้มของแสงที่วัดได้กระบวนกรวัด Flying height เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี จากนั้นจะใช้ค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดในการคำนวณตรรกะนี้หักเหลัพท์ของดิสก์ โดยจะเก็บค่าความเข้มแสงจาก ABS ของหัวอ่าน/เขียนจากนั้นจะทำการ Normalize ข้อมูลให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎี แต่จากหลักการในการวัด Flying height ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.2 ดิสก์ที่จะสามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องนั้นจำเป็นต้องทราบตรรกะนี้หักเหของดิสก์ก่อน ซึ่งในการทดสอบนี้ยังไม่มีตรรกะนี้หักเหที่ถูกต้องของดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอน 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

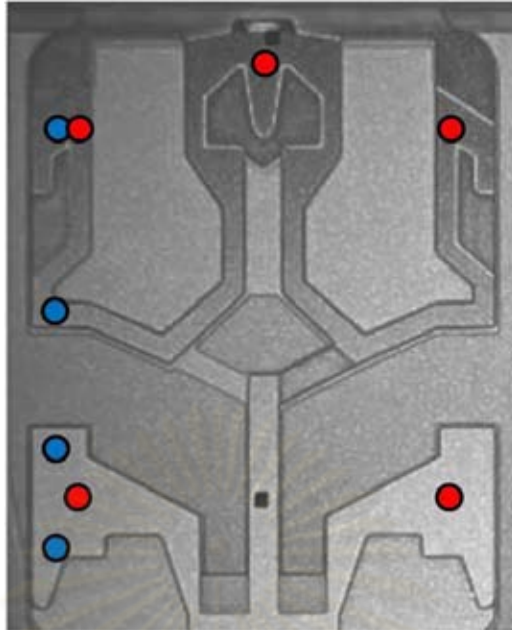
1. ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร
2. จานแก้วปกติ (Glass disk)
3. หัวอ่าน/เขียนที่บินด้วยความสูง 10 ถึง 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ

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

ของ Flying height ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี) จากค่าตรรกะนี้หักเหของดิสก์ 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 ไตอะแกรมของตำแหน่งที่วัดของกระบวนการวัดปกติเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่จะใช้ทำการวัดในการทดสอบนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 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

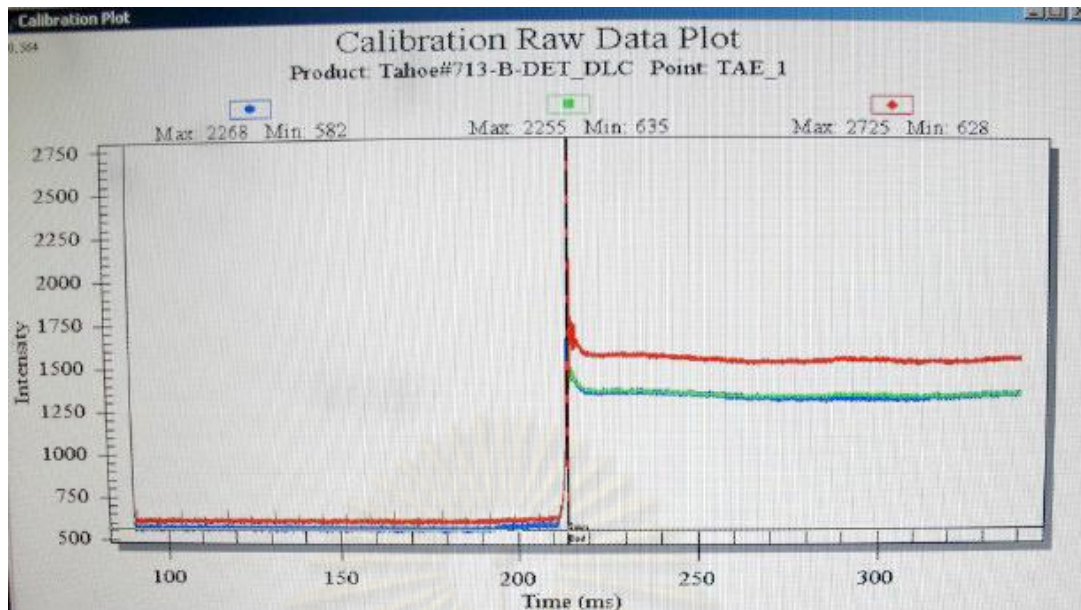


รูปที่ 6.6 ตำแหน่งที่ทำการวัด Flying height บน ABS โดยที่กระบวนการวัดปกติแสดงด้วยจุดสีแดง ส่วนตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบนี้แสดงด้วยจุดสีน้ำเงิน (จากบนไปล่าง TAE_1, TAE_2, TAE_3 และ TAE_4)

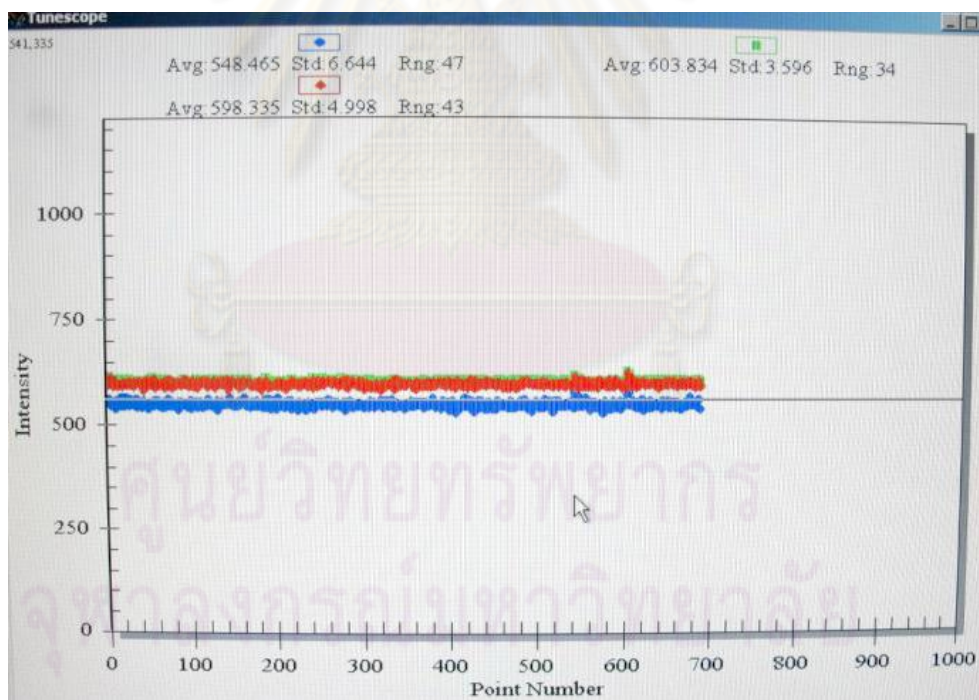
Point	FH
TAE_1	0.7791
TAE_2	1.7165
TAE_3	2.4406
TAE_4	3.2274

รูปที่ 6.7 ผลการวัด Flying height บนจานแก้ว (ไมโครนีว) โดยใช้ค่าดรรชนีหักเหของจานแก้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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



รูปที่ 6.9 ค่าความเข้มแสงที่อ่านได้ที่ตำแหน่ง TAE_1 โดยใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร

ผลการทดสอบ

ผลการวัด Flying height และความเข้มแสงของจานแก้วแสดงไว้ดังตารางที่ 6.4 และ ตารางที่ 6.5 ส่วนผลการวัด Flying height บนจานแก้วและค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัดด้วย ดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรแสดงไว้ดังตารางที่ 6.6 และข้อมูลความ เข้มแสงที่ Normalize แล้ว (Normalized intensity) แสดงไว้ดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.4 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากจานแก้ว

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 ของจานแก้ว

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

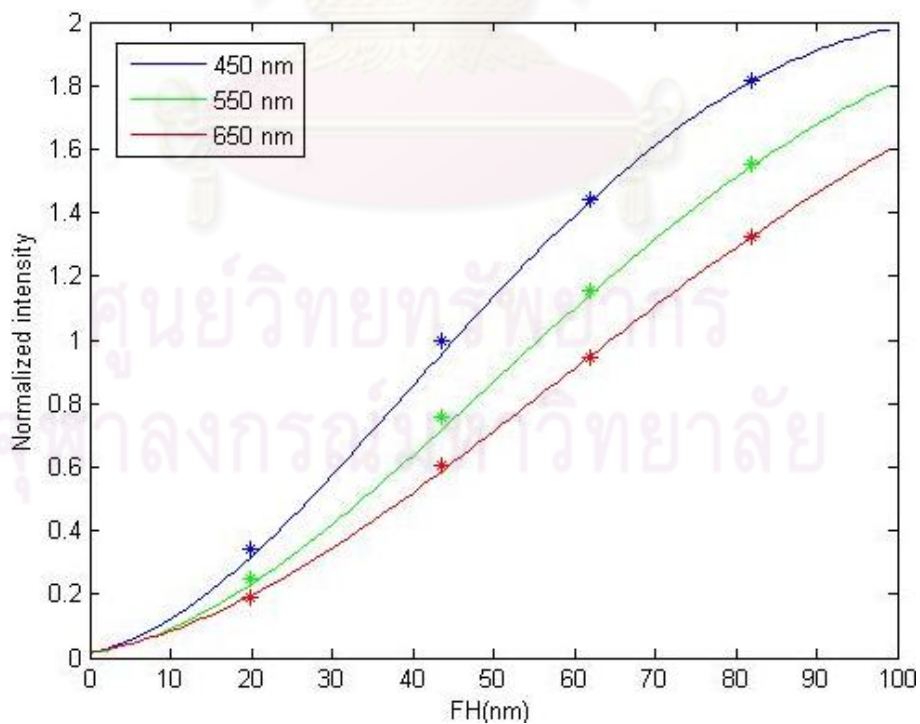
ตารางที่ 6.6 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากจานแก้ว)

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

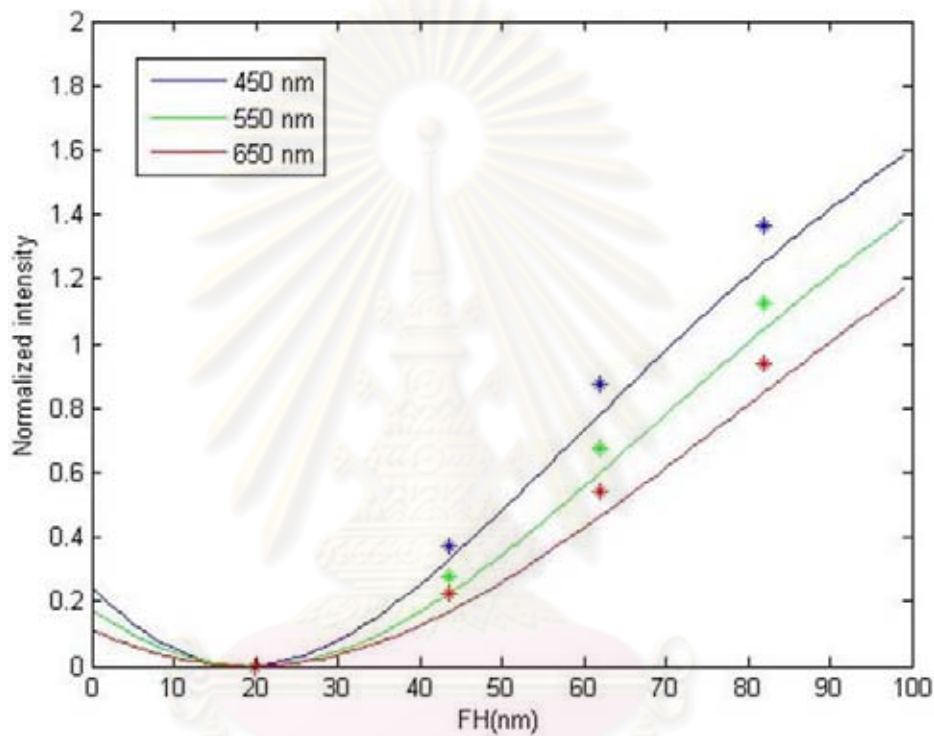
Point	Wavelength 450 nm	Wavelength 550 nm	Wavelength 650 nm
TAE_1	$-0.04 \cong 0$	$-0.04 \cong 0$	$-0.03 \cong 0$
TAE_2	0.37	0.28	0.23
TAE_3	0.87	0.68	0.54
TAE_4	1.36	1.13	0.94

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



รูปที่ 6.10 เส้นโค้งความเข้มแสงของจานแก้วจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหของจานแก้วเปรียบเทียบกับค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัด

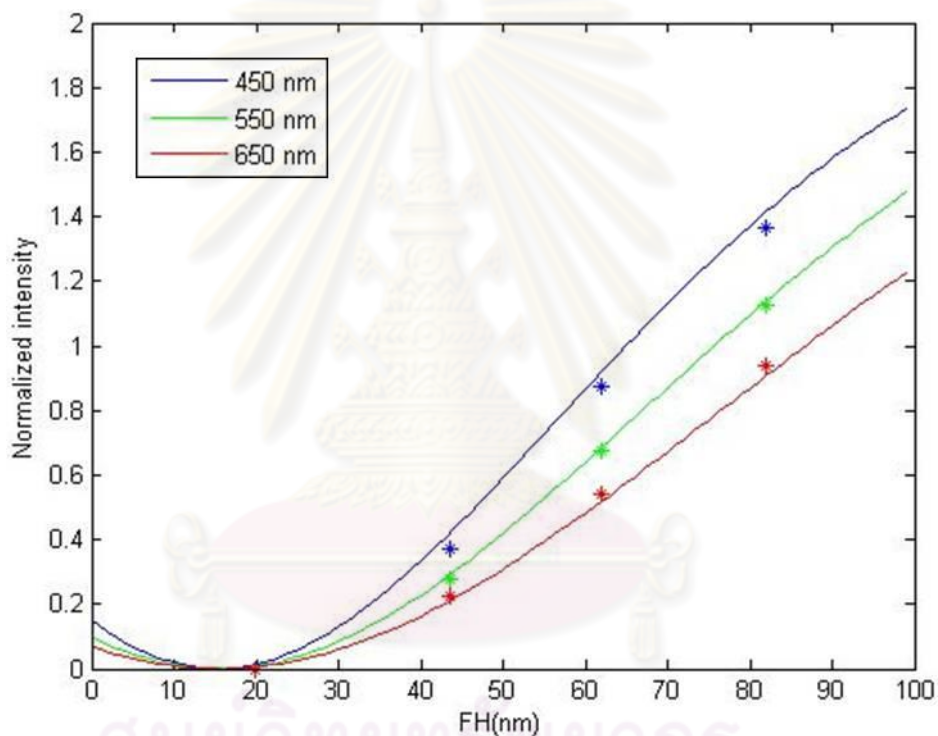
ในส่วนของดิสก์ที่สร้างก็จะทำในลักษณะเดียวกันโดยจะใช้ข้อมูล Flying height ที่วัดได้จากงานแก้วและข้อมูลความเข้มแสงที่วัดจากดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ Normalize แล้ว (ตารางที่ 6.6 และ ตารางที่ 6.7) ทำให้สามารถนำมาพลอตเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีจากหัวข้อ 6.1.2 ได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 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) จนกระทั่งได้ความหนาของฟิล์มที่ทำให้ข้อมูลของความเข้มแสงที่มาจากการวัดและผลจากการคำนวณนั้นมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด 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 ซึ่งจุดสีที่มีความหนาซิลิกอน 0.65 นาโนเมตรและ DLC 11.3 นาโนเมตรให้ผลการ Fitting ที่ดีที่สุด

6.1.4 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 6.1.3 พบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและผลจากการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งอาจเกิดได้จากความคลาดเคลื่อนทั้งในส่วนของความหนาของฟิล์มที่ปลูกได้ และในส่วนของดรรชนีหักเหของฟิล์มที่วัดได้จาก Ellipsometer ซึ่งมี MSE ที่ไม่ต่ำนัก

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

6.2 การหาค่าตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ของดิสก์ที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากการวัด Flying height นั้นสามารถใส่ค่าตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ได้เพียงค่าเดียว ดังนั้นตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ที่ใช้นั้นต้องสามารถแสดงคุณสมบัติทางแสงโดยรวมของดิสก์ได้ (ตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ของดิสก์) ซึ่ง Theory curve ที่สร้างขึ้นในเครื่องวัด Flying height นั้นจะคำนวณจากตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ที่ใส่เข้าไปเท่านั้น ซึ่งในการวัด Flying height ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณ (Theory curve) นั้นจะส่งผลให้การวัด Flying height ผิดพลาดได้ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานของดิสก์ที่สร้างขึ้นในเครื่องวัด Flying height ให้สามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องแม่นยำนั้น ต้องคำนวณตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์มาอย่างถูกต้องจึงจะสามารถสร้าง Theory curve ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกใช้วิธีคำนวณตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์จากการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด โดยที่มีขั้นตอนคือ เก็บข้อมูลความเข้มแสงจากเครื่องวัด Flying height จากนั้นทำการ Fitting ข้อมูลดังกล่าวด้วยการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปลี่ยนแปลงตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ของดิสก์ โดยที่ค่าตรรกะนี้หักเหลือพัทธ์ของดิสก์ที่ให้ผลการ Fitting ดีที่สุดจะถูกเลือกเพื่อนำไปทดสอบวัด Flying height เปรียบเทียบกับจานแก้ว

6.2.1 อัลกอริทึมของเครื่องวัด Flying height

จากหลักการในการวัด Flying height ของเครื่องวัด Flying height ชนิด Three wavelength interferometry ซึ่งจะทำให้การวัดค่าความเข้มแสงและแปลงเป็นค่า 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 นั้นต้องเป็นดรรชนีหักเหหลักที่สามารถแสดงถึงคุณสมบัติทางแสงโดยรวมของดิสก์ที่สร้างขึ้นได้



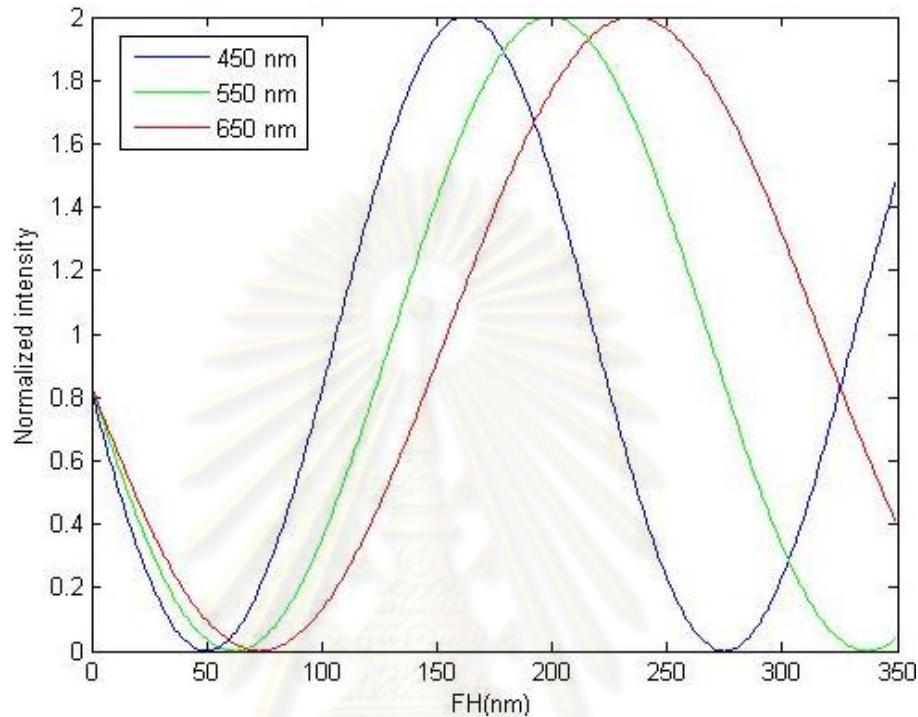
รูปที่ 6.13 แบบจำลองในการคำนวณที่เครื่องวัด Flying height ใช้ในการสร้าง Theory curve ซึ่งจะพิจารณาดิสก์เสมือนมีชั้นเดียว

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

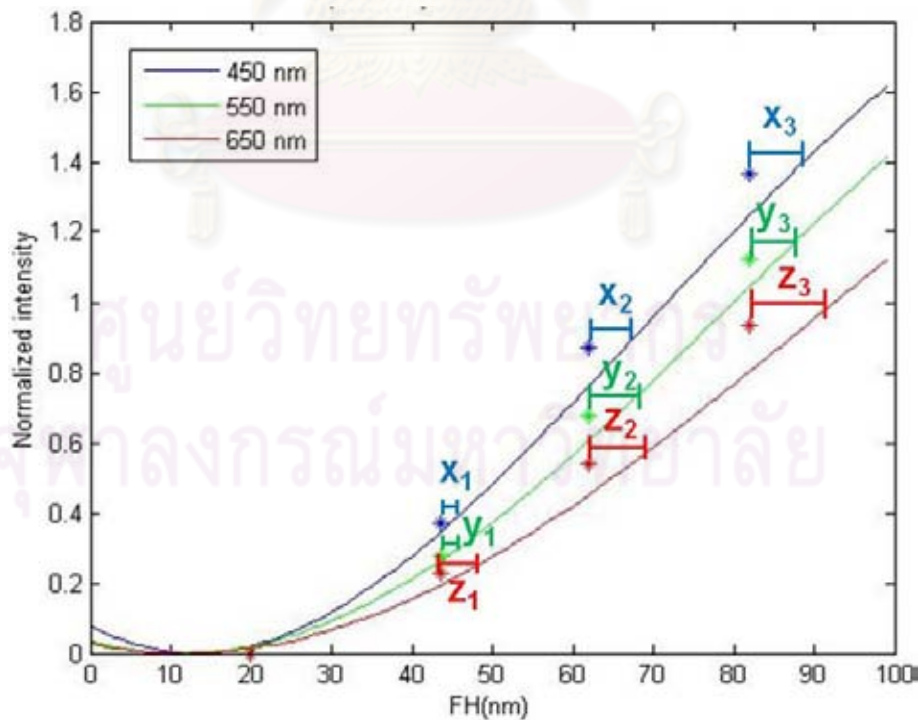


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ที่คำนวณจากสมการที่ (6.9) ซึ่งกำหนดให้ค่าดรรชนีหักเหล์พ์ของทั้ง 3 ความยาวคลื่นเป็น $1+0.01i$

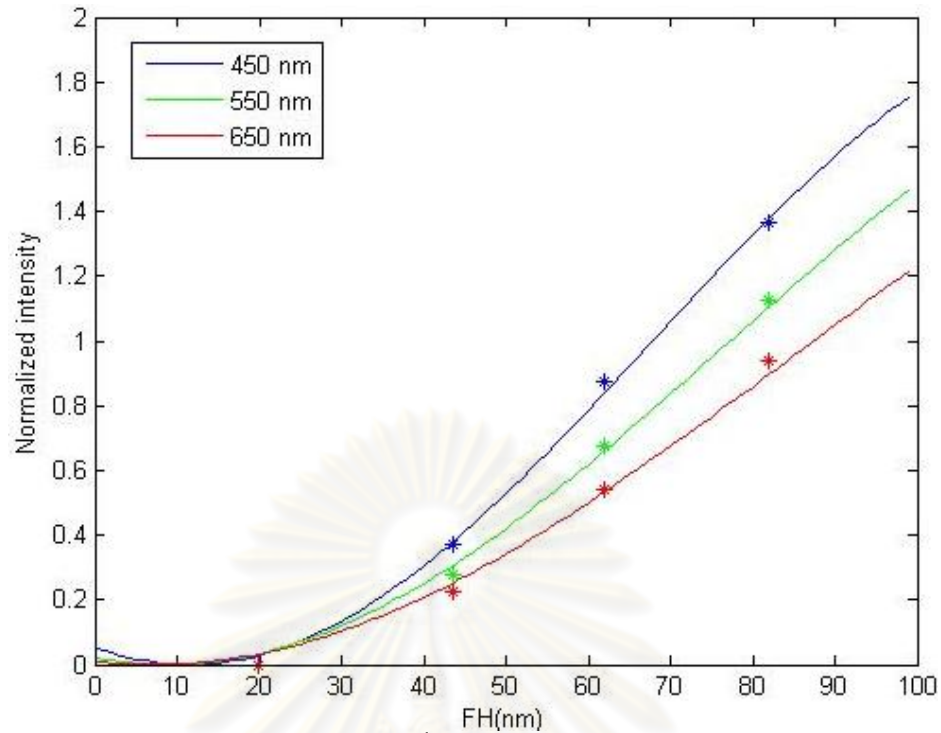
6.2.2 การคำนวณดรรชนีหักเหล์พ์จากข้อมูลที่ได้จากการวัด

วิธีที่จะใช้ในการคำนวณดรรชนีหักเหล์พ์ของดิสก์เพื่อนำไปใช้ในเครื่องวัด Flying height จะใช้ค่าดรรชนีหักเหของดิสก์ชั้นเดียวที่ทำให้ความเข้มของแสงสะท้อนใกล้เคียงกับข้อมูลความเข้มแสงที่มาจากกรวัดในหัวข้อที่ 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 ไปจนกระทั่งได้ค่าดรรชนีหักเหที่ให้การคำนวณ (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 โดยที่กำหนดเงื่อนไขคือค่าตรรกะนี้หักเหที่ทำให้ผลรวมความคลาดเคลื่อนของ Flying height ของข้อมูลที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ดังที่แสดงตัวอย่างของเงื่อนไขไว้ในรูปที่ 6.15 ซึ่งค่าตรรกะนี้หักเหที่ทำให้ผลรวมของ $\sum_{i=1}^3 (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2)$ 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 และค่าตรรกะนี้หักเหที่ดีที่สุดแสดงไว้ดังตารางที่ 6.8 โดยที่สามารถดูรายละเอียดของโปรแกรมได้ที่ภาคผนวก ข.1



รูปที่ 6.15 ตัวอย่างค่าความแตกต่างของค่า Flying height ที่ความเข้มแสงเดียวกันที่จะใช้เป็นเงื่อนไขในการ Fitting



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

ตารางที่ 6.8 ค่าดรรชนีหักเหล์ฟ์ที่ใช้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด

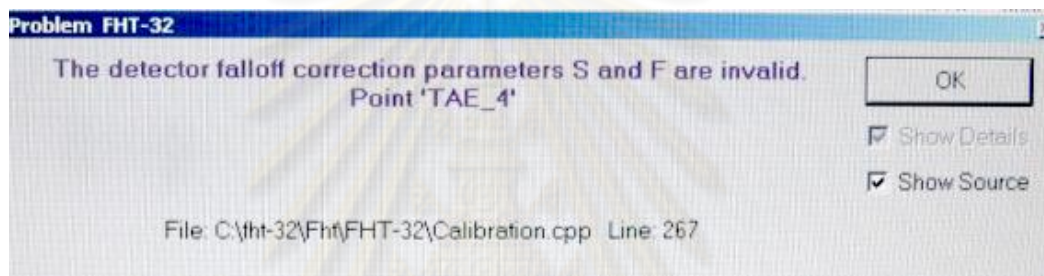
Wavelength (nm)	Refractive index (n+ki)
450	1.05+0.02i
550	1.07+0.02i
650	1.12+0.03i

6.2.3 ข้อจำกัดของค่าดรรชนีหักเหล์ฟ์ในเครื่อง Flying height tester

จากการทดสอบวัด Flying height ด้วยดรรชนีหักเหล์ฟ์นั้นพบว่าข้อจำกัดของดรรชนีหักเหล์ฟ์ที่สามารถใช้กับเครื่องวัด Flying height tester ได้ ซึ่งพบทั้งข้อจำกัดในส่วนของ n และข้อจำกัดในส่วนของ k ซึ่งจะส่งผลต่อการวัด Flying height แตกต่างกันไปดังนี้

ข้อจำกัดของ n

จากการทดสอบวัด Flying height โดยใช้ดรรชนีหักเหที่ตารางที่ 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

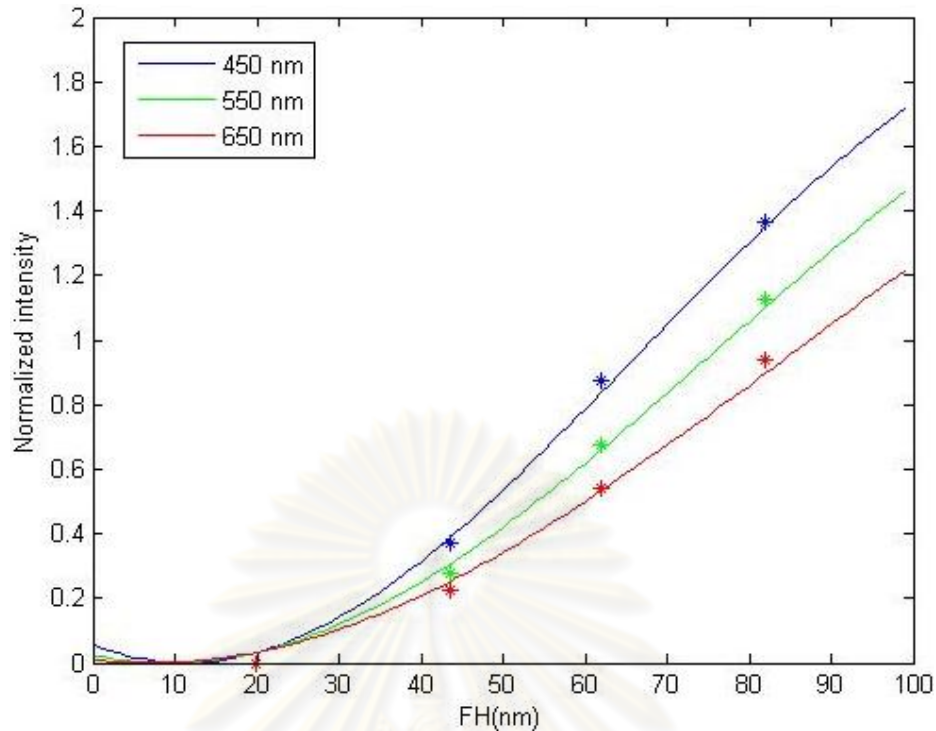


รูปที่ 6.17 ข้อความแสดง Error ขณะที่ทำการ Calibration ที่ตำแหน่ง TAE_4

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



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

ตารางที่ 6.9 ค่าดรรชนีหักเหล์พ์ที่ให้การ Fitting ดีที่สุดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด (กำหนดให้ค่า n ของดรรชนีหักเหล์พ์มากกว่า 1.1 เป็นต้นไป)

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

จากนั้นนำค่าดรรชนีหักเหล์พ์ที่แสดงไว้ดังตารางที่ 6.9 ไปทดสอบในการวัด Flying height โดยพบว่าที่ค่าดรรชนีหักเหล์พ์นี้เครื่องสามารถทำการ Calibration ได้และสามารถเข้าสู่กระบวนการวัด Flying height ได้โดยที่ผลของการวัด Flying height เปรียบเทียบกับงานแก้วแสดงไว้ดังรูปที่ 6.19 และตารางที่ 6.10

Point	FH	Point	FH
TAE_1	0.7791	TAE_2	0.9528
TAE_2	1.7165	TAE_3	1.7571
TAE_3	2.4406	TAE_4	2.5339
TAE_4	3.2274		

รูปที่ 6.19 เปรียบเทียบระหว่างค่า Flying height (ไมโครนิ้ว) ที่วัดได้บนจานแก้วกับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหล์พธ์ในตารางที่ 6.9

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

Point	FH บนจานแก้ว (nm)	FH บนดิสก์ที่พัฒนาขึ้น (nm)	ΔFH (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 นาโนเมตรโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหล์พธ์ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 นั้นยังคงคลาดเคลื่อนจากค่า Flying height ที่วัดได้จากจานแก้วพอสมควร (ประมาณ 17 ถึง 19 นาโนเมตร) จึงตั้งสมมติฐานว่าอัลกอริทึม (ทางผู้ผลิตไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลของอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณ Flying height ของเครื่องวัดได้) ที่ใช้ในการคำนวณ Flying height ของเครื่องวัดนั้นอาจสร้างมาเพื่อให้ใช้จานแก้วในการวัดเท่านั้น และอาจไม่นำค่า k ของดรรชนีหักเหล์พธ์ไปใช้ในการคำนวณ ซึ่งค่า k นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เฟสของเส้นโค้งความเข้มแสงเปลี่ยนไป (Phase shift) ซึ่งจะทำให้ลักษณะของเส้นโค้งความเข้มแสงนั้นแตกต่างไปจากจานแก้ว

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

ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า k ของดรรชนีหักเหของจานแก้วทุกความยาวคลื่นไปตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.4 โดยจะทดสอบด้วยหัวอ่าน/เขียนตัวเดียวกัน ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่า Flying height ของจานแก้วที่เปลี่ยนแปลงค่า k ของทุกความยาวคลื่นจาก 0.1 ถึง 0.4 นั้นมีค่าไม่แตกต่างกับการวัด Flying height ที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหตามปกติของจานแก้ว (ค่า $k = 0.02$) ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณ Theory curve ของเครื่องวัด Flying height นั้นจะไม่พิจารณาค่า k ของดรรชนีหักเหของดิสก์ และจะทำให้ Theory curve ที่ได้จากการคำนวณนั้น มีลักษณะใกล้เคียงกับ Theory curve ของจานแก้ว ซึ่งจะทำให้ Theory curve นั้นมีความแตกต่างจากข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด

สรุปข้อจำกัดของดรรชนีหักเห

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

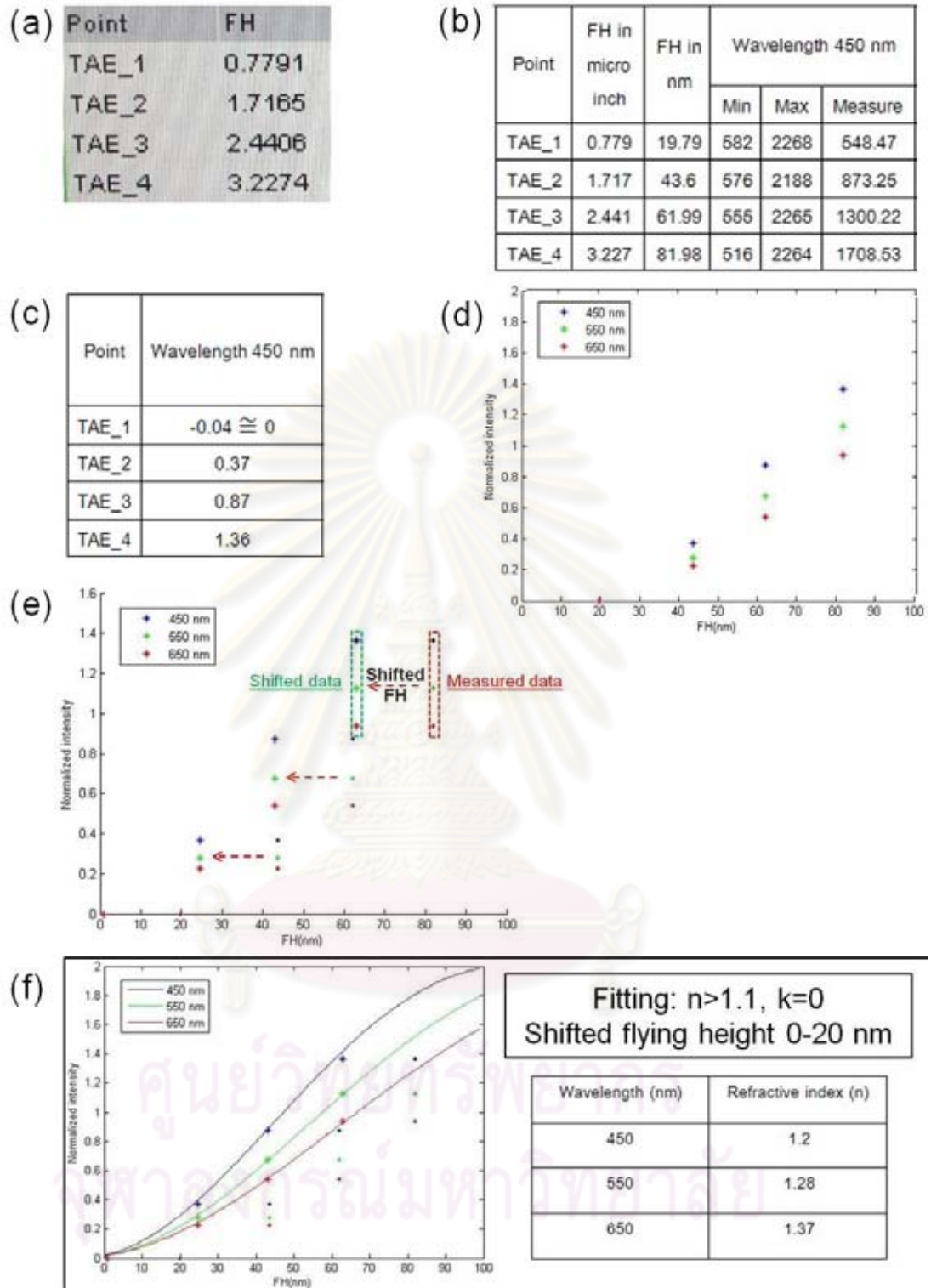
6.2.4 การหาค่าดรรชนีหักเหที่พัฒนาขึ้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้วัด

ในการหาค่าดรรชนีหักเหที่พัฒนาขึ้นที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้วัด Flying height ได้ถูกต้องนั้น มีขั้นตอนและข้อจำกัดหลายอย่างดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว เช่น การเก็บข้อมูลความเข้มแสงจากการวัด, การที่เครื่องวัด Flying height ยอมให้ใส่ค่าดรรชนีหักเหได้เพียงค่าเดียว และข้อจำกัดของดรรชนีหักเห ซึ่งจากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 6.2.3 แสดงให้เห็นว่าเครื่องวัด Flying height จะไม่พิจารณาค่า k ของดรรชนีหักเห ดังนั้นค่าดรรชนีหักเหของดิสก์จึงจะมีเพียงค่า n ซึ่งจากข้อจำกัดนี้ทำให้เราไม่สามารถกำหนดค่าดรรชนีหักเหด้วย n เพียงค่าเดียวที่ทำให้ Theory curve ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการวัดได้ (ซึ่ง k เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เฟสของความเข้มแสงเลื่อนไปจากเดิม) วิธีการที่จะแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวนี้สามารถทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของข้อมูลวัดตามแนวแกน x ดังแสดงในรูปที่ 6.20(e) แล้วหาค่าดรรชนีหักเหที่ n ซึ่งการกระทำดังกล่าวเปรียบได้กับการเพิ่มหรือลด Flying height โดยตั้งใจเพื่อให้ได้ลักษณะของกราฟที่ดีที่สุด ซึ่งในการนำค่าดรรชนีหักเหที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการวัดเมื่อได้ค่า Flying height มาแล้วจึงต้องนำมารวมหรือหักลบกับระยะ Flying height ที่ทำการเลื่อนออกเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ดังนั้นในการหาค่าดรชนี้ห้ก้เหล้พ้ที่สำมรถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องนั้นจะ ใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงระยะเลื้อนค่า Flying height ของข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด ควบคู่ไปก้กับการเปลี่ยนแปลงค่า n ของดรชนี้ห้ก้เห จนกระทั่งสำมรททำให้ข้อมูลที่ได้จากการ วัดและการคำนวณมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยสำมรทสรุ่ข้้นตอนที่ใช้ในการหาค่า ดรชนี้ห้ก้เหล้พ้ของดิสก์ที่พัฒนาข้้นที่สำมรทนำไปประยุกต์ใช้ในการวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องได้ดังนี้

- 1-3. ทำการทดสอบเหมือนข้้นตอนที่ 1, 2 และ 3 ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1.3 ซึ่งจะ ได้ข้อมูลของ Flying height จากงานแก้ว (ในหน่วยไมโครนิ้ว) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.20(a), ข้อมูลความเข้มแสงของดิสก์ที่พัฒนาข้้น (ในการทดสอบนี้ใช้ดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตร) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.20(b) ซึ่งเมื่อนำมา Normalize แล้วได้ดังรูปที่ 6.20(c) และจากข้อมูลในรูปที่ 6.20(a) และ (c) สำมรทนำมาพลอตจุดบนกราฟเพื่อใช้ในการคำนวณได้ดังรูปที่ 6.20(d)
4. ทำการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากข้อที่ 3 เพื่อหาดรชนี้ห้ก้เหล้พ้ของ ดิสก์โดยเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้คือ 1. เปลี่ยนแปลงค่า n ของดรชนี้ห้ก้เห โดยกำหนดขอบเขตของ n นั้นต้องมากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k และ 2. เปลี่ยนแปลง ระยะเลื้อนของ Flying height ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.20(e) โดยกำหนดขอบเขตคือ 0 ถึง 20 นาโนเมตร ซึ่งผลการ Fitting แสดงไว้ดังรูปที่ 6.20(f) ส่วนค่าดรชนี้ห้ก้เหล้ พ้และระยะเลื้อน Flying height ที่ทำให้การ Fitting ดีที่สุดแสดงไว้ดังตารางที่ 6.11 โดยที่รายละเอียดในการ Fitting อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2.2
5. ทดสอบวัด Flying height ด้วยดรชนี้ห้ก้เหล้พ้ที่ได้จากข้อที่ 4 โดยค่า Flying height ที่ได้จากการวัดนั้นต้องทำการบวกระยะ Flying height ที่เลื้อนไปก่อน จึงจะ สำมรทนำมาเปรียบเทียบก้กับค่า Flying height ที่ได้จากการวัดด้วยจากงานแก้วได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.20 ไดอะแกรมขั้นตอนการหาดัชนีหักเหที่สัมพันธ์กันซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวัด 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 ด้วยดัชนีหักเหที่ 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	2.3567	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 (ไม่โครนิว) ที่วัดได้บนจานแก้ว (ซ้าย) กับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าดัชนีหักเหตารางที่ 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 นั้นมีค่าน้อยมาก (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

บทที่ 7

การปรับปรุงความไวในการวัด Flying height ของดิสก์

ในปัจจุบัน Flying height ของหัวอ่าน/เขียนมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 10 นาโนเมตร [5, 6] และในอนาคตระยะ Flying height ของหัวอ่าน/เขียนมีแนวโน้มที่จะลดลง เพื่อที่จะเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลต่อ 1 แผ่นแม่เหล็ก ซึ่งในการวัด Flying height ด้วยวิธี Intensity interferometry ด้วยจานแก้วนั้นจะมี Sensitivity ในการวัด Flying height ที่ต่ำซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 6.10 ว่าความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงทั้ง 3 ความยาวคลื่นนั้นต่ำลงที่ Flying height ต่ำๆ (ตั้งแต่ 20 นาโนเมตรลงมา) ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนา Sensitivity ในการวัด Flying height ด้วยวิธี Intensity interferometry โดยการพัฒนาดิสก์ที่มี Sensitivity ในการวัด Flying height ดีกว่าจานแก้ว ซึ่งจากการทดสอบพบว่าจานแก้วที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มชนิดต่างๆจะมีคุณสมบัติทางแสงเปลี่ยนแปลงจากจานแก้วทั่วไป เช่นลักษณะของเส้นโค้งความเข้มแสงที่แสดงให้เห็นในบทที่ 6 แล้วว่าการเคลือบผิวจานแก้วด้วยซิลิกอน และ DLC นั้นส่งผลให้ลักษณะเส้นโค้งของความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไปจากจานแก้วซึ่งรวมถึง Sensitivity ในการวัด Flying height ด้วยโดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height คือการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่วัดได้เมื่อ Flying height เปลี่ยนแปลงไป 1 นาโนเมตรหรือก็คือความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height จะเห็นได้ว่าดิสก์ที่มีซิลิกอนและ DLC นั้นจะมี Sensitivity ในช่วง Flying height ต่ำๆ (Near contact flying height) ดีกว่าจานแก้ว

ในส่วนของการปรับปรุงความไวในการวัด Flying height ของดิสก์นั้นจะเริ่มจากการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ในบทที่ 7.1 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อที่จะเลือกความหนาของฟิล์มที่จะนำไปสร้างดิสก์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอไดสก์ 2 แบบที่จะใช้ในการปรับปรุงความไวคือ 1. ดิสก์ที่มี 3 ชั้น (3-Layers-disk) และ 2. ดิสก์ที่มี 5 ชั้น (5-Layers-disk) ซึ่งในส่วนของการคำนวณ, การเลือกความหนาที่จะใช้ในการสร้าง และการสร้างดิสก์ของดิสก์ทั้ง 2 แบบอธิบายไว้ในบทที่ 7.2 และ 7.3 ตามลำดับ จากนั้นจะทำการทดสอบ Sensitivity ของดิสก์ทั้ง 2 แบบเปรียบเทียบกับจานแก้วในบทที่ 7.4 และสรุปผลในบทที่ 7.5

7.1 การวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC

เนื่องจากการทดสอบนี้มีการเว้นช่วงระยะห่างจากการทดสอบการประยุกต์ใช้งานดิสก์ในเครื่องวัด Flying height tester (บทที่ 6) พอสมควรดังนั้นค่าดรรชนีหักเหของฟิล์ม

ซิลิกอนและ DLC อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นได้ รวมถึงในการคำนวณในส่วนของการ Optimize sensitivity นั้นค่าดรรรชนีหักเหจำเป็นต้องมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือจึงจะสามารถมั่นใจได้ว่าผลที่ได้จากการ Optimize นั้นถูกต้องและสามารถนำไปพิจารณาในการสร้างดิสก์ได้ จึงทำการวัดดรรรชนีหักเหของฟิล์มอีกครั้ง โดยในครั้งนี้จะใช้ขั้นตอนต่างๆดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.1.1 แต่จะทำการปลูกฟิล์มซิลิกอนและ DLC บนซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีชั้นของ SiO_2 ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.1 แทนซิลิกอนเวเฟอร์ เนื่องจากการปลูกฟิล์มบนซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีชั้นของ SiO_2 นั้นจะให้ผลลัพธ์ในการวัดที่ดีกว่า ประกอบกับการศึกษาเพิ่มเติมในส่วน of โมเดลที่ใช้การวิเคราะห์ดรรรชนีหักเหของฟิล์ม จึงทำให้สามารถเลือกโมเดลที่สามารถ (Tauc-Lorentz model) Fitting ข้อมูล Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดโดยที่มี MSE น้อยมากๆ (MSE น้อยกว่า 5) ซึ่งหมายถึงข้อมูลทั้ง 2 นั้นมีความใกล้เคียงกันมากดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.2 (b) และ รูปที่ 7.3(b) และส่งผลให้ค่าดรรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ครั้งนี้มีความน่าเชื่อถือและความถูกต้องมาก ซึ่งดรรรชนีหักเหที่จะใช้ในการ Optimize sensitivity แสดงไว้ดังตารางที่ 7.1 (โดยที่ดรรรชนีหักเหของจานแก้วและหัวอ่าน/เขียนได้จากทางข้อมูลของบริษัท)

DLC	Silicon
SiO_2: 500nm	SiO_2: 20nm
Silicon Wafer	Silicon Wafer

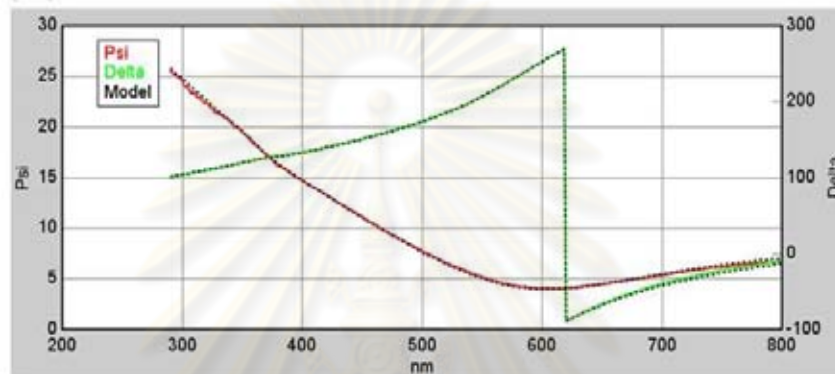
รูปที่ 7.1 ฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่ปลูกบนซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีชั้นของ SiO_2

DLC

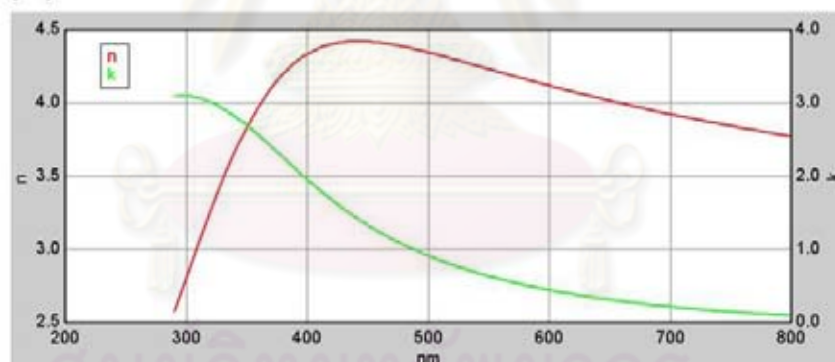
(a)

Layer # 2 = <u>Carbon on SiO₂ Thin MT</u> Thickness # 2 = <u>530.00 Å</u> Amp. = <u>18.238</u> (fit) Brod. = <u>7.448</u> (fit) E _o = <u>6.214</u> (fit) E _g = <u>0.735</u> (fit) E _{inf} = <u>2.652</u> (fit)
Layer # 1 = <u>SiO₂</u> Thickness # 1 = <u>5018.30 Å</u> (fit)
Substrate = <u>SI_JELL</u>

(b)



(c)



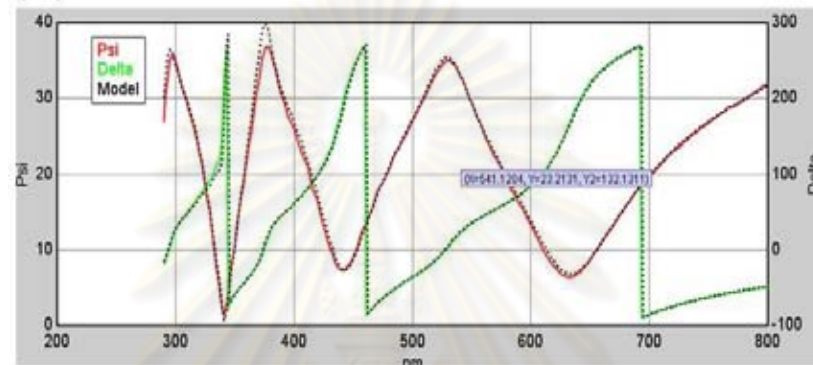
รูปที่ 7.2 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC การสร้างแบบจำลองของชั้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Tauc-Lorentz (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC ที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c)

Silicon

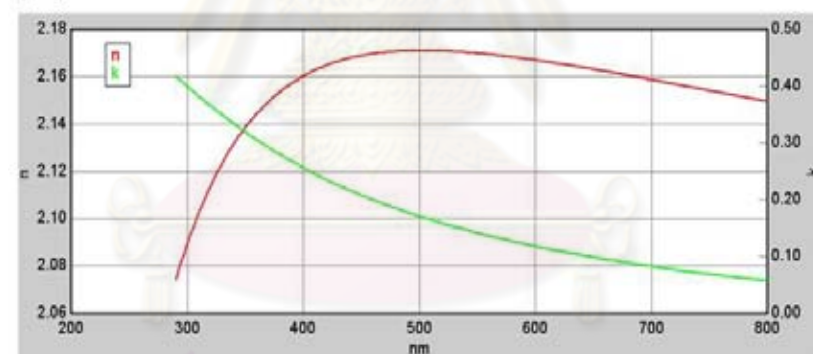
(a)

Layer # 2 = <u>a-Si Ion Beam SPT</u> Thickness # 2 = <u>264.28 Å</u> (fit) Amp. = <u>107.807</u> Brod. = <u>2.393</u> Eo = <u>3.606</u> Eg = <u>1.162</u> Einf = <u>1.160</u>
Layer # 1 = <u>SiO2_JAW</u> Oxide Thickness = <u>207.32 Å</u> (fit)
Substrate = <u>SI_JAW</u>

(b)



(c)



รูปที่ 7.3 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอน การสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่ใช้ในการวัดและเลือกโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (a), ผลการ Fitting ของ Psi และ Delta ที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณโดยใช้โมเดล Tauc-Lorentz (b), ดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนที่แปลงมาจากผลการ Fitting (c)

ตารางที่ 7.1 ดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณเพื่อการ Optimize sensitivity

Material	Wavelength 450nm	Wavelength 550nm	Wavelength 650nm
Silicon	4.419+1.328i	4.232+0.634i	4.014+0.309i
DLC	2.169+0.2087i	2.1699+0.1416i	2.1631+0.0985i
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

7.2 การปรับปรุงความไวในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้น

เนื่องจาก Sensitivity หรือความชันของเส้นโค้งที่เปลี่ยนไปจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ดรรชนีหักเหของจานแก้ว ดรรชนีหักเหของฟิล์มที่นำมาเคลือบและความหนาของฟิล์ม ดังนั้นถ้าสมารถที่จะเลือกความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมได้ก็จะสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้ โดยที่ Sensitivity ที่มีค่ามากหมายถึงสามารถวัดได้ละเอียดมากขึ้น โดยที่เงื่อนไขของการ Optimize คือเส้นโค้งของความเข้มแสงต้องไม่มีจุดเปลี่ยนโค้งในช่วง Flying height ที่สนใจ ซึ่งจะเห็นได้จากการเคลือบผิวจานแก้วด้วยซิลิกอนและ DLC ด้วยความหนาตามบทที่ 6 นั้นจะทำให้เส้นโค้งของความเข้มแสงเกิดจุดเปลี่ยนโค้งที่ Flying height ประมาณ 25 นาโนเมตรและเป็นผลให้ไม่สามารถวัด Flying height ที่บริเวณนี้ได้ ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขนี้ขึ้นมาในการ Optimize เพื่อที่จะทำให้ดิสก์ที่ได้หลังจากการ Optimize มีทั้ง Sensitivity ดีขึ้นและสามารถนำไปใช้ในกระบวนการวัด Flying height ได้อย่างเหมาะสมในทุกๆ Flying height

ในการเลือกความหนาของฟิล์มที่จะนำมาเคลือบบนจานแก้วเพื่อทำการ Optimize นั้น ต้องไม่เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการวัด Flying height คือต้องไม่ส่งผลต่อความชัดเจนของ Pole-tip และดิสก์หลังการ Optimize ควรจะมีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วด้วย ซึ่งจะเลือกฟิล์มซิลิกอนและ DLC เพื่อทำการ Optimize ความหนาซึ่งสามารถปลูกได้ที่บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล โดยที่ความหนาของซิลิกอนที่ใช้จะต้องไม่รบกวนต่อความชัดเจนของ Pole-tip อีกทั้ง DLC ยังเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากดังที่แสดงค่าความแข็งแรงไว้ดังตารางที่ 2.2 ดังนั้นดิสก์ที่ได้หลังจากการ Optimize นั้นจะมีทั้งความแข็งแรงที่มากขึ้น, Sensitivity ที่ดีขึ้นและสามารถ

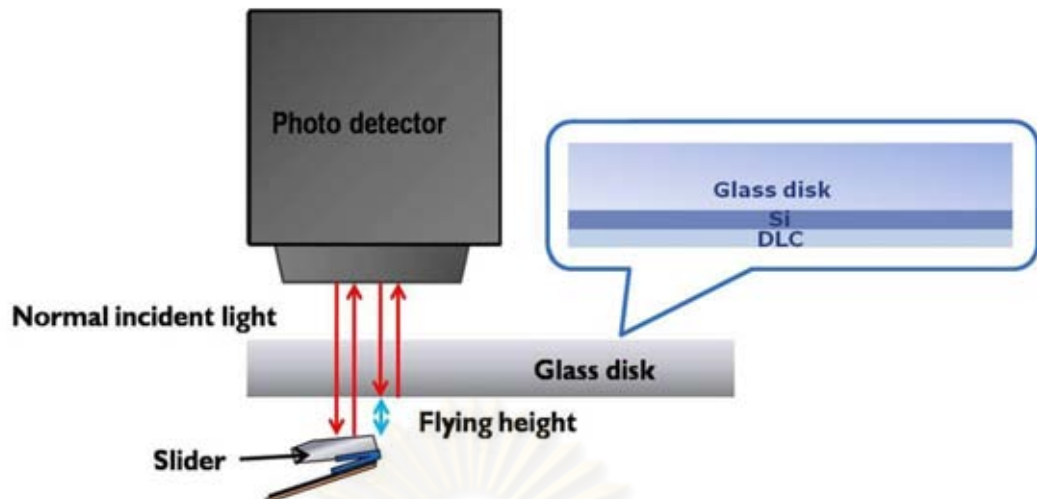
นำไปใช้ในกระบวนการวัด Flying height ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งดิสก์ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะมี 2 แบบคือ 1. ดิสก์ที่มี 3 ชั้น (3-Layers-disk) และ 2. ดิสก์ที่มี 5 ชั้น (5-Layers-disk)

ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุง Sensitivity โดยใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้น (ในส่วนของดิสก์ที่มี 5 ชั้นจะอธิบายไว้ในบทที่ 7.3) ลักษณะของดิสก์ที่จะนำมา Optimize sensitivity แสดงไว้ดังรูปที่ 7.4 ดิสก์จะมี 3 ชั้น (3-Layers-disk) ซึ่งประกอบด้วยชั้นของจานแก้ว, ซิลิกอน และ DLC ซึ่งดิสก์ที่มีลักษณะนี้จะมีโอกาสในการเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้ถ้าสามารถเลือกความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC ได้อย่างเหมาะสมและเนื่องจากชั้นฟิล์มที่สัมผัสกับหัวอ่าน/เขียนนั้นเป็น DLC ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของดิสก์นั้นเพิ่มขึ้นจากจานแก้วด้วย ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 4 และ 5 โดยปกติแล้วในการวัด Flying height ด้วยจานแก้วนั้นจะมีไดอะแกรมดังรูปที่ 7.5 โดยที่แสงจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนจากด้านล่างของจานแก้วและผิวหน้าของหัวอ่าน/เขียน (Slider) กลับไปที่ Detector แต่ในกรณีที่ใช้ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC ดังที่แสดงในรูปที่ 7.4 การสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่านี้ โดยสามารถเขียนแบบจำลองการวัด Flying height ที่ใช้ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC เพื่อใช้ในการคำนวณความเข้มแสงเพื่อ Optimize sensitivity ได้ดังรูปที่ 7.6

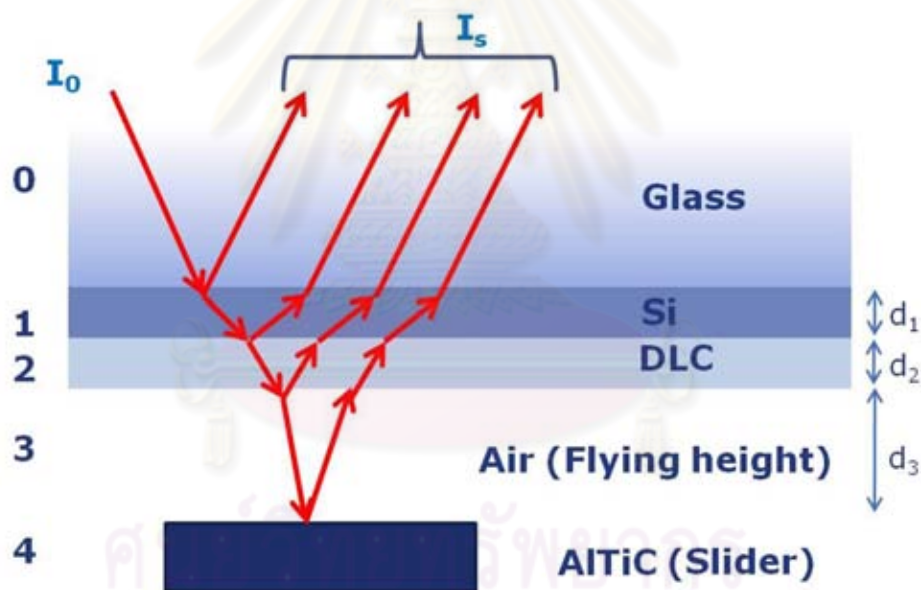


รูปที่ 7.4 ลักษณะของดิสก์ที่มี 3 ชั้นที่จะใช้ในการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.5 ไดอะแกรมการวัด Flying height ของเครื่อง flying height tester โดยใช้จานแก้วแบบปกติซึ่งในการคำนวณจะใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้นแทนจานแก้ว ซึ่งการสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่ามาก



รูปที่ 7.6 แบบจำลองของดิสก์ที่มี 3 ชั้นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height โดยที่ d_1 , d_2 , และ d_3 คือความหนาของ Si, DLC และ Flying height ตามลำดับ โดยวัสดุที่ใช้ทำ Slider คือ AlTiC

7.2.1 การคำนวณทางทฤษฎีของความเข้มแสงของแสงที่สะท้อนในการวัด Flying height ในกรณีใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้น

จากรูปที่ 7.5 แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดจะตกกระทบดิสก์เป็นลักษณะ Normal incident และเดินทางผ่านและสะท้อนจากชั้นตัวกลางต่างๆตามแบบจำลองในรูปที่ 7.6 ซึ่งสามารถใช้

Thin film theory [6] คำนวณความเข้มแสงทั้งหมดที่สะท้อนออกมาจากชั้นต่างๆของแบบจำลองในรูปที่ 7.6 ได้จากสมการที่ (7.1) โดยสามารถดูการพิสูจน์เพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

$$I_s = I_0 \left[\frac{r_{01} + r_{1234} e^{2i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{1234} e^{2i\beta_1}} \right]^2 \quad \text{---- (7.1)}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในลักษณะ

$$I_s = I_0 |R|^2 e^{i\varphi} = I_0 R^2 \quad \text{---- (7.2)}$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$r_{1234} = \left[\frac{r_{12} + r_{234} e^{2i\beta_2}}{1 + r_{12} r_{234} e^{2i\beta_2}} \right] \quad \text{---- (7.3)}$$

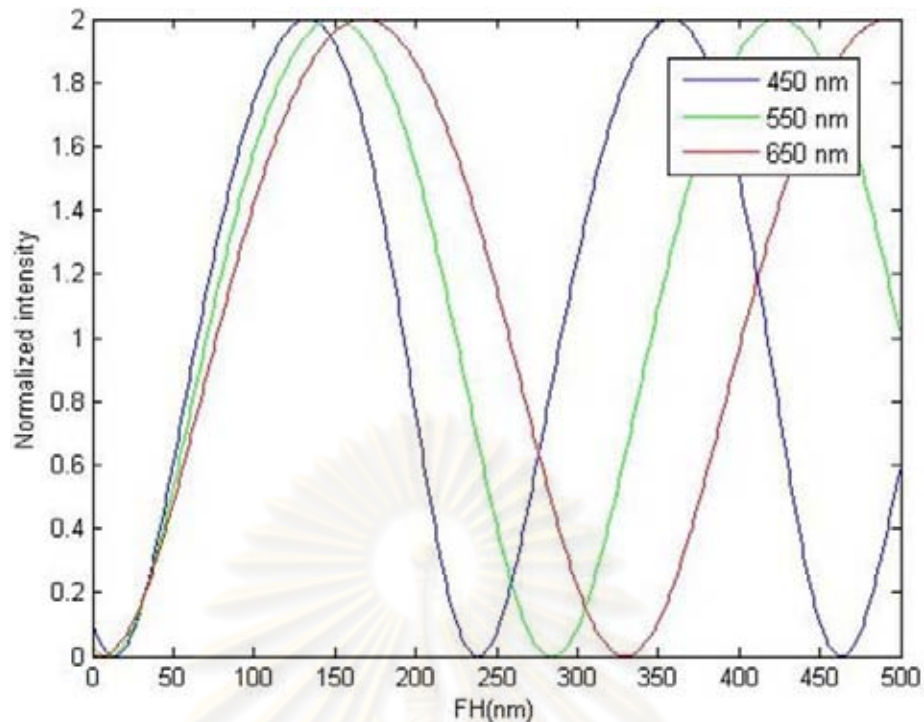
$$r_{234} = \left[\frac{r_{23} + r_{34} e^{2i\beta_3}}{1 + r_{23} r_{34} e^{2i\beta_3}} \right] \quad \text{---- (7.4)}$$

$$\beta_i = 2\pi \left(\frac{d_i}{\lambda} \right) n_i \quad \text{---- (7.5)}$$

$$r_{ij} = \frac{(n_i + ik_i) - (n_j + ik_j)}{(n_i + ik_i) + (n_j + ik_j)} \quad \text{---- (7.6)}$$

$$\frac{I_s}{I_0} = |R^2| \quad \text{---- (7.7)}$$

ซึ่งความหมายของตัวแปรต่างๆได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.1.2 แล้ว จากนั้นทำการ Normalize สมการที่ (7.7) ให้ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ก็จะสามารถสร้างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ของแต่ละความหนาของชั้นฟิล์มได้ โดยที่ตัวอย่างของผลการคำนวณของดิสก์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Si และ DLC 1 นาโนเมตรแสดงไว้ดังรูปที่ 7.7 โดยใช้ตรรกะนี้ห้กและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.2



รูปที่ 7.7 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ Flying height ที่ได้จากการคำนวณของดิสก์ที่มีความหนาของ Si และ DLC 1 นาโนเมตร

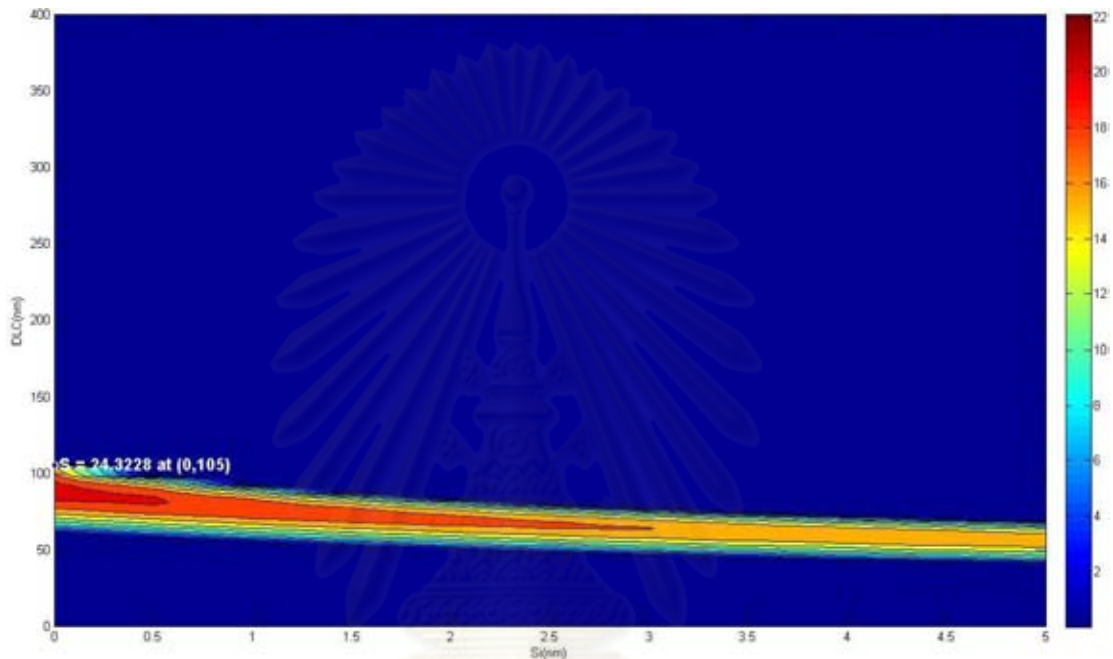
ตารางที่ 7.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการ Optimize sensitivity ของดิสก์ที่มี 3 ชั้น

Parameters	Boundary	Interval
ความหนา Si_1 (d_1)	0 ถึง 5 นาโนเมตร	0.5 นาโนเมตร
ความหนา DLC_1 (d_2)	0 ถึง 400 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร
Flying height (d_3)	0 ถึง 500 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร
Wavelength (Blue, Green, Red)	450, 550 และ 650 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร

7.2.2 การ Optimize sensitivity จากการคำนวณทางทฤษฎีของดิสก์ที่มี 3 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มซิลิกอนและ DLC

จากแบบจำลองและวิธีการคำนวณที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.6 และหัวข้อที่ 7.2.1 มาประยุกต์ใช้ในการเขียนโปรแกรมโดยใช้ Matlab เพื่อ Optimize sensitivity โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Si และ DLC โดยมีแบบจำลองการคำนวณดังรูปที่ 7.6 และตรงขั้นนี้หักเหตามตารางที่ 7.1 และพารามิเตอร์ที่จะใช้การคำนวณดังตารางที่ 7.2 ซึ่งความหนาของซิลิกอนจะถูกจำกัดอยู่ที่ 5 นาโนเมตรเนื่องจากผลจากการทดสอบการมองเห็น Pole-tip ในหัวข้อที่ 4.1 โดยที่นิยามของ Sensitivity ที่ใช้ในการวัดและการคำนวณคือผลรวมของ

Sensitivity ที่ Flying height 1, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาโนเมตรของทั้ง 3 ความยาวคลื่นซึ่งก็คือผลรวมของความชันของเส้นโค้งตาม Flying height ดังกล่าวของทั้ง 3 ความยาวคลื่น จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 7.2 เพื่อที่หาความหนาของชั้นฟิล์มที่สามารถให้ Sensitivity ในการวัด Flying height ที่มากที่สุด โดยที่สามารถรายละเอียดของโปรแกรมเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ข.2 และ ข.3



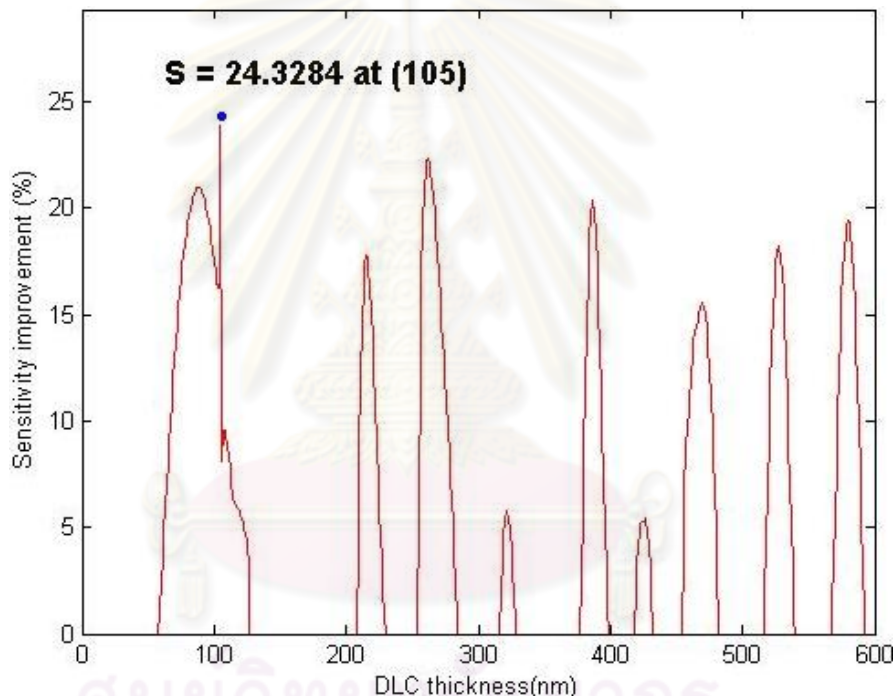
รูปที่ 7.8 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์มี 3 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้ว

ซึ่งจากผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 3 ชั้น โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.8 พบว่าความหนาของฟิล์ม Si และ DLC ที่ให้ค่า Sensitivity ในการวัด Flying height มากที่สุดคือ 0 และ 105 นาโนเมตร Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นจากงานแก้วถึง 24.32 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าการเพิ่มความหนาของซิลิกอนจะส่งผลให้ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นลดลง และผลการ Optimize sensitivity ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.8 ยังแสดงให้เห็นว่า ดิสก์ที่มีชั้นของ DLC เพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 7.9 ก็สามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้อีกด้วย จึงทำการ Optimize เพิ่มเติมในส่วนของดิสก์ที่มีเฉพาะชั้นของ DLC โดยใช้วิธีการคำนวณตามที่ได้อธิบายไปแล้วส่วนค่าตรรกษนี้หักเหแสดงไว้ในตารางที่ 7.1 โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ DLC จาก 0 ถึง 600 นาโนเมตรซึ่งผลของการคำนวณที่เทียบเป็น

เปอร์เซ็นต์จากงานแก้วแสดงไว้ดังรูปที่ 7.10 โดยแสดงผลเฉพาะค่า Sensitivity ที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 7.9 ลักษณะของดิสก์ที่จะใช้ในการปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height ที่ประกอบด้วยฟิล์ม DLC เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 7.10 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มีชั้นของ DLC เพียงอย่างเดียว โดยที่ค่า Sensitivity ที่มากที่สุดคือ 24.32% ที่ความหนา DLC 105 นาโนเมตร

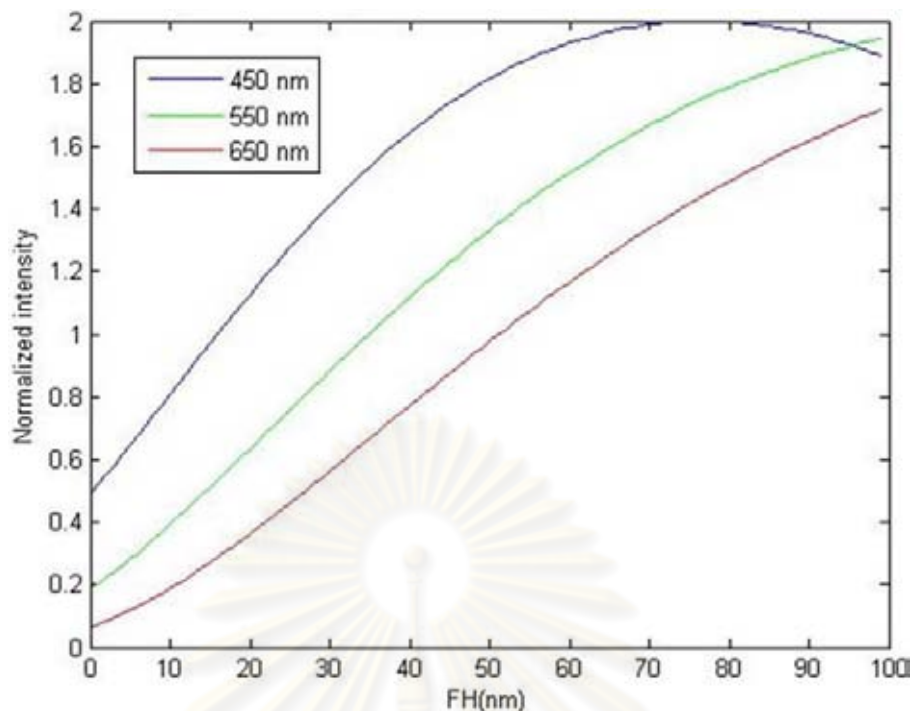
จากผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 3 ชั้นดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.8 และผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี DLC เพียงอย่างเดียวดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.10 จะถูกนำมาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการจะสามารถสร้างดิสก์ที่มีความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

7.2.3 การพิจารณาความหนาของฟิล์มที่จะทำการสร้างของดิสก์ที่มี DLC เพียงอย่างเดียวและดิสก์ที่มี 3 ชั้น

ในการพิจารณาความหนาที่จะใช้ในการสร้างดิสก์นั้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1.ดิสก์ที่มีเฉพาะชั้นของ DLC และ 2.ดิสก์ที่มี 3 ชั้นที่มีลักษณะของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ดังรูปที่ 7.4 โดยอ้างอิงความหนาจากผลการ Optimize ในหัวข้อที่ 7.2.2 ในการสร้างดิสก์นั้นอาจไม่สามารถใช้ช่วงความหนาของฟิล์มที่ให้ค่า Sensitivity ที่ดีที่สุดเพราะต้องพิจารณาความเป็นไปได้ในกระบวนการสร้างด้วยเนื่องจากการควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มให้ได้พอดีกับความหนาที่ต้องการนั้นควบคุมได้ยาก ดังนั้นในการเลือกความหนาที่จะทำการสร้างจากผลการ Optimize นั้นจะเลือกในช่วงที่เมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนของความหนาในการปลูกฟิล์มจากที่กำหนดไว้แล้วจะไม่ทำให้ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

การพิจารณาความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมของดิสก์ที่มีเฉพาะชั้น DLC

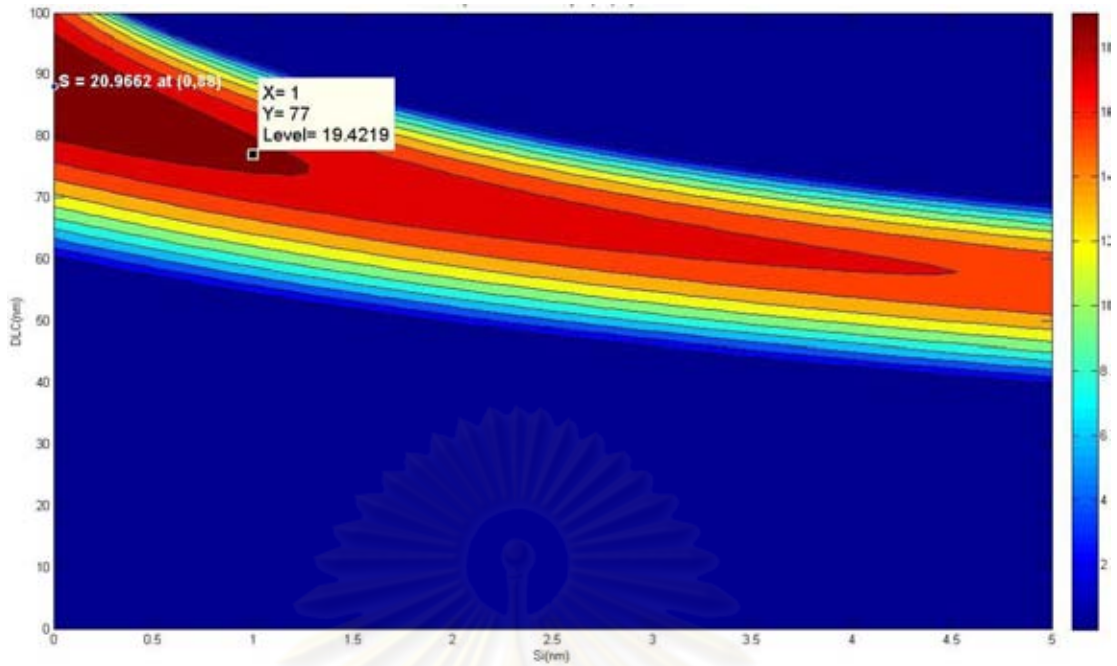
ในการสร้างดิสก์ที่มีเฉพาะ DLC นั้นจะใช้เครื่องมือ, กระบวนการและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการสร้างดิสก์ตามหัวข้อที่ 3.1 (แต่ไม่มีการปลูกฟิล์มซิลิกอน) ส่วนความหนาของ DLC นั้นจะพิจารณาจากผลของการ Optimize ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.10 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าความหนาของ DLC ที่ให้ Sensitivity ที่มากที่สุดคือ 105 นาโนเมตรโดยที่ Sensitivity เพิ่มขึ้นจากงานแก้ว 24.32% แต่เนื่องจากในกระบวนการสร้างนั้นต้องเข้าไปใช้เครื่องมือของทางบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) ซึ่งมีข้อจำกัดในการสร้างคือไม่สามารถที่จะปลูกฟิล์มให้หนาเกิน 100 นาโนเมตรได้เพราะจะทำให้เครื่องมือนั้นเกิด Contamination ขึ้นและจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตของทางบริษัท ดังนั้นในการสร้างดิสก์ที่มีเฉพาะ DLC จึงถูกจำกัดความหนาให้ไม่เกิน 100 นาโนเมตร จากรูปที่ 7.10 เมื่อพิจารณา Sensitivity ในช่วงความหนา DLC ไม่เกิน 100 นาโนเมตรจะพบว่าช่วงความหนา DLC 70 ถึง 100 นาโนเมตรสามารถเพิ่ม Sensitivity ได้ตั้งแต่ 15 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จึงเลือกที่จะสร้างดิสก์ที่มี DLC หนา 88 นาโนเมตรเพราะเป็นจุดยอดของกราฟซึ่งสามารถเพิ่ม Sensitivity ได้ 20.97% ซึ่งจะมีลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height โดยเลือกแสดงผลในช่วง Flying height 0 ถึง 100 นาโนเมตรดังรูปที่ 7.11 จากรูปจะเห็นได้ว่าไม่มีจุดเปลี่ยนโค้งในช่วง Flying height ที่สนใจซึ่งจะทำให้ดิสก์นี้สามารถวัด Flying height ได้อย่างเหมาะสม



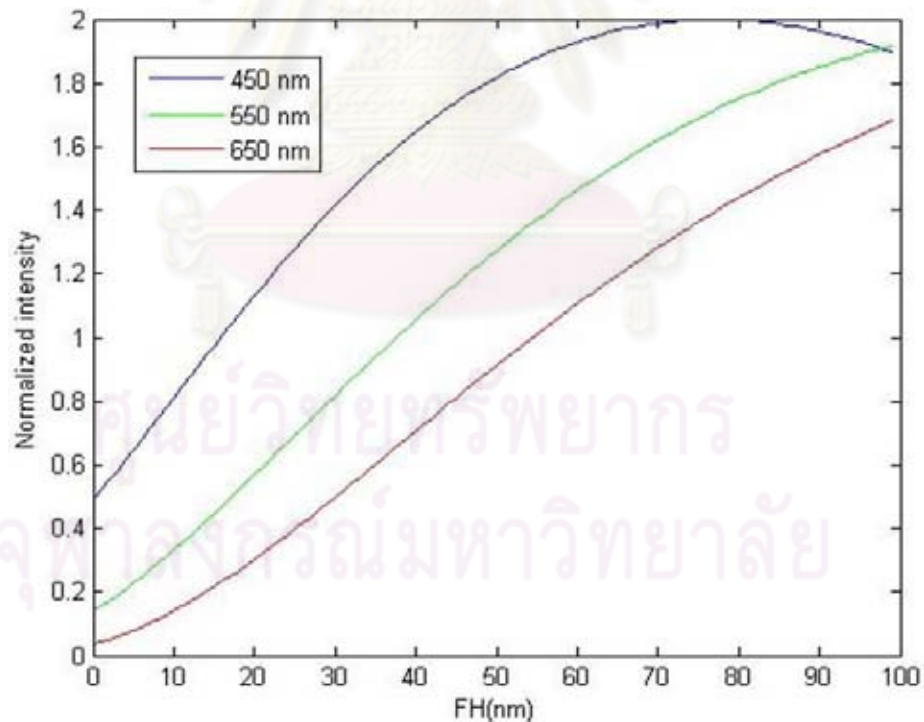
รูปที่ 7.11 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มี DLC 88 นาโนเมตร

การพิจารณาความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมของดิสก์ที่มี 3 ชั้น

จากข้อจำกัดในการสร้างดิสก์ที่ไม่สามารถปลูกฟิล์มที่มีความหนาเกิน 100 นาโนเมตร ได้จึงทำการ Optimize sensitivity ของดิสก์ที่มี 3 ชั้นอีกครั้ง โดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC ที่ 100 นาโนเมตรซึ่งผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.12 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มชั้นความหนาของฟิล์มซิลิกอนจะทำให้ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นลดลงดังนั้นจึงเลือกสร้างดิสก์ที่มีชั้นความหนาของซิลิกอนน้อยๆนั่นคือเลือกที่ความหนาของซิลิกอน 1 นาโนเมตรซึ่งยังเป็นการเพิ่มการยึดติดกัน (Adhesion) ระหว่างฟิล์ม DLC และจานแก้ว ส่วนความหนา DLC เลือกใช้ที่ DLC 77 นาโนเมตรซึ่งเป็นความหนาของ DLC ที่ให้ค่า Sensitivity ในการวัดที่ดีที่สุดกรณีที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรโดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้ 19.42 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับจานแก้ว ซึ่งจากผลการ Optimize sensitivity ดังที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.12 จะเห็นว่าการเลือกสร้างดิสก์ที่ตำแหน่งซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตรนั้นมีช่วงความหนาที่ยอมให้เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร กล่าวคือ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นจะไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญกรณีที่เกิดความคลาดเคลื่อนของความหนาในการสร้างดิสก์ โดยที่ลักษณะเส้นโค้งของความเข้มแสงของดิสก์นี้แสดงไว้ดังรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.12 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์มี 3 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้ว โดยกำหนดขอบเขตของ DLC ที่ 100 นาโนเมตร



รูปที่ 7.13 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร

สรุปผลการพิจารณาความหนา

จากการพิจารณาความหนาของฟิล์มที่จะทำการสร้างของทั้ง 2 ดิสก์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไม่สามารถสร้างฟิล์มที่มีความหนาเกิน 100 นาโนเมตรได้ เนื่องจากข้อจำกัดของทางบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย)
2. สำหรับดิสก์ที่มี DLC เพียงอย่างเดียว เลือกสร้างดิสก์ที่มีความหนา DLC 88 นาโนเมตร โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้ 20.97 เปอร์เซ็นต์
3. สำหรับดิสก์ที่มี 3 ชั้น เลือกสร้างดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้ 19.42 เปอร์เซ็นต์

7.2.4 การสร้างดิสก์ที่มี DLC 88 นาโนเมตร

ขั้นตอนในการสร้าง

ใช้กระบวนการสร้างดิสก์ตามหัวข้อที่ 3.1 และพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 3.1 แต่ไม่มีการปลูกฟิล์มซิลิกอน

ปัญหาที่เกิดขึ้น

เมื่อทำการสร้างดิสก์ที่มีความหนา DLC 88 นาโนเมตรเสร็จแล้วพบว่าชั้นฟิล์มของ DLC ค่อยๆหลุดลอกออกจากผิวของจานแก้วดังรูปที่ 7.14 ซึ่งทำการเซ็ทบริเวณ DLC ที่ลอกออกไปแล้ว ส่วนที่มีฟิล์ม DLC ติดอยู่จะมีสีเข้มกว่าส่วนบริเวณที่เกิดการลอกของฟิล์มนั้นเมื่อทำการทำเซ็ท DLC ที่ลอกออกจะมีความใสเหมือนจานแก้วปกติ โดยที่เมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งฟิล์ม DLC ทั้งหมดจะหลุดลอกออกจากจานแก้ว ทำให้ไม่สามารถนำดิสก์นี้ไปทดสอบวัด Sensitivity โดยใช้เครื่องวัด Flying height ได้ ซึ่งคาดว่าปัญหาที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดจากการยึดเกาะกันระหว่างชั้นฟิล์มของ DLC และผิวของจานแก้วนั้นไม่ดีนักและเนื่องจากความหนาของ DLC ที่ใช้นั้นค่อนข้างหนาทำให้ผลของ Stress ที่เหลืออยู่หลังจากการปลูกฟิล์มนั้นมีมากทำให้ฟิล์ม DLC นั้นหลุดลอกออกจากผิวของจานแก้ว



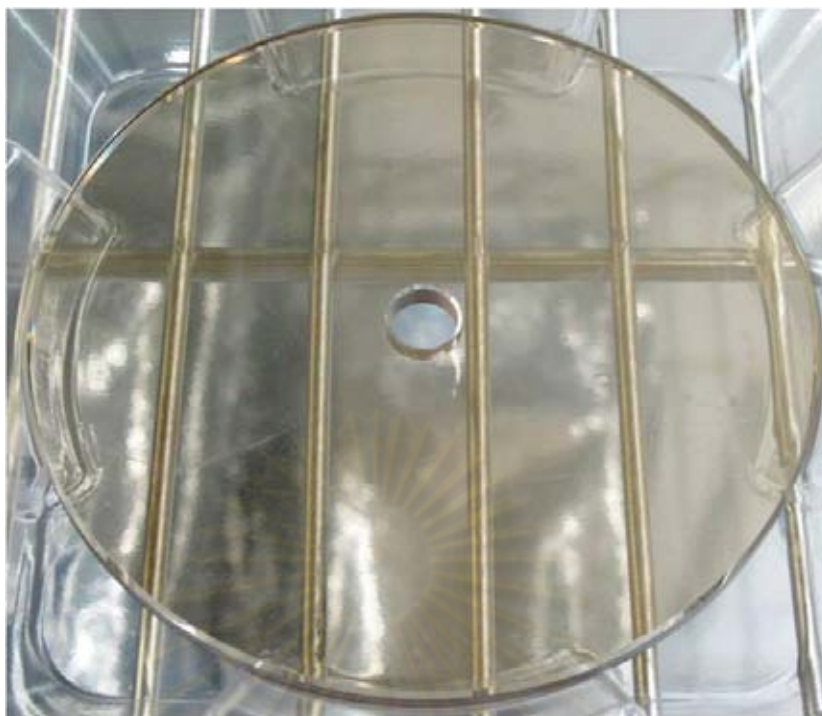
รูปที่ 7.14 ดิสก์ที่มีความหนา DLC 88 นาโนเมตรซึ่งเกิดการหลุดลอกของฟิล์ม DLC ซึ่งบริเวณที่เกิดการหลุดลอกของ DLC เมื่อเซ็ดฟิล์ม DLC ออกจะลักษณะใสเหมือนจานแก้ว

สรุปผลจากการสร้างดิสก์

ไม่สามารถสร้างดิสก์ที่มี DLC เพียงอย่างเดียวที่มีความหนา 88 นาโนเมตรได้ เนื่องจากเกิดปัญหาด้านการยึดติดกันระหว่างฟิล์ม DLC และจานแก้วทำให้ฟิล์ม DLC หลุดลอกออกจากจานแก้วและ ไม่สามารถนำไปทดสอบวัด Sensitivity โดยใช้เครื่องวัด Flying height ได้ ดังนั้นในการสร้างดิสก์นั้นจำเป็นต้องมีชั้นของซิลิกอนเป็นตัวช่วยในการยึดติดกัน (Adhesion layer) ระหว่างฟิล์ม DLC และจานแก้ว

7.2.5 การสร้างดิสก์ที่มี 3 ชั้นโดยมีความหนาของซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร

ใช้กระบวนการสร้างดิสก์ตามหัวข้อที่ 3.1 และพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 3.1 ดิสก์ที่สร้างเสร็จแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 7.15 ซึ่งมี 3 ชั้นซึ่งประกอบด้วยชั้นของจานแก้ว, ซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC หนา 77 นาโนเมตร โดยที่สีของดิสก์จะเข้มกว่าจานแก้วเล็กน้อยและไม่พบการหลุดลอกของฟิล์ม DLC จากนั้นจะนำดิสก์นี้ไปทดสอบวัด Sensitivity ในการวัด Flying height โดยใช้เครื่อง Flying height tester ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.4



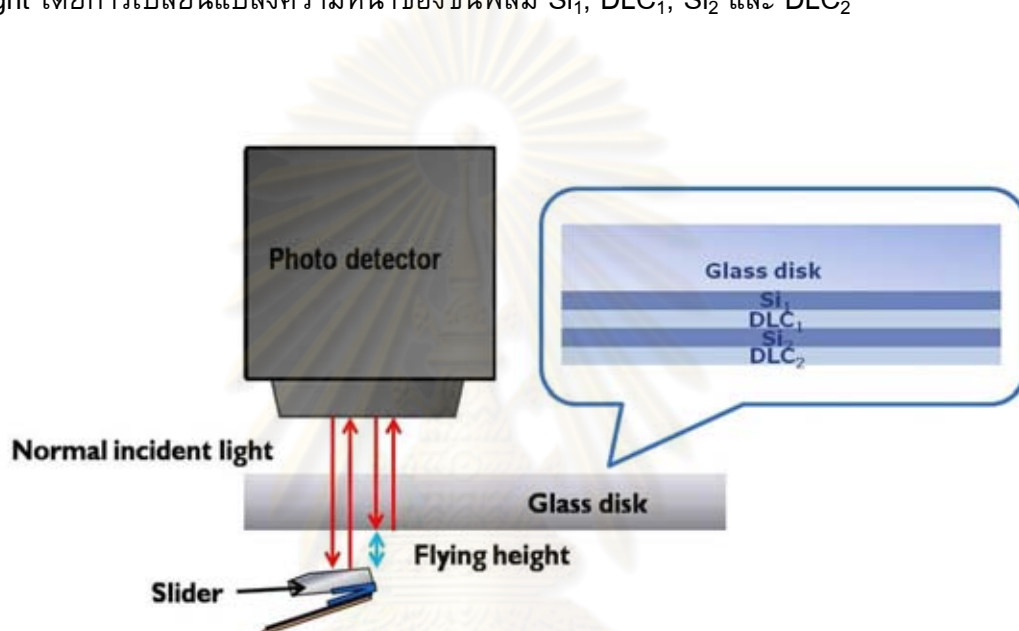
รูปที่ 7.15 ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร

7.3 การปรับปรุงความไวในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้น

ลักษณะของดิสก์ที่จะนำมา Optimize sensitivity แสดงไว้ดังรูปที่ 7.16 ดิสก์จะมี 5 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นของจานแก้ว, ซิลิกอนชั้นแรก (Si_1), DLC ชั้นแรก (DLC_1), ซิลิกอนและ DLC ชั้นที่สอง (Si_2 และ DLC_2) ซึ่งดิสก์ที่มีลักษณะนี้จะทำให้โอกาสในการเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC นั้นสูงชันกว่าดิสก์ที่มี 3 ชั้น ไดอะแกรมการนำดิสก์ที่มี 5 ชั้นไปใช้งานในเครื่องวัด Flying height แสดงไว้ดังรูปที่ 7.17 โดยที่แสงจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนจากด้านล่างของจานแก้วและผิวหน้าของหัวอ่าน/เขียน (Slider) กลับไปที่ Detector แต่ในกรณีที่ใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้น การสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่ามาก โดยที่สามารถเขียนแบบจำลองการวัด Flying height ที่ใช้ดิสก์ที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC เพื่อใช้ในการคำนวณความเข้มแสงเพื่อ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height ได้ดังรูปที่ 7.18

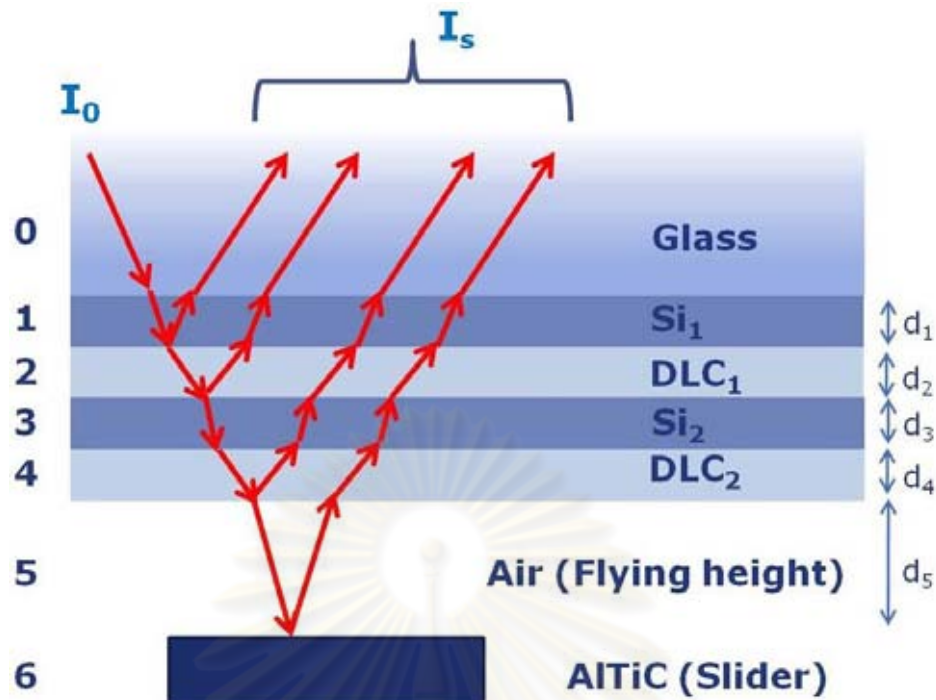


รูปที่ 7.16 ลักษณะของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่จะใช้ในการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์ม Si_1 , DLC_1 , Si_2 และ DLC_2



รูปที่ 7.17 ไดอะแกรมการวัด Flying height ของเครื่อง flying height tester โดยใช้จานแก้วแบบปกติซึ่งในการคำนวณจะใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้นแทนจานแก้วซึ่งการสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่ามาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.18 แบบจำลองของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height โดยที่ d_1, d_2, d_3, d_4 และ d_5 คือความหนาของ Si_1, DLC_1, Si_2, DLC_2 และ Flying height ตามลำดับโดยวัสดุที่ใช้ทำ Slider คือ AITiC

7.3.1 การคำนวณทางทฤษฎีของความเข้มแสงของแสงที่สะท้อนในการวัด Flying height ในกรณีใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้น

จากรูปที่ 7.17 แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดจะตกกระทบบดิสก์เป็นลักษณะ Normal incident และเดินทางผ่านและสะท้อนจากชั้นตัวกลางต่างๆตามแบบจำลองในรูปที่ 7.18 ซึ่งสามารถใช้ Thin film theory [6] คำนวณความเข้มแสงทั้งหมดที่สะท้อนออกมาจากชั้นต่างๆของแบบจำลองในรูปที่ 7.18 ได้จากสมการที่ (7.1) โดยสามารถดูการพิสูจน์เพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

$$I_s = I_0 \left[\frac{r_{01} + r_{12345} e^{2i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12345} e^{2i\beta_1}} \right]^2 \quad \text{---- (7.1)}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในลักษณะ

$$I_s = I_0 |R|^2 e^{i\varphi} = I_0 R^2 \quad \text{---- (7.2)}$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$r_{123456} = \left[\frac{r_{12} + r_{23456} e^{2i\beta_2}}{1 + r_{12} r_{23456} e^{2i\beta_2}} \right] \quad \text{---- (7.3)}$$

$$r_{23456} = \left[\frac{r_{23} + r_{3456} e^{2i\beta_3}}{1 + r_{23} r_{3456} e^{2i\beta_3}} \right] \quad \text{---- (7.4)}$$

$$r_{3456} = \left[\frac{r_{34} + r_{345} e^{2i\beta_4}}{1 + r_{34} r_{345} e^{2i\beta_4}} \right] \quad \text{---- (7.5)}$$

$$r_{456} = \left[\frac{r_{45} + r_{56} e^{2i\beta_5}}{1 + r_{45} r_{56} e^{2i\beta_5}} \right] \quad \text{---- (7.6)}$$

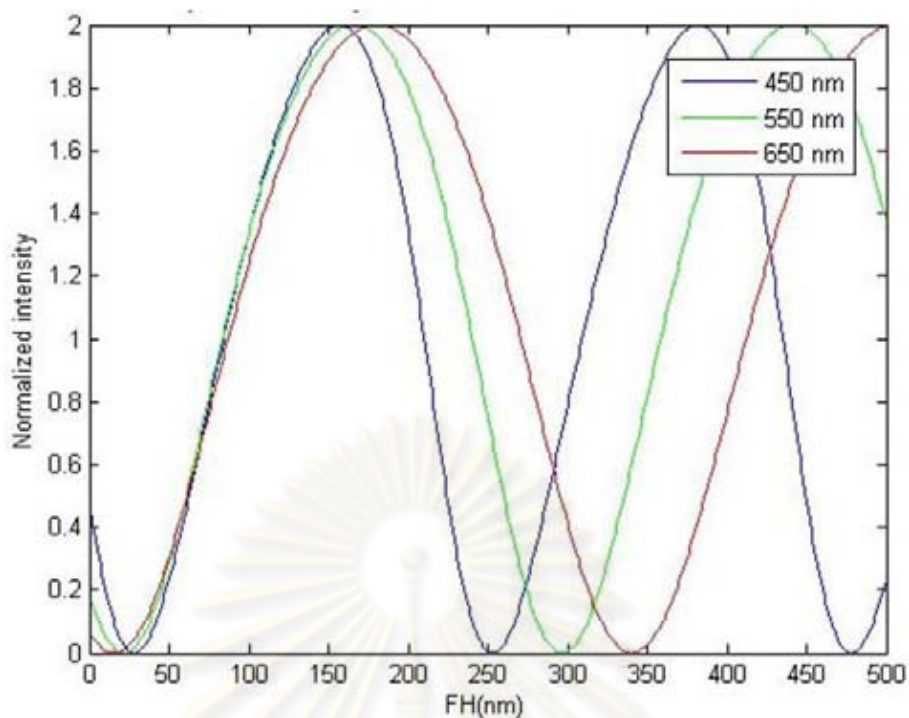
$$\beta_i = 2\pi \left(\frac{d_i}{\lambda} \right) n_i \quad \text{---- (7.7)}$$

$$r_{ij} = \frac{(n_i + ik_i) - (n_j + ik_j)}{(n_i + ik_i) + (n_j + ik_j)} \quad \text{---- (7.8)}$$

$$\frac{I_s}{I_0} = |R^2| \quad \text{---- (7.9)}$$

ซึ่งความหมายของตัวแปรต่างๆได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.1.2 แล้ว จากนั้นทำการ Normalize สมการที่ (7.9) ให้ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ก็จะสามารถสร้างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ของแต่ละความหนาของชั้นฟิล์มได้ โดยใช้ตรรกะนี้หาค่า และพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 7.1 และตารางที่ 7.3 ตัวอย่างของผลการคำนวณของดิสก์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Si₁, DLC₁, Si₂ และ DLC₂ 1 นาโนเมตรแสดงไว้ดังรูปที่ 7.19

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.19 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่มีความหนาของ Si_1 , DLC_1 , Si_2 และ DLC_2 1 นาโนเมตร

ตารางที่ 7.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการ Optimize sensitivity ของดิสก์ที่มี 5 ชั้น

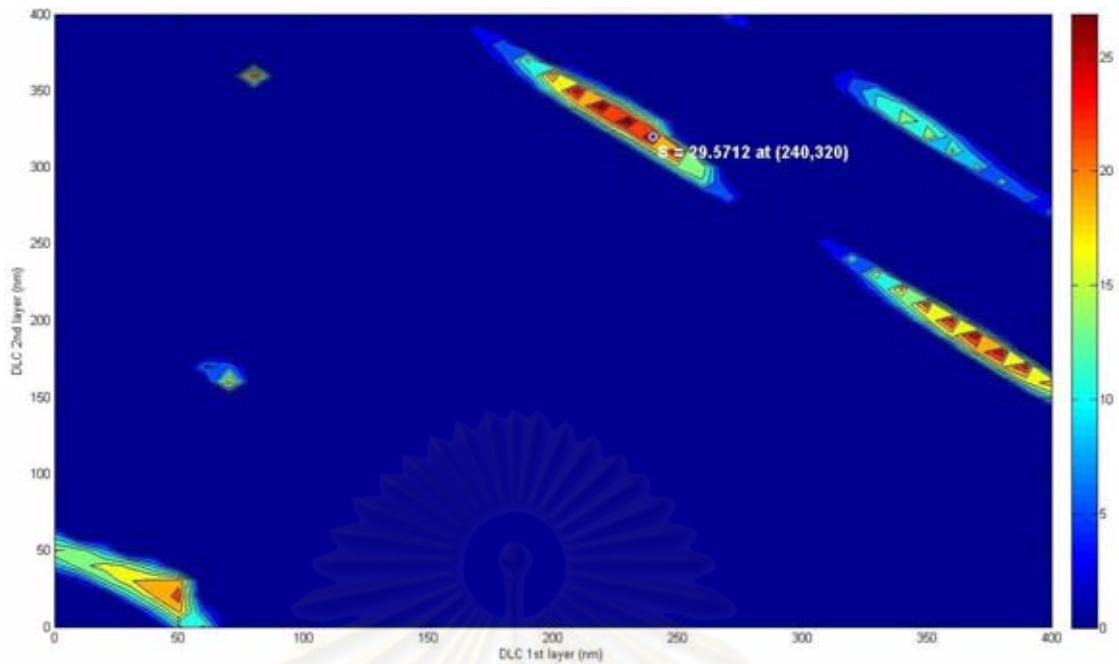
Parameters	Boundary	Interval
ความหนา Si_1 (d_1)	0 ถึง 5 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร
ความหนา DLC_1 (d_2)	0 ถึง 400 นาโนเมตร	10 นาโนเมตร
ความหนา Si_2 (d_3)	0 ถึง 5 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร
ความหนา DLC_2 (d_4)	0 ถึง 400 นาโนเมตร	10 นาโนเมตร
Flying height (d_5)	0 ถึง 500 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร
Wavelength (Blue, Green, Red)	450, 550 และ 650 นาโนเมตร	1 นาโนเมตร

7.3.2 การ Optimize sensitivity จากการคำนวณทางทฤษฎีของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม Si_1 , DLC_1 , Si_2 และ DLC_2

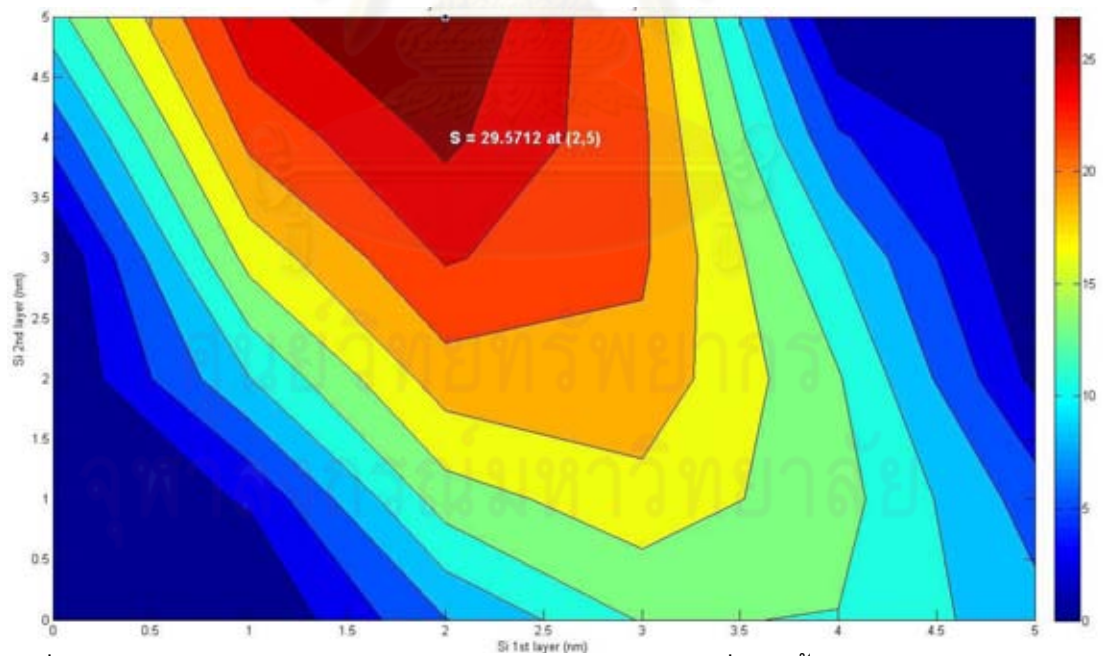
จากแบบจำลองที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.18 และวิธีการคำนวณที่กล่าวในหัวข้อที่ 7.3.1 มาประยุกต์ใช้ในการเขียนโปรแกรมโดยใช้ Matlab เพื่อ Optimize sensitivity โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม Si_1 , DLC_1 , Si_2 และ DLC_2 โดยใช้ตรรกะนี้หักเหตามตารางที่ 7.1 และพารามิเตอร์ที่จะใช้การคำนวณดังตารางที่ 7.3 (ถึงแม้ว่าจะมีข้อจำกัดในการใช้ความหนาของฟิล์มที่ 100 นาโนเมตรแต่ในส่วนของการคำนวณ Sensitivity นั้นจะแสดงถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height โดยการใชดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่มีพารามิเตอร์ในการคำนวณดังตารางที่ 7.3) โดยที่รายละเอียดต่างๆ เช่น นิยามของ Sensitivity ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.2.2 แล้ว

เนื่องจากการคำนวณของดิสก์ที่มี 5 ชั้นจะมีข้อจำกัดด้านหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ดังนั้นในการคำนวณด้วยโปรแกรมนั้นจะคำนวณโดยใช้ Interval ที่หยาบก่อน (ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 7.3) จากนั้นจึงจะมาทำการคำนวณโดยใช้ interval ที่ละเอียดขึ้นในช่วงความหนาฟิล์มที่สนใจและเนื่องจากผลการคำนวณค่า Sensitivity จะเปลี่ยนแปลงตามความหนาของฟิล์มทั้ง 4 ชั้น (Si_1 , DLC_1 , Si_2 และ DLC_2) ดังนั้นในการแสดงผลจะกำหนดให้ความหนาของชั้นฟิล์ม 2 ชั้นคงที่และจะแสดงค่า Sensitivity ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของ 2 ชั้นฟิล์มที่เหลือ เช่นการแสดงผลของ Sensitivity ในการวัด Flying height โดยกำหนดของความหนาของ Si_1 และ Si_2 คงที่ที่ความหนาหนึ่งแล้วแสดง Sensitivity ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของ DLC_1 และ DLC_2

โดยที่ผลของการคำนวณที่ให้ Sensitivity ในการวัด Flying height มากที่สุดแสดงไว้ดังรูปที่ 7.20 และรูปที่ 7.21 ซึ่งจะแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ Sensitivity ในการวัด Flying height เฉพาะที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยรูปที่ 7.20 แสดงผลโดยการกำหนดให้ความหนาของ Si_1 และ Si_2 คงที่ที่ 2 นาโนเมตรและ 5 นาโนเมตรส่วนรูปที่ 7.21 แสดงผลโดยการกำหนดให้ความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 คงที่ที่ 240 นาโนเมตรและ 320นาโนเมตร โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้ 29.57 เปอร์เซ็นต์ โดยที่สามารถดูรายละเอียดของโปรแกรมได้ที่ภาคผนวก ข.2 และ ข.3

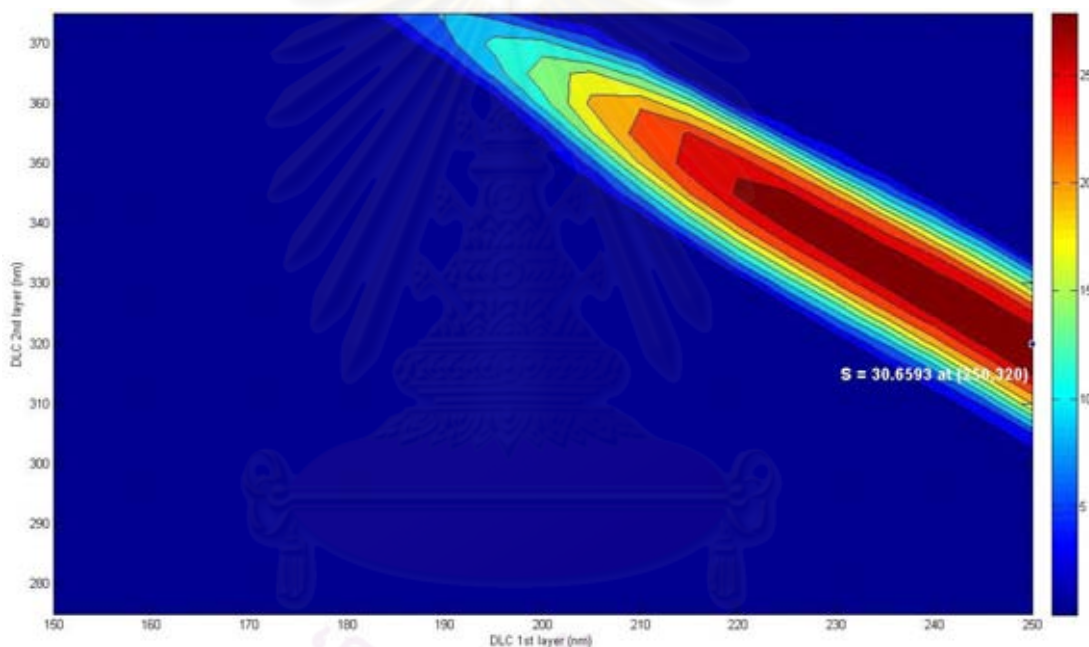


รูปที่ 7.20 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้ Interval หยาบ แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 2 และ 5 นาโนเมตร

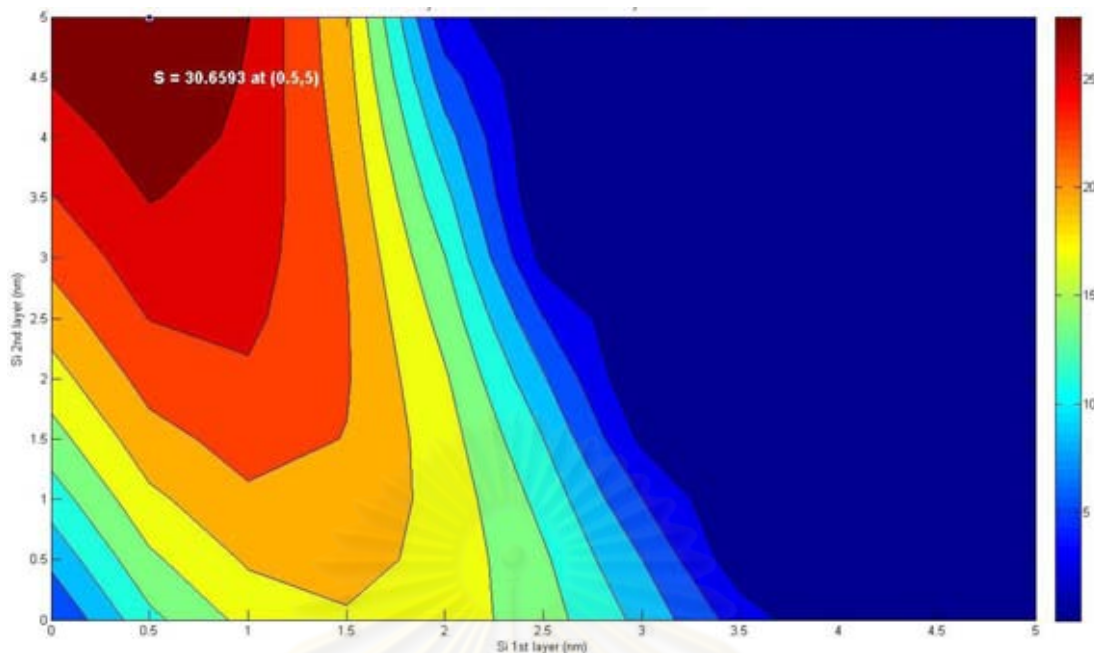


รูปที่ 7.21 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้ Interval หยาบ แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 240 และ 320 นาโนเมตร

ซึ่งจากผลการ Optimize โดยการใช Interval ที่หายาที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.20 พบว่าความหนาของฟิล์ม DLC₁ และ DLC₂ ที่ให้ค่า Sensitivity ในการวัด Flying height มากที่สุดคือ 240 และ 320 นาโนเมตร ดังนั้นจึงคำนวณเพิ่มเติมในช่วงความหนาของ DLC₁ ตั้งแต่ 150 ถึง 250 นาโนเมตรและ DLC₂ ตั้งแต่ 280 ถึง 380 นาโนเมตรโดยใช้ Interval ที่ละเอียดขึ้น (Interval ของซิลิกอนคือ 0.5 นาโนเมตรและ Interval ของ DLC คือ 5 นาโนเมตร) ซึ่งผลของการคำนวณแสดงไว้ดังรูปที่ 7.22 และรูปที่ 7.23 ซึ่งจากผลการคำนวณที่แสดงไว้ดังรูปที่ 7.22 และรูปที่ 7.23 พบว่าดิสก์ที่เคลือบด้วยฟิล์ม Si และ DLC ตามลักษณะดังรูปที่ 7.16 สามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ขึ้นได้จากงานแก้วมากถึง 30.69 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ชั้นฟิล์ม Si₁ หนา 0.5, DLC₁ หนา 250, Si₂ หนา 5 และ DLC₂ หนา 320 นาโนเมตร



รูปที่ 7.22 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ DLC₁ 275 ถึง 375 และ DLC₂ 150 ถึง 250 นาโนเมตรโดยใช้ Interval ละเอียดแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ Si₁ และ Si₂ เท่ากับ 0.5 และ 5 นาโนเมตร

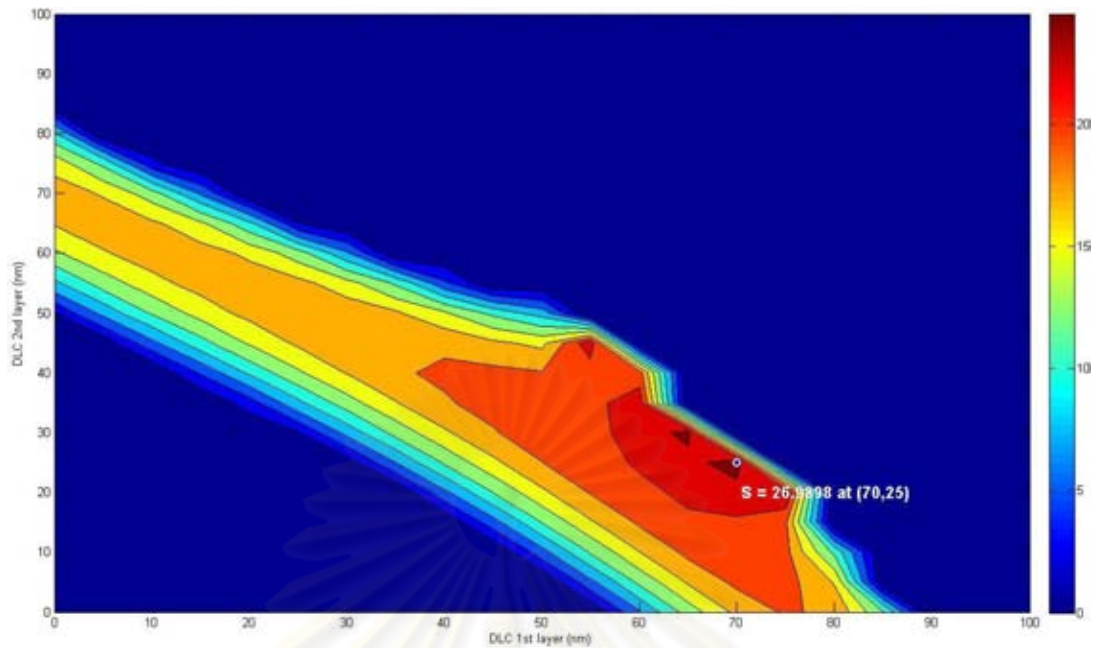


รูปที่ 7.23 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ Si_1 และ Si_2 0 ถึง 5 นาโนเมตรโดยใช้ Interval ละเอียดแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 250 และ 320 นาโนเมตร

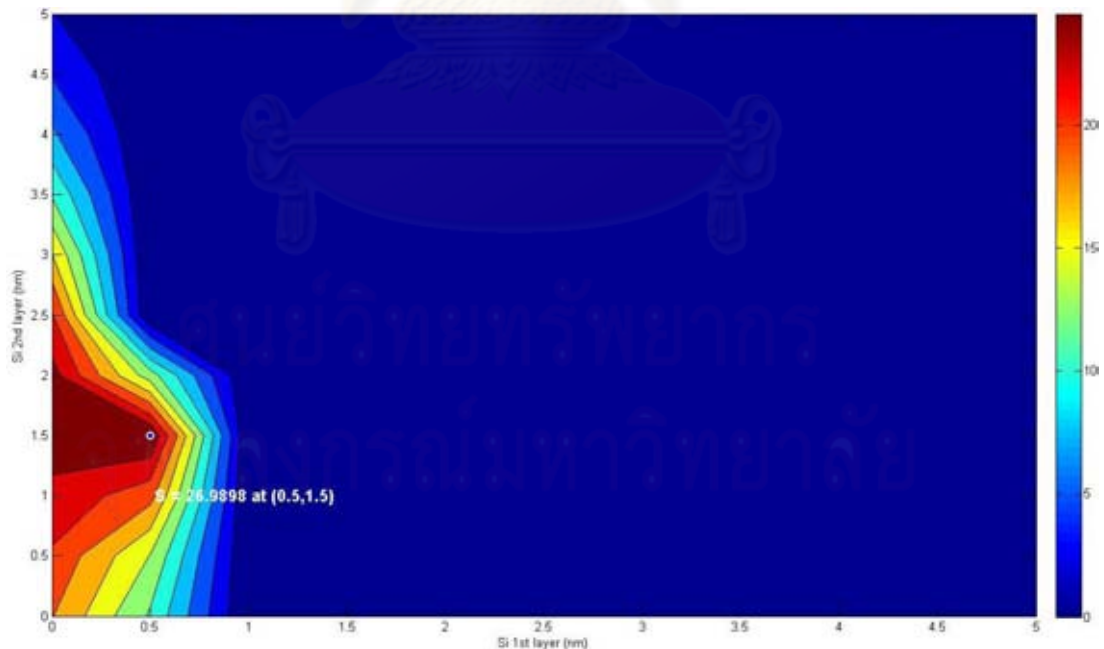
ซึ่งในส่วนนี้ต้องการแสดงให้เห็นว่าในเชิงการคำนวณนั้นดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้พารามิเตอร์ดังตารางที่ 7.3 สามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้มากถึง 30.69 เปอร์เซ็นต์ แต่การสร้างดิสก์จริงนั้นไม่สามารถปลูกฟิล์มที่หนาเกิน 100 นาโนเมตรได้ โดยที่ผลจากการ Optimize sensitivity ที่พิจารณาถึงข้อจำกัดในการสร้างจะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 7.3.3

7.3.3 การพิจารณาความหนาของฟิล์มที่จะทำการสร้างของดิสก์ที่มี 5 ชั้น

จากข้อจำกัดในการสร้างดิสก์ที่พบในหัวข้อที่ 7.2.3 และ 7.2.4 คือไม่สามารถสร้างฟิล์มที่หนาเกิน 100 นาโนเมตรได้ และในการสร้างฟิล์ม DLC จำเป็นต้องมีชั้นของซิลิกอนเพื่อช่วยในการยึดติด ดังนั้นในการเลือกความหนาของชั้นฟิล์มที่จะนำมาสร้างจึงต้องพิจารณาถึงข้อจำกัดนี้ด้วย ซึ่งผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 เป็น 100 นาโนเมตรที่ให้ Sensitivity ในการวัด Flying height มากที่สุดโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Si_1 , DLC_1 , Si_2 , DLC_2 แสดงไว้ดังรูปที่ 7.24 และรูปที่ 7.25 โดยใช้ความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆคือ Si_1 หนา 0.5, DLC_1 หนา 70, Si_2 หนา 1.5 และ DLC_2 หนา 25 นาโนเมตรซึ่ง Sensitivity ในการวัด Flying height เพิ่มขึ้นมากถึง 26.98 เปอร์เซ็นต์

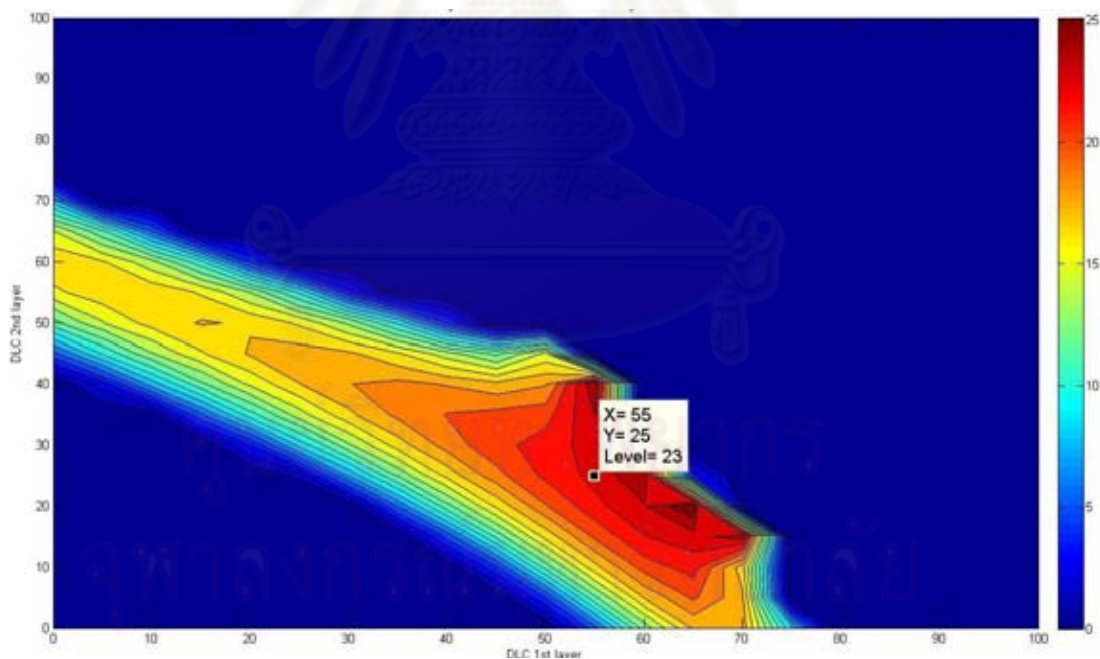


รูปที่ 7.24 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC_1 และ DLC_2 ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนา Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 0.5 และ 1.5 นาโนเมตร



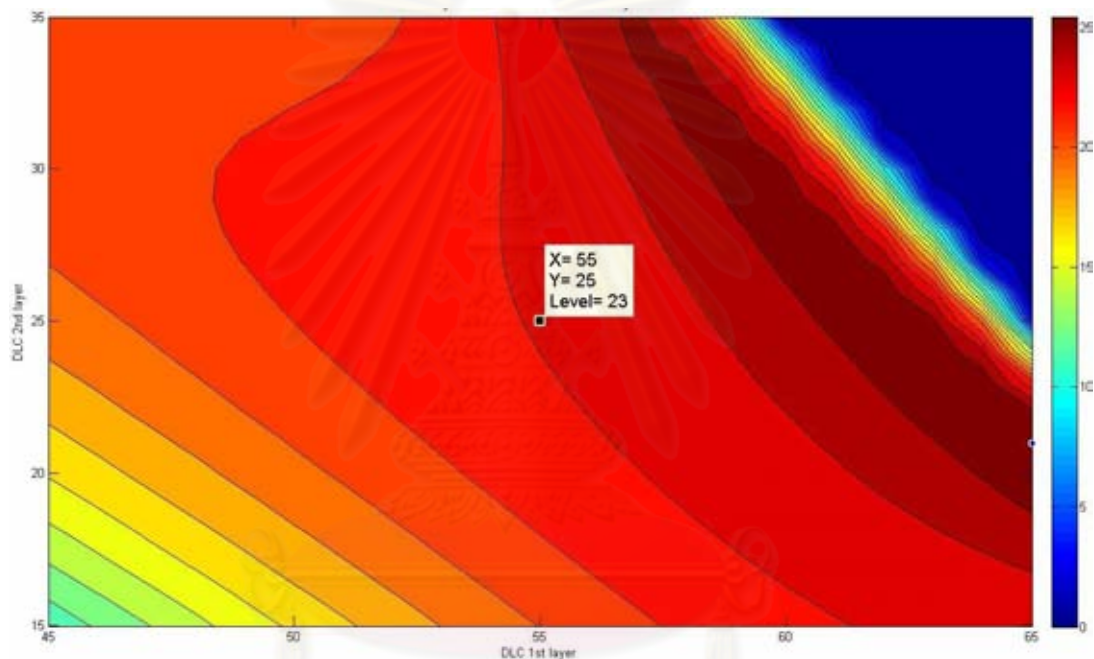
รูปที่ 7.25 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดความหนา DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 70 และ 25 นาโนเมตร

ซึ่งจากรูปที่ 7.24 และรูปที่ 7.25 จะเห็นว่า การที่จะสร้างดิสก์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มตามตำแหน่งที่ให้ Sensitivity ในการวัด Flying height มากที่สุดนั้นค่อนข้างยากเนื่องจากมีช่วงความหนาที่ยอมให้ผิดพลาดได้น้อยเช่นจากรูปที่ 7.25 ในกรณีที่ชั้นความหนาของฟิล์ม Si_1 นั้นหากฟิล์มที่ปลูกมีความหนามากกว่า 0.5 นาโนเมตรเพียงเล็กน้อยแล้วจะทำให้ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญดังนั้นจึงเลือกที่จะสร้างดิสก์ในช่วงความหนาที่สามารถยอมให้มีความคลาดเคลื่อนโดยที่ไม่ทำให้ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมี Sensitivity ในการวัด Flying height ของตำแหน่งที่เลือกนั้นไม่แตกต่างจาก Sensitivity ที่มากที่สุดนักและเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องการหลุดลอกของฟิล์ม DLC ออกจากจานแก้วจึงเลือกตำแหน่งที่มีความหนาของ Si_1 1 นาโนเมตรเป็นต้นไป เมื่อพิจารณาข้อกำหนดดังกล่าวจึงเลือกความหนาของฟิล์มที่จะทำการสร้างดังนี้ Si_1 หนา 1, DLC_1 หนา 55, Si_2 หนา 3 และ DLC_2 หนา 25 นาโนเมตร ซึ่ง Sensitivity ในการวัด Flying height บริเวณช่วงความหนาดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 7.26 โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นเพิ่มขึ้นจากจานแก้ว 23 เปอร์เซ็นต์



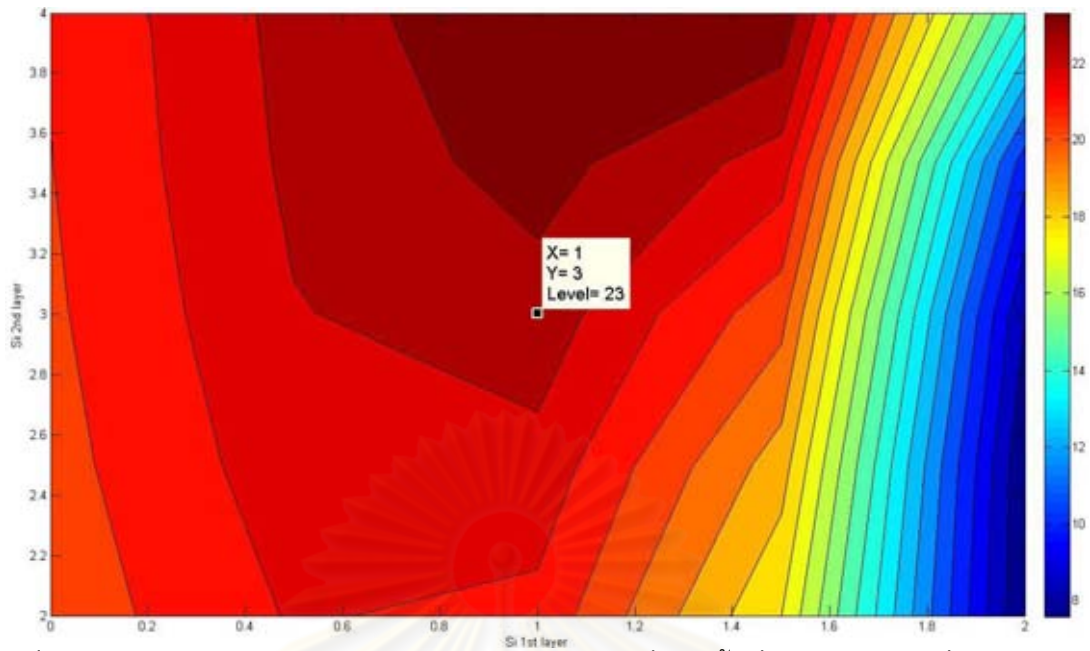
รูปที่ 7.26 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่ตำแหน่งความหนาที่สนใจคือ DLC_1 55 และ DLC_2 25 นาโนเมตรโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ DLC ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 1 และ 3 นาโนเมตร

ส่วนรูปที่ 7.27 และรูปที่ 7.28 เป็นการแสดงผล Sensitivity ในช่วงที่สนใจซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่งความหนาฟิล์มที่เลือกนั้น (Si_1 หน้า 1, DLC_1 หน้า 55, Si_2 หน้า 3 และ DLC_2 หน้า 25 นาโนเมตร) จะมีช่วงที่ยอมให้เกิดความผิดพลาดในการปลูกฟิล์มอยู่พอสมควรโดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นไม่ลดลงมากนักซึ่งสามารถสร้างได้ง่ายกว่าตำแหน่งของความหนาฟิล์มที่ให้ค่า Sensitivity ในการวัด Flying height มากที่สุด โดยที่ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มี Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตรแสดงไว้ดังรูปที่ 7.29

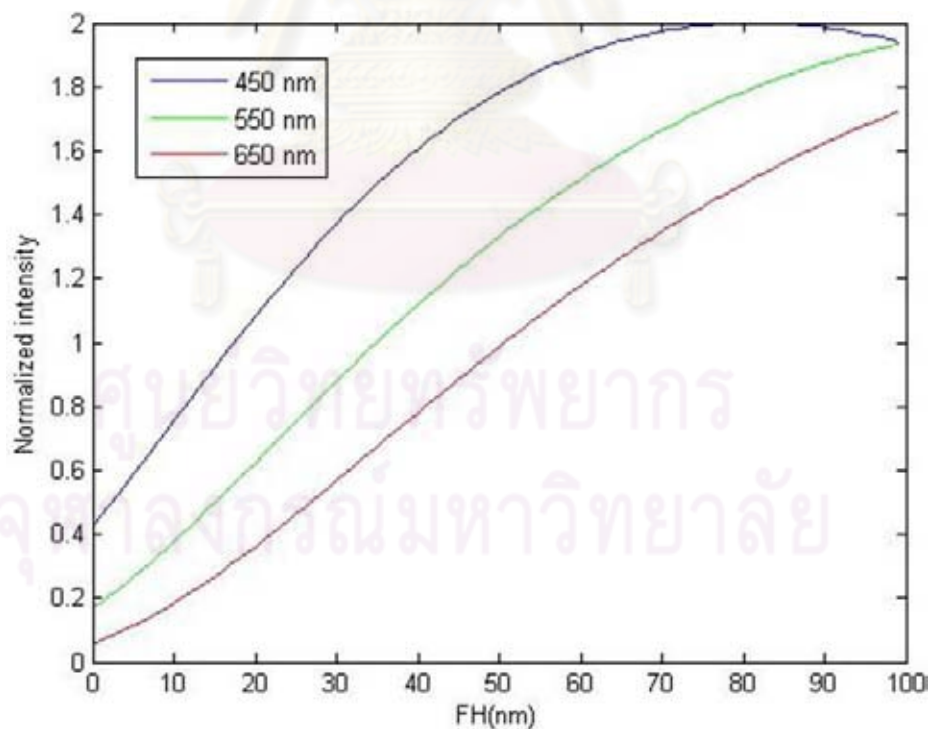


รูปที่ 7.27 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ DLC_1 45 ถึง 65 และ DLC_2 15 ถึง 35 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา Si_1 และ Si_2 เท่ากับ 1 และ 3 นาโนเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.28 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ Si_1 0 ถึง 2 และ Si_2 2 ถึง 4 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา DLC_1 และ DLC_2 เท่ากับ 55 และ 25 นาโนเมตร



รูปที่ 7.29 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มี Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร

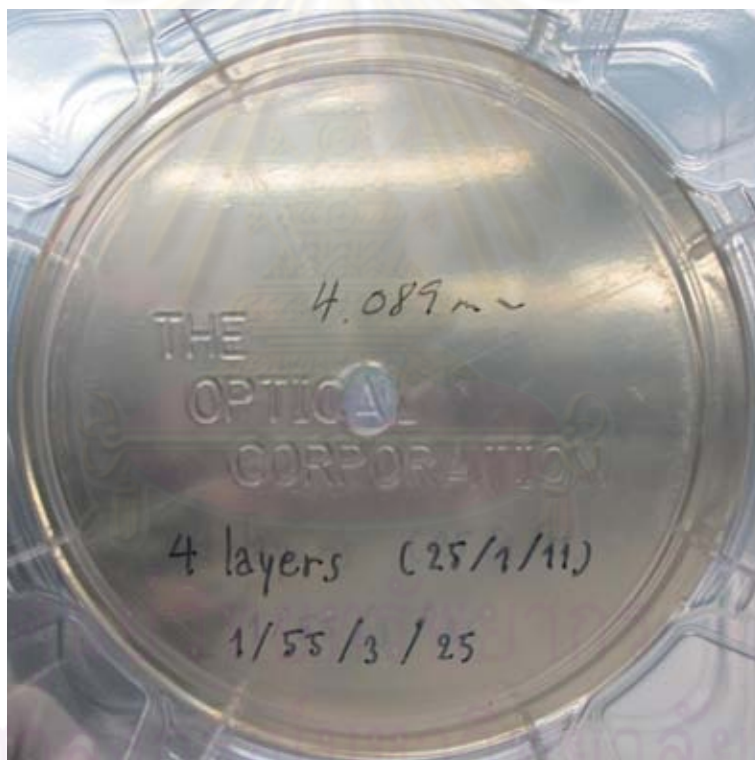
สรุปผลจากการสร้างดิสก์

สำหรับดิสก์ที่มี 5 ชั้นจะเลือกสร้างดิสก์ที่มีความหนา Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 23 เปอร์เซ็นต์

7.3.4 การสร้างดิสก์ที่มี 5 ชั้น

ขั้นตอนในการสร้าง

ใช้กระบวนการสร้างดิสก์ตามหัวข้อที่ 3.1 และพารามิเตอร์ต่างๆตามตารางที่ 3.1 แต่เพิ่มขั้นตอนในการปลูกฟิล์มซิลิกอนและ DLC เพื่อสร้างดิสก์ที่มี 5 ชั้นซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 7.16 โดยดิสก์ที่สร้างเสร็จแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 7.30 จากนั้นจะนำดิสก์นี้ไปทดสอบวัด Sensitivity ในการวัด Flying height โดยใช้เครื่อง Flying height tester ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 7.4



รูปที่ 7.30 ดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC สลับกันซึ่งมีความหนาดังนี้ Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร

7.4 การวัด Sensitivity โดยใช้เครื่องวัด Flying height

นำดิสก์ที่สร้างขึ้นดังหัวข้อที่ 7.2.5 (ซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร) และหัวข้อที่ 7.3.4 (Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร) ไปทดสอบวัด Sensitivity โดยใช้เครื่องวัด Flying height เปรียบเทียบกับงานแก้วและผลจากการคำนวณ ซึ่งในการทดสอบว่าดิสก์นี้มี Sensitivity เป็นอย่างไรสามารถทำได้โดยการวัดความเข้มแสงของแต่ละตำแหน่งบน ABS จากนั้นนำมาสร้างเป็นเส้นโค้งและวัดความชันของเส้นโค้งตามจุดที่กำหนดไว้ โดยที่การทดสอบนี้มี เครื่องมือวัด, อุปกรณ์ และขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัด

1. เครื่องวัด Flying height (DFHT5, KLA-Tencor)

อุปกรณ์

1. ดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร
2. ดิสก์ที่เคลือบผิวด้วย Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร
3. งานแก้วปกติ
4. หัวอ่าน/เขียนที่บินด้วยความสูง 12 นาโนเมตร

ขั้นตอนการทดสอบ

1. เริ่มจากการทดสอบวัด Flying height บนงานแก้วและเก็บข้อมูล Flying height และความเข้มแสงของแต่ละตำแหน่งที่กำหนดบน ABS ของหัวอ่าน/เขียนดังที่ระบุไว้ดังรูปที่ 7.31 โดยที่ความเข้มแสงที่มากที่สุดและน้อยที่สุด (Max & Min intensity) ของแต่ละตำแหน่งจะได้จากการ Calibration ที่ตำแหน่งนั้นๆ ส่วนความเข้มแสงที่อ่านได้จากตำแหน่งต่างๆของหัวอ่าน/เขียนขณะทำการบินจะได้จากการเก็บข้อมูลความเข้มแสงที่ตำแหน่งนั้นๆ (Measure intensity) โดยที่รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.1.3



รูปที่ 7.31 ตำแหน่งบน ABS ที่ใช้ทำการวัด Flying height และความเข้มแสงเพื่อทดสอบ Sensitivity (จากบนไปล่าง TAE_1, TAE_2, TAE_3 และ TAE_4)

2. เปลี่ยนดิสก์เป็นดิสก์ที่สร้างขึ้นจากนั้นทำการทดสอบเหมือนในขั้นตอนที่ 1
3. จากนั้นเปลี่ยนดิสก์เป็นจานแก้วแล้วทำการวัด Flying height เพื่อให้แน่ใจว่าหัวอ่าน/เขียนหลังจากการทดสอบนั้นมีค่า Flying height ที่เท่าเดิม
4. จากนั้นทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้งเพื่อเก็บข้อมูลและหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลความเข้มแสงและ Flying height ที่วัดได้จากจานแก้ว
5. ซึ่งจากข้อมูลของความเข้มแสงเฉลี่ยที่ได้จากการ Calibration และจากการวัดที่ตำแหน่งนั้นๆ ในขั้นตอน 1 และ 2 จะทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่

Normalize อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ได้จากสมการ $\frac{(Measure - Min)}{(Max - Min)} \times 2$ จากนั้นทำ

การ Fitting ข้อมูลของความเข้มแสงที่ Normalize เพื่อสร้างเส้นโค้งความเข้มแสง (Intensity curve) จากนั้นทำการวัด Sensitivity ตามนิยามที่กำหนดไว้ (ผลรวมของความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงที่ Flying height 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาโนเมตรของทั้ง 3 ความยาวคลื่น) เปรียบเทียบกับจานแก้วและผลการคำนวณทางทฤษฎีที่ได้จากหัวข้อ 7.2.1 และ 7.3.1 โดยที่การทดสอบนี้มีสมมติฐานคือหัวอ่าน/เขียนบินด้วย Flying height ที่เท่ากันทั้งบนจานแก้วและดิสก์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกอนและ DLC ในกรณีที่ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีนั้นมีความแตกต่างกันซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความหนาที่กำหนดและความหนา

ที่แท้จริงของฟิล์มที่ได้มีความแตกต่างกันจะใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อ Fitting ข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC เพื่อหาความหนาที่แท้จริงของฟิล์มแต่ละชั้น โดยที่สามารถดูรายละเอียดของโปรแกรมได้ที่ ภาคผนวก ข.4

7.4.1 ผลการทดสอบ Sensitivity ด้วยดิสก์ที่มี Si 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร

ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความเข้มแสงที่วัดได้จากตำแหน่งบน ABS ที่ระบุไว้ในรูปที่ 7.31 แสดงไว้ในตารางที่ 7.4 และค่าเฉลี่ยข้อมูลความเข้มแสงที่ Normalize แล้วแสดงไว้ดังตารางที่ 7.5 จากนั้นจะนำข้อมูลนี้ไปใช้เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

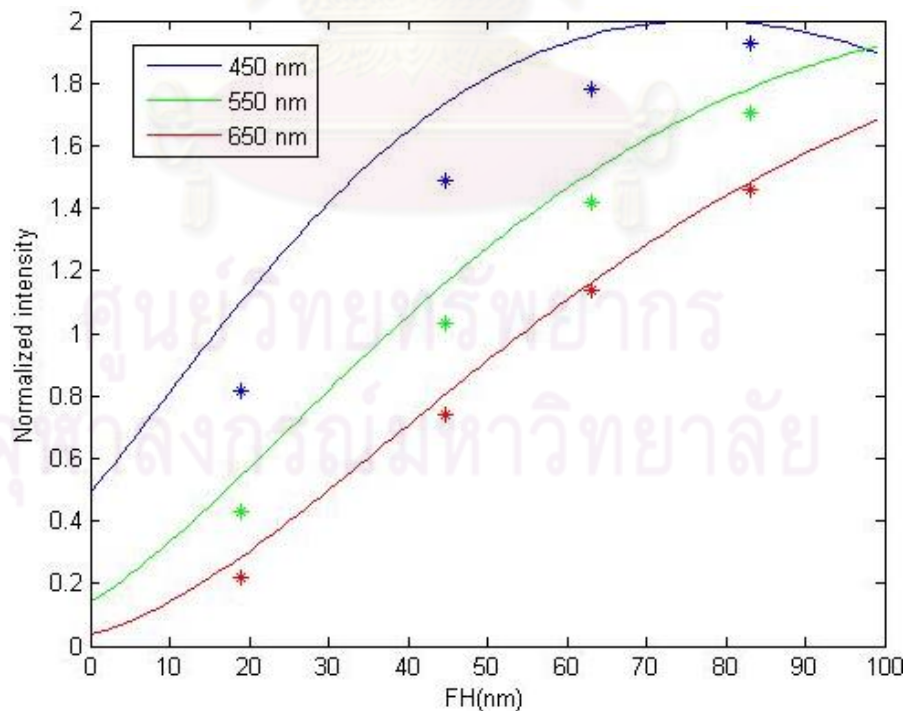
ตารางที่ 7.4 ค่าเฉลี่ยของความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มี 3 ชั้นโดยมีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่าเฉลี่ย Flying height ที่วัดจากงานแก้ว)

Point	FH in μinch	FH in nm	Wavelength 450 nm			Wavelength 550 nm			Wavelength 650 nm		
			Min	Max	Measure	Min	Max	Measure	Min	Max	Measure
TAE_1	0.746	18.94	223	962	524.18	298	1378	530.6	364	1962	540.17
TAE_2	1.756	44.60	226	949	763.88	283	1378	850	339	1979	947.60
TAE_3	2.482	63.04	213	963	881.35	281	1379	1058.22	330	1971	1262.08
TAE_4	3.276	83.20	212	979	949.96	271	1388	1221.34	317	1980	1532.15

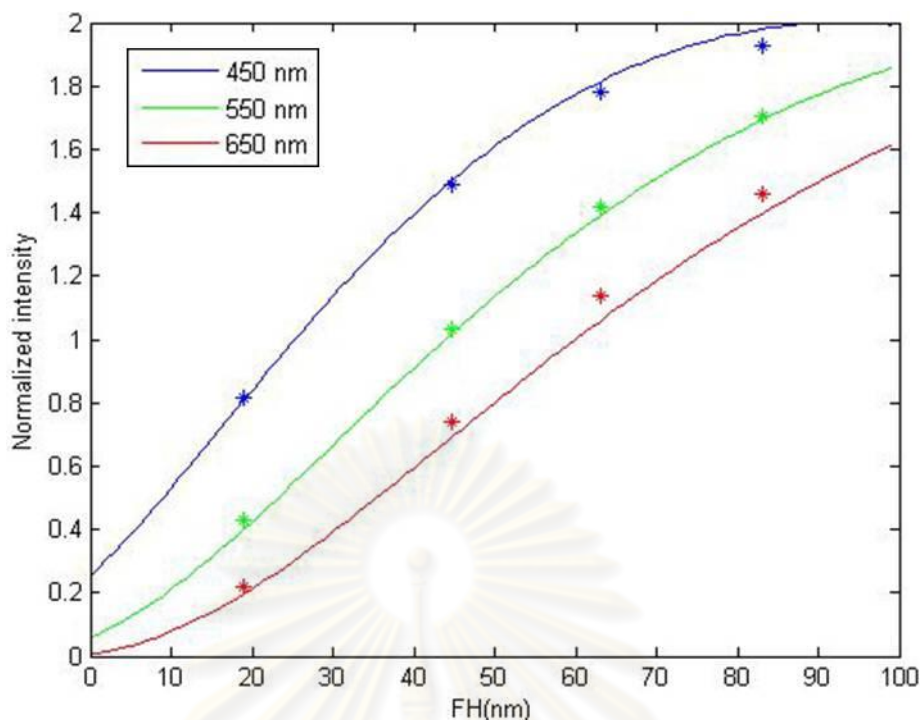
ตารางที่ 7.5 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มี 3 ชั้นโดยมีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตร และ DLC 77 นาโนเมตร

Point	Wavelength 450 nm	Wavelength 550 nm	Wavelength 650 nm
TAE_1	0.82	0.43	0.22
TAE_2	1.49	1.04	0.74
TAE_3	1.78	1.42	1.14
TAE_4	1.93	1.7	1.46

รูปที่ 7.32 แสดงถึงการเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสง (Normalize) ที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีของดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร จากรูปจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันระหว่างข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและเส้นโค้งความเข้มแสงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งอาจเป็นไปได้เนื่องจากความหนาของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่ปลูกนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากความหนาที่ต้องการ (ซึ่งการคลาดเคลื่อนของความหนาอาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการวัดอัตราการปลูกฟิล์ม (Deposition rate) ดังนั้นจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม (Deposition time) เพื่อให้ได้ตามความหนาที่ต้องการนั้นน้อยกว่าความเป็นจริง) ดังนั้นจึงประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อทำการหาความหนาของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่ทำให้ข้อมูลทั้งสองมีความใกล้เคียงกันมากที่สุดโดยการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดด้วยการคำนวณทางทฤษฎี โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC ซึ่งใช้เงื่อนไขในการ Fitting เดียวกันกับหัวข้อที่ 6.2.2 โดยที่ความหนาของซิลิกอนและ DLC ที่ให้ค่า Fitting ที่ดีที่สุดคือซิลิกอนหนา 0.57 นาโนเมตรและ DLC หนา 71 นาโนเมตรซึ่งผลของการ Fitting แสดงไว้ดังรูปที่ 7.33 จากผลการ Fitting จะเห็นว่าความหนาของฟิล์มที่ปลูกได้นั้นคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดแต่ก็ไม่ทำให้ Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

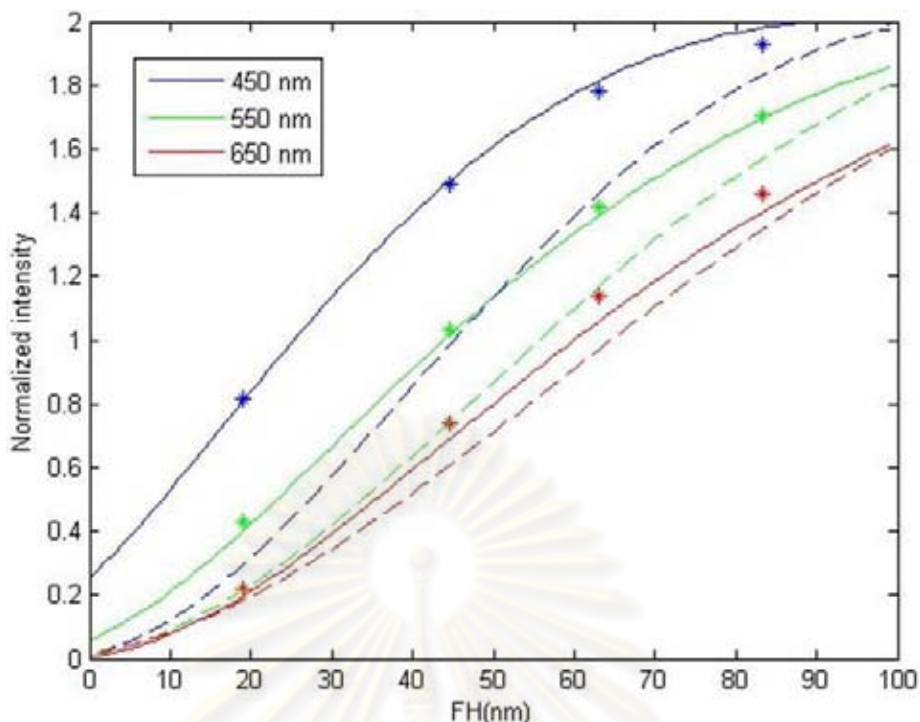


รูปที่ 7.32 เปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ความหนาของดิสก์คือซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 77 นาโนเมตร



รูปที่ 7.33 ผลการ Fitting ข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC ซึ่งดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 0.57 นาโนเมตรและ DLC 71 นาโนเมตรให้ผลการ Fitting ที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 7.34 ที่แสดงถึงการเปรียบเทียบลักษณะของเส้นโค้งความเข้มแสงระหว่างจานแก้วและดิสก์ที่มีซิลิกอน 0.57 นาโนเมตรและ DLC 71 นาโนเมตรจะเห็นได้ว่าที่ช่วงของ Flying height ที่สนใจนั้น (0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาโนเมตร) ดิสก์ที่มีซิลิกอน 0.57 นาโนเมตรและ DLC 71 นาโนเมตรนั้นมีผลรวมของความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงทุกความยาวคลื่นมากกว่าจานแก้วอย่างชัดเจน โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้น (ซิลิกอนหนา 0.57 นาโนเมตรและ DLC หนา 71 นาโนเมตร) เพิ่มขึ้นจากจานแก้ว 16.64 เปอร์เซ็นต์และเมื่อพิจารณาในช่วง Flying height ต่ำๆ (ช่วง Flying height 0, 10, 20 นาโนเมตร) จะพบว่า Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นเพิ่มขึ้นจากจานแก้วมากถึง 55.44 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7.34 การเปรียบเทียบความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height ของทุกความยาวคลื่นระหว่างจานแก้ว (ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ) กับดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 0.57 นาโนเมตรและ DLC 71 นาโนเมตร

7.4.2 ผลการทดสอบ Sensitivity ด้วยดิสก์ที่มี Si_1 , 1, DLC_1 , 55, Si_2 , 3 และ DLC_2 , 25 นาโนเมตร

ค่าเฉลี่ยของข้อมูลความเข้มแสงที่วัดได้จากตำแหน่งบน ABS ที่ระบุไว้ในรูปที่ 7.31 แสดงไว้ในตารางที่ 7.6 และค่าเฉลี่ยข้อมูลความเข้มแสงที่ Normalize แล้วแสดงไว้ดังตารางที่ 7.7 จากนั้นจะนำข้อมูลนี้ไปใช้เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

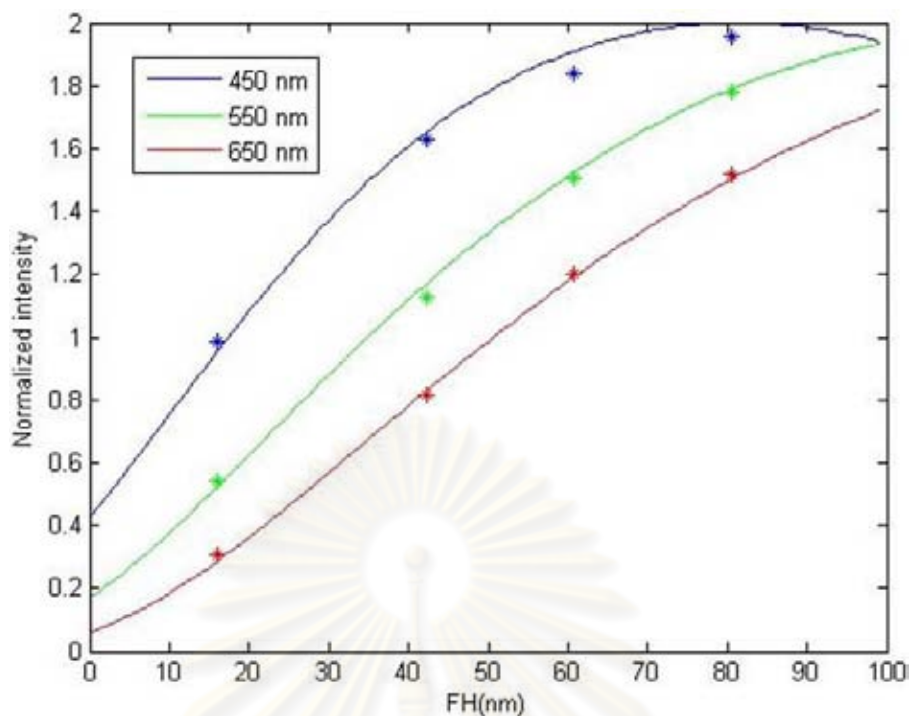
ตารางที่ 7.6 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยมีความหนา Si₁ 1, DLC₁ 55, Si₂ 3 และ DLC₂ 25 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากงานแก้ว)

Point	FH in μ inch	FH in nm	Wavelength 450 nm			Wavelength 550 nm			Wavelength 650 nm		
			Min	Max	Measure	Min	Max	Measure	Min	Max	Measure
TAE_1	0.634	16.09	299	1153	719.31	435	2083	879.5	572	3189	970.22
TAE_2	1.662	42.20	302	1131	978.59	429	2069	1350.19	560	3179	1629.9
TAE_3	2.387	60.62	290	1175	1102.85	406	2090	1672.81	517	3207	2133.67
TAE_4	3.171	80.54	287	1161	1140.99	399	2087	1901.92	508	3201	2550.38

ตารางที่ 7.7 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยมีความหนา Si₁ 1, DLC₁ 55, Si₂ 3 และ DLC₂ 25 นาโนเมตร

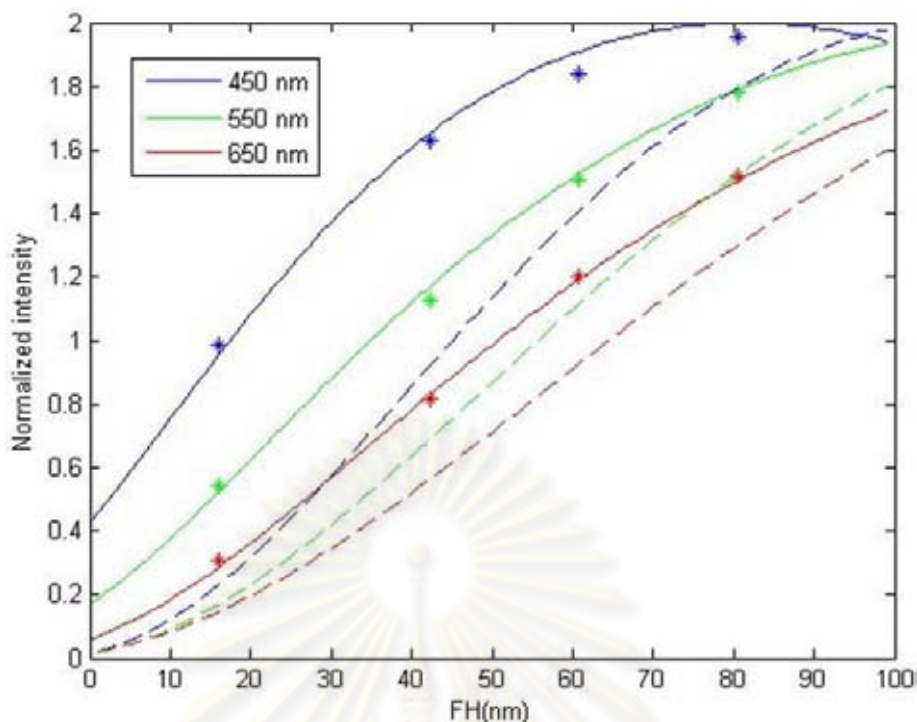
Point	Wavelength 450 nm	Wavelength 550 nm	Wavelength 650 nm
TAE_1	0.99	0.54	0.30
TAE_2	1.63	1.12	0.82
TAE_3	1.84	1.50	1.2
TAE_4	1.96	1.78	1.52

จากรูปที่ 7.35 ที่แสดงถึงการเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสง (Normalize) ที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีของดิสก์ที่มีความหนาฟิล์ม Si₁ 1, DLC₁ 55, Si₂ 3 และ DLC₂ 25 นาโนเมตร จากรูปจะเห็นว่าข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดกับเส้นโค้งความเข้มแสงที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ความหนาที่กำหนดนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน (เนื่องจากในการสร้างดิสก์นี้ได้ทำการเปลี่ยนเวลาที่ใช้การปลูกฟิล์ม (Deposition time) ให้เพิ่มขึ้นตามผลการทดสอบในหัวข้อที่ 7.4.1) แสดงว่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ปลูกได้นั้นมีความใกล้เคียงกับความหนาของชั้นฟิล์มที่ต้องการ ดังนั้นจึงไม่ต้องทำการหาความหนาของฟิล์มแต่ละชั้นโดยการ Fitting



รูปที่ 7.35 การเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดและการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ความหนาของดิสก์คือ Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร

จากรูปที่ 7.36 จะเห็นได้ชัดว่าในช่วงของ Flying height ที่สนใจนั้น (0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาโนเมตร) ดิสก์ที่มีความหนาของชั้นฟิล์ม Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตรนั้น มีผลรวมของความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงทุกความยาวคลื่นมากกว่างานแก้วอย่างชัดเจน โดยที่ Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้น (Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร) เพิ่มขึ้นจากงานแก้ว 23 เปอร์เซ็นต์และเมื่อพิจารณาในช่วง Flying height ต่ำๆ (ช่วง Flying height 0, 10, 20 นาโนเมตร) จะพบว่า Sensitivity ในการวัด Flying height นั้นเพิ่มขึ้นจากงานแก้วมากถึง 85.16 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 7.36 เปรียบเทียบความชันของเส้นโค้งความเข้มแสงซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height ของทุกความยาวคลื่นระหว่างจานแก้ว (ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ) กับดิสก์ที่มีความหนาของ Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตร

7.5 สรุปผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยการเคลือบผิวดิสก์ ด้วยซิลิกอนและ DLC

ตารางที่ 7.8 สรุปผลความไวในการวัด Flying height (Sensitivity) ที่เพิ่มขึ้นของดิสก์ที่สร้างขึ้น ตามผลการ Optimize

Disk type	Details	Sensitivity 0-20 nm	Sensitivity 0-50 nm
3-Layer disk	Si 0.57nm, DLC 71nm	16.64%	55.44%
5-Layer disk	Si_1 1nm, DLC_1 55nm, Si_2 3 nm and DLC_2 25 nm	23%	85.16%

ผลการทดสอบวัด Sensitivity ในการวัด Flying height โดยใช้เครื่องวัด Flying height tester ของดิस्कที่สร้างขึ้นตามผลการ Optimize โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มซิลิกอน และ DLC ซึ่งคำนึงถึงข้อจำกัดและความเป็นไปได้ในกระบวนการสร้างดิस्कแสดงไว้ดังตารางที่ 7.8 ซึ่งพบว่าดิस्कที่สร้างขึ้นนั้นสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ดิस्कที่มี 3 ชั้นซึ่งประกอบด้วยจานแก้ว, ฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่มีความหนา 0.57 และ 71 นาโนเมตรสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้มากถึง 16.64 เปอร์เซ็นต์เมื่อพิจารณาในช่วง Flying height ที่กำหนดและเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วง Flying height ต่ำๆ (ประมาณ 0 ถึง 20 นาโนเมตร) พบว่า Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้มากถึง 55.44 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดิस्कที่มี 5 ชั้นซึ่งประกอบด้วยจานแก้วและชั้นของฟิล์มซิลิกอนและ DLC สลับกันซึ่งมีความหนาดังนี้ Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตรสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้มากถึง 23 เปอร์เซ็นต์เมื่อพิจารณาในช่วง Flying height ที่กำหนดและเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วง Flying height ต่ำๆ นั้น พบว่า Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้มากถึง 85.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการทดสอบของดิस्कทั้ง 2 แผ่นสามารถสรุปได้ว่า Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถปรับปรุงได้โดยการเคลือบผิวของจานแก้วด้วยชั้นของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่มีลักษณะและความหนาที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มี 2 วัตถุประสงค์คือ 1. ต้องการเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วที่ใช้ในเครื่องวัด Flying height tester และ 2. ปรับปรุงความไว (Sensitivity) ในการวัด Flying height ของจานแก้ว ซึ่งแนวทางที่เลือกใช้ในการทำงานวิจัยให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์คือ การเคลือบผิวของจานแก้วด้วย DLC ซึ่งจานแก้วที่เคลือบผิวด้วย DLC นั้นจะถูกนำไปทดสอบในขั้นตอนต่างๆที่กำหนดไว้ได้แก่ ความสามารถในการบิน, ผลของซิลิกอนที่มีต่อความแข็งแรงของดิสก์และความชัดเจนของ Pole-tip, อายุการใช้งาน, การประยุกต์ใช้งาน และ ความไวในการวัด Flying height ซึ่งผลการทดสอบในขั้นตอนต่างๆนั้นสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากกระบวนการสร้างดิสก์และตรวจสอบดิสก์ในเบื้องต้นโดยการทดสอบความสามารถในการบินของหัวอ่าน/เขียนโดยใช้ดิสก์ที่สร้างขึ้นพบว่าดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 7.5 นาโนเมตร และ DLC 10 นาโนเมตรนั้นหัวอ่าน/เขียนสามารถบินได้โดยไม่เกิดรอยขีดข่วนแล้วแต่เนื่องจากดิสก์ที่ใช้ซิลิกอนที่หนาเกินไปจะทำให้สีของดิสก์นั้นเข้มขึ้นกว่าจานแก้วมากซึ่งจะมองเห็นตำแหน่ง Pole-tip ได้ไม่ชัดเจนซึ่งจะเป็นอุปสรรคในการวัด Flying height ดังนั้นจึงทำการทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่อความแข็งแรงของดิสก์และความชัดเจนของตำแหน่ง Pole-tip ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอนน้อยกว่า 3 นาโนเมตรจะสามารถมองเห็น Pole-tip ได้ชัดเจนและโปรแกรมอัตโนมัติก็สามารถตรวจจับตำแหน่ง Pole-tip ได้ และจากผลการทดสอบความแข็งแรงพบว่าดิสก์ที่มีชั้นของซิลิกอนและ DLC สามารถลดความลึกของรอยขีดข่วนลงจากจานแก้วได้ถึง 92 เปอร์เซ็นต์แต่การเพิ่มความหนาซิลิกอนให้มากกว่า 3 นาโนเมตรนั้นไม่แสดงถึงความแตกต่างของความลึกของรอยขีดข่วนอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากการทดสอบผลของซิลิกอนที่มีต่อความชัดเจนในการมองเห็น Pole-tip และความแข็งแรงดิสก์พบว่าดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรเป็นดิสก์ที่มีความแข็งแรงมากที่สุดที่ยังสามารถมองเห็น Pole-tip ได้อย่างชัดเจนด้วย จากนั้นจะนำดิสก์นี้ไปทดสอบวัดอายุการใช้งานเปรียบเทียบกับจานแก้ว ซึ่งจากผลการทดสอบวัดอายุการใช้งานโดยใช้เครื่องวัด Flying height และจากการยืนยันผลการทดสอบโดยใช้เครื่อง Profiler ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเคลือบผิวหน้าของจานแก้วด้วยซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและ DLC หนา 15 นาโนเมตรสามารถปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วให้เพิ่มขึ้นได้อย่างน้อย 30 เท่าโดยที่รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นบนดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 3 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรนั้นมีขนาดเล็กกว่าที่

เกิดขึ้นบนจานแก้วอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height สามารถลดลงได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับจานแก้ว จากนั้นดิสก์ที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในเครื่องวัด Flying height tester โดยมีกระบวนการสอบเทียบซึ่งจะนำค่าความเข้มแสงสะท้อนจากดิสก์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้กำหนดค่าดรรรชนีหักเหของดิสก์ โดยที่มีข้อจำกัดคือค่า n ของดรรรชนีหักเหต้องมากกว่า 1.1 และไม่มีค่า k จากการประยุกต์ใช้กระบวนการสอบเทียบดังกล่าวพบว่าสามารถประยุกต์ใช้ดิสก์ที่สร้างขึ้นให้สามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องที่โดยที่มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 1 นาโนเมตร

ในส่วนของการปรับปรุงความไว (Sensitivity) ในการวัด Flying height ของจานแก้วเริ่มด้วยการสร้างดิสก์ตามผลการ Optimize sensitivity ในการวัด Flying height โดยคำนึงถึงข้อจำกัดและความเป็นไปได้ในการสร้างและจากผลการทดสอบการวัด Sensitivity ในการวัด Flying height โดยใช้เครื่องวัด Flying height tester พบว่าดิสก์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ดิสก์ที่มี 3 ชั้นซึ่งประกอบด้วยจานแก้ว, พิล์มซิลิกอนและ DLC ที่มีความหนา 0.57 และ 77 นาโนเมตรสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้มากถึง 16.64 เปอร์เซ็นต์เมื่อพิจารณาในช่วง Flying height ที่กำหนดและเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วง Flying height ต่ำๆ (ประมาณ 0 ถึง 20 นาโนเมตร) พบว่า Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้มากถึง 55.44 เปอร์เซ็นต์ ส่วนดิสก์ที่มี 5 ชั้นซึ่งประกอบด้วยจานแก้วและชั้นของฟิล์มซิลิกอนและ DLC สลับกันซึ่งมีความหนาดังนี้ Si_1 1, DLC_1 55, Si_2 3 และ DLC_2 25 นาโนเมตรสามารถเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height ได้มากถึง 23 เปอร์เซ็นต์เมื่อพิจารณาในช่วง Flying height ที่กำหนดและเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วง Flying height ต่ำๆพบว่า Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้มากถึง 85.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการทดสอบของดิสก์ทั้ง 2 แผ่นแสดงให้เห็นว่า Sensitivity ในการวัด Flying height สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเคลือบผิวของจานแก้วด้วยชั้นของฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่มีลักษณะและความหนาที่เหมาะสม จากผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความไวในการวัด Flying height ได้อีกด้วย ซึ่งผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการวัด Flying height ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Liu, B., et al. Air-bearing design towards highly stable head-disk interface at ultralow flying height. IEEE Transactions on Magnetics, Vol 43, No.2 (2007): 715-720.
- [2] Lee, S-C., and Strom, BD. Characterization of thermally actuated pole tip protrusion for head-media spacing adjustment in hard disk drives. ASME Transaction Journal of Tribology, Vol.130, issue 2 (2008): 022001-022006.
- [3] Hua, W., et al. Contact recording review. Microsystem Technologies, Vol 16, No4 (2010): 493–503.
- [4] Vakis, Al. Polycarpou AA Optimization of the thermal fly-height control slider geometry for Tbit/in² recording. Microsystem Technologies, Vol 16, Issue 6 (2010): 1021-1034.
- [5] Liu, X., Clegg, W., and Liu, B. Polarisation interferometry flying height testing. Optical & Laser Technology, Vol 37, Issue 1 (2004): 21-27.
- [6] Liu, X., Clegg, W., Liu, B., and Chong, C. Improved Intensity Interferometry Method for measuring Head-disk spacing down contact. IEEE Transaction on Magnetics, Vol 36, No 5 (2000): 2674-2676.
- [7] Umehara, M., and Sato, M. Measuring apparatus of flying height of magnetic head. US Patent 6,246,475 (1994).
- [8] วิกิพีเดีย. ฮาร์ดดิสก์ [ออนไลน์] 2009. แหล่งที่มา:
<http://th.wikipedia.org/w/index.php?title=%E0%B8%AE%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%94%E0%B8%94%E0%B8%B4%E0%B8%AA%E0%B8%81%E0%B9%8C&action=history> [2010, March 20].

- [9] KEPCIL. Hard disk basics [online] 2010. Available from:
<http://keppanet.netfirms.com/keppanet/harddisk/hdinside.htm> [2010, March 20].
- [10] Talke lab. Head/Disk interface research [online] 2009. Available from:
<http://talkelab.ucsd.edu/head-disk/> [2010, March 20].
- [11] Buycoms. Harddisk [Online] 2009. Available from:
<http://www.buycoms.com/buyersguide/harddisk/index.asp> [2010, March 20].
- [12] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ฮาร์ดดิสก์ [ออนไลน์] แหล่งที่มา:
<http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet1/hardware/hdisk.htm> [2010, March 20].
- [13] Liu, X., Clegg, W., and Liu, B. Ultra low head–disk spacing measurement using dual beam polarisation interferometry. Optics & Laser Technology, Vol 32, Issue 4 (2000): 287-291.
- [14] Zhu, Y. Flying height measurement considering the effects of the slider-disk interaction. IEEE Transaction on Magnetics, Vol 36, No 5 (2000): 2677-2679.
- [15] KLA-Tencor Corporation. Dynamic Flying Height Tester Operation Manual. San Diago: KLA-Tencor, 2002 (Unpublished Manuscript).
- [16] Sciner.co. Fused silica [online] 2007. Available from:
<http://www.sciner.com/Opticsland/FS.htm> [2010, March 24].
- [17] Red optronic.co. BK7 glass [online] 2010. Available from:
<http://www.redoptronics.com/Bk7-optical-material.html> [2010, March 24].
- [18] Wikipedia. Fused quartz [Online] 2010. Available from:
http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_quartz [2010, March 24].
- [19] Wikipedia. Sapphire [Online] 2010. Available from:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Sapphire> [2010, March 24].

- [20] Hainsworth, S.V., and Uhure, N.J. Diamond like carbon coatings for tribology: production techniques, characterization method and application. International Materials Reviews, Vol 52, No 3 (2007): 153-174.
- [21] Wikipedia. Zinc oxide [Online] 2010. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide [2010, March 25].
- [22] Wikipedia. Silicon nitride [Online] 2010. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_nitride [2010, March 25].
- [23] OHARA Corp. GD-FHT [Online] . Available from: <http://www.oharacorp.com/gdf.html> [2010, March 25].
- [24] Wikipedia. Fused quartz [Online] 2010. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_quartz [2010, March 25].
- [25] KYOCERA. Crystal [Online] 2010. Available from: <http://americas.kyocera.com/kicc/industrial/crystal.html> [2010, March 25].
- [26] Bhushan ,B. Chemical, mechanical and tribological characterization of ultra-thin and hard amorphous carbon coatings as thin as 3.5 nm: recent developments. Diamond and Related Material, Vol 8, Issue 11 (1999): 1985-2015.
- [27] Brushan, B., Gupta, B.K., Michael, H., and Azarian. Nanoindentation, microscratch, friction, and wear studies of coatings for contact recording applications. Wear, Vol 181-183, part 2 (1995): 743-758.
- [28] Navamatha, R., et al. A nanoindentation study of the mechanical properties of ZnO thin films on (0 0 0 1) sapphire. Applied Surface Science, Vol 253, Issue 2 (2006): 464-467.
- [29] Beck, U., Smith, D.T., Reiners, G., and Dapkunas, S.J. Mechanical properties of SiO₂ and Si₃N₄ coatings: a BAM/NIST co-operative project. Thin Solid Films, Vol 332, Issue 1-2 (1998): 164-171.

- [30] J.A.Woollam.co. Ellipsometry tutorial [Online] 2010. Available from:
http://www.jawoollam.com/tutorial_1.html [2009, June 30].
- [31] JML optical industry. Introduction to coating [Online] 2010. Available from:
<http://www.jmloptical.com/pages/coatings.aspx> [2010, March 30].
- [32] Fujiwara, H. 2007. Spectroscopic Ellipsometry Principle and Application. John Wiley & Sons.
- [33] Tompkins, H.G., and William, A. 1999. Spectroscopic Ellipsometry and reflectometry. John Wiley & Sons.
- [34] Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon. Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol 37, Issues 4-6 (2002): 129–281.
- [35] Erdemir, A., and Donnet, C. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects. Journal of Physics D: Apply Physics, Vol 39, No 18 (2006): R311–R327.
- [36] Rymuza, Z. Control tribological and mechanical properties of MEMS surfaces. Microsystem Technologies, Vol 5, No 4 (1999): 173–180.
- [37] Luo, JK., et al. Diamond and diamond-like carbon MEMS. Journal of Micromechanics Microengineering, Vol 17, No 7 (2007): S147-S163.
- [38] Bhushan, B., and Koinkar, V.N. Microscale mechanical and tribological characterization of hard amorphous carbon coatings as thin as 5 nm for magnetic disks. Surface Coating Technology, Vol 76-77, Part 2 (1995): 655-669.
- [39] Sundararajan S., and Bhushan B. Micro/nanotribology of ultra-thin hard amorphous carbon coatings using atomic force/friction force microscopy. Wear, Volume 225, Part 1 (1999): 678-689.

- [40] Takai, O., Tajima, N., Saze, H., and Sugimura, H. Nanoindentation studies on amorphous carbon nitride thin films prepared by shielded arc ion plating. Surface and Coatings Technologies, Vol 142 (2001): 719-723.
- [41] Daniels, BK., Brown, DW., and Kimock, FM. Friction and wear performance of diamond-like carbon, boron carbide, and titanium carbide coatings against glass. Journal of Materials Research, Vol 12, Issue 9 (1997): 2485-2492.
- [42] University of Nebraska-Lincoln. Nanoindenter probes [Online] 2010. Available from: <http://www.engineering.unl.edu/research/bm3/Nanoindenter.shtml#details> [2010, July 25].
- [43] Lacey, C. Method and apparatus to calibrate intensity and determine fringe order for interferometric measurement of small spacing. US Patent 5,280,340 (1991).



ภาคผนวก

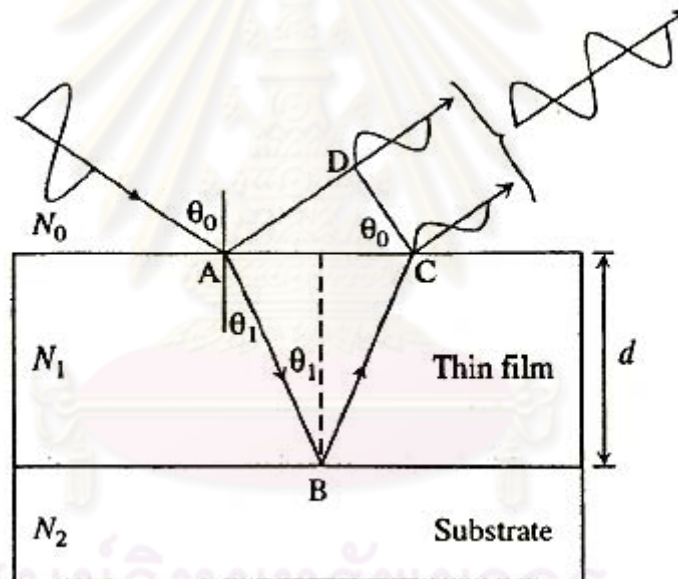
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณการแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง

ก.1 ฟิล์มบางบน Substrate

รูปที่ ก.1 [27] แสดงถึงแบบจำลองของฟิล์มบางที่ปลูกบน Substrate ซึ่งตัวแปรต่างๆ แสดงไว้ดังนี้ ค่าคงที่ทางแสงของอากาศ ฟิล์มและ Substrate ตามลำดับซึ่งแสดงอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน (N_0, N_1, N_2) โดยที่ N สามารถเขียนให้อยู่ในลักษณะ $n+ik$ ซึ่ง n คือดรรชนีหักเหและ k คือค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซึม (Extinction coefficient) ความหนาของฟิล์ม (d) และมุมของแสงที่ทำกับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวของฟิล์ม (θ)



รูปที่ ก.1 การแทรกสอดของแสงในฟิล์มบาง [27]

จากเส้นทางเดินของแสงในรูปที่ ก.1 สามารถเขียนเฟสของแสงที่แตกต่างกันระหว่าง \overline{AD} และ \overline{AC} ได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{2\pi N_1}{\lambda} (\overline{AB} - \overline{BC}) - \frac{2\pi N_0}{\lambda} (\overline{AD}) \quad \text{--- (ก.1)}$$

ซึ่งจากรูปที่ ก.1 จะเห็นว่า $\overline{AD} = \overline{AC} \sin(\theta_0)$ และ $\overline{AC} = 2d \tan(\theta_1)$ ซึ่งจากกฎของ Snell

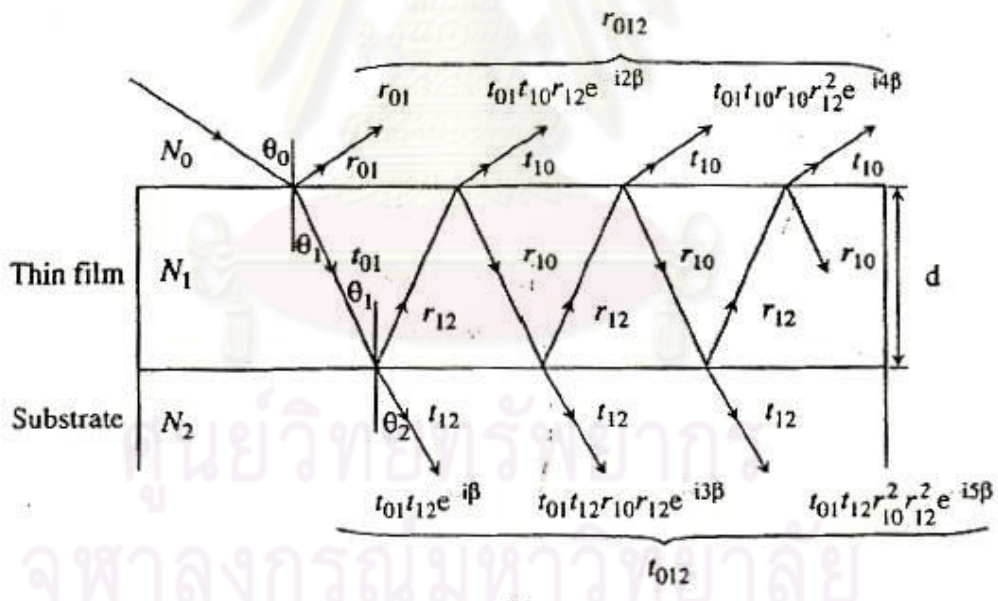
$$\overline{AD} = 2d \frac{\sin^2(\theta_1) \cdot N_1}{\cos(\theta_1) N_0} \quad \text{--- (ก.2)}$$

จากการแทนสมการ (ก.2) ด้วย $\overline{AB} = \overline{BC} = \frac{d}{\cos(\theta_1)}$ ในสมการ (ก.1) จะได้

$$\alpha = \frac{4\pi d N_1}{\lambda} \left(\frac{1 - \sin^2(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} \right) = \frac{4\pi d N_1}{\lambda} \cos(\theta_1) = 2\beta \quad \text{--- (ก.3)}$$

ซึ่งสามารถคำนวณเฟสที่แตกต่างกันเนื่องจากความหนาของฟิล์ม (Film phase thickness) ได้จาก

$$\beta = \frac{2\pi d}{\lambda} N_1 \cos(\theta_1) = \frac{2\pi d}{\lambda} (N_1^2 - N_1^2 \sin^2(\theta_0))^{1/2} \quad \text{--- (ก.4)}$$



รูปที่ ก.2 แบบจำลองการแทรกสอดของแสงระหว่างชั้นตัวกลาง อากาศ ฟิล์มบางและ Substrate [27]

จากรูปที่ ก.2 [27] แสดงถึงแบบจำลองการแทรกสอดของแสงระหว่างชั้นตัวกลาง อากาศ ฟิล์มบางและ Substrate ซึ่ง r_{ij} และ t_{ij} แสดงถึงแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflection) และการเดินทางของแสง (Transmission) ของแต่ละชั้นของตัวกลาง ซึ่งจากสมการของ Fresnel ของ p- และ s-polarization จะได้ว่า

$$r_{ij,p} = \frac{N_j \cos(\theta_i) - N_i \cos(\theta_j)}{N_j \cos(\theta_i) + N_i \cos(\theta_j)}, \quad r_{ij,s} = \frac{N_i \cos(\theta_i) - N_j \cos(\theta_j)}{N_i \cos(\theta_i) + N_j \cos(\theta_j)} \quad \text{--- (ก.5)}$$

$$t_{ij,p} = \frac{2N_i \cos(\theta_i)}{N_j \cos(\theta_i) + N_i \cos(\theta_j)}, \quad t_{ij,s} = \frac{2N_i \cos(\theta_i)}{N_i \cos(\theta_i) + N_j \cos(\theta_j)} \quad \text{--- (ก.6)}$$

ซึ่งสามารถคำนวณแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงทั้งหมด (r_{012}) ที่สะท้อนออกมาจากแบบจำลองได้จากผลรวมของแสงที่สะท้อนออกมาทุกเส้นได้ดังนี้

$$r_{012} = r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{i2\beta} + t_{01}t_{10}r_{10}r_{12}^2e^{i4\beta} + t_{01}t_{10}r_{10}^2r_{12}^3e^{i6\beta} + \dots \quad \text{--- (ก.7)}$$

จากอนุกรมอนันต์ $y = a + ar + ar^2 + ar^3 + \dots$ จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูป $y = \frac{a}{1-r}$

ได้ตั้งนั้นจากสมการที่ (ก.7) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$r_{012} = r_{01} + \left[\frac{t_{01}t_{10}r_{12}e^{(2i\beta)}}{1 - r_{10}r_{12}e^{(2i\beta)}} \right] \quad \text{--- (ก.7)}$$

จากความสัมพันธ์ $r_{10} = -r_{01}$ และ $t_{01}t_{10} = 1 - r_{01}^2$ ทำให้สามารถเขียนสมการที่ (ก.7) ให้อยู่ในรูปดังนี้

$$r_{012} = \left[\frac{r_{01} + r_{12}e^{(2i\beta)}}{1 + r_{10}r_{12}e^{(2i\beta)}} \right] \quad \text{--- (ก.8)}$$

ในทำนองเดียวกันก็จะสามารถเขียนสมการของการเดินทางผ่านของแสงจากแบบจำลองได้ตั้งสมการที่ (ก.9)

$$t_{012} = \left[\frac{t_{01}t_{12}e^{(i\beta)}}{1 + r_{10}r_{12}e^{(2i\beta)}} \right] \quad \text{--- (ก.9)}$$

ซึ่งจากสมการที่ (ก.8) และ (ก.9) แอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงและการเดินทางผ่านของแสงของแบบจำลองสามารถคำนวณได้จาก

$$r_{012,p} = \left[\frac{r_{01,p} + r_{12,p}e^{(2i\beta)}}{1 + r_{10,p}r_{12,p}e^{(2i\beta)}} \right], \quad r_{012,s} = \left[\frac{r_{01,s} + r_{12,s}e^{(2i\beta)}}{1 + r_{10,s}r_{12,s}e^{(2i\beta)}} \right] \quad \text{--- (ก.10)}$$

$$t_{012,p} = \left[\frac{t_{01,p}t_{12,p}e^{(i\beta)}}{1 + r_{10,p}r_{12,p}e^{(2i\beta)}} \right], \quad t_{012,s} = \left[\frac{t_{01,s}t_{12,s}e^{(i\beta)}}{1 + r_{10,s}r_{12,s}e^{(2i\beta)}} \right] \quad \text{--- (ก.11)}$$

จากสมการที่ (ก.10) และ (ก.11) ทำให้สามารถคำนวณอัตราส่วนความเข้มแสง (ความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากแบบจำลองต่อความเข้มแสงที่ตกกระทบกับแบบจำลอง) ได้ดังสมการที่ (ก.12)

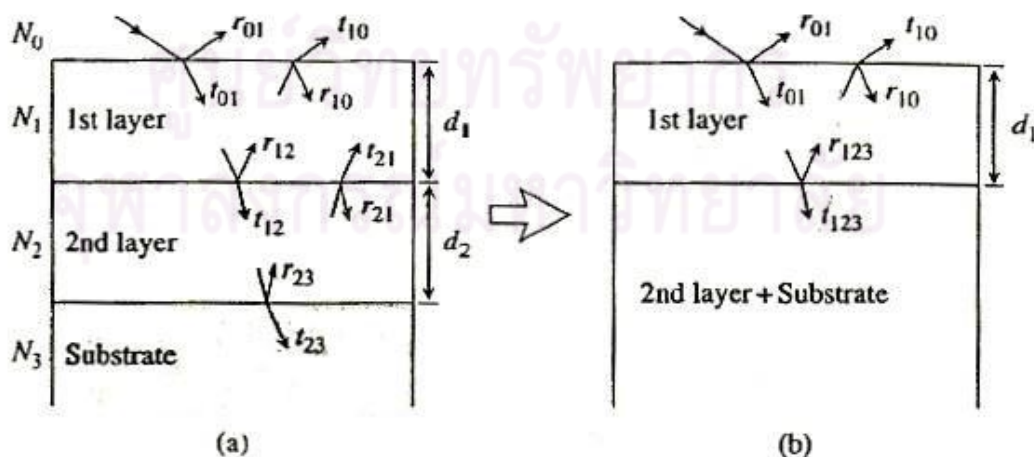
$$\frac{I_{s,p}}{I_{0,p}} = \left| \frac{E_{s,p}}{E_{0,p}} \right|^2 = |r_{012,p}|^2, \quad \frac{I_{s,s}}{I_{0,s}} = \left| \frac{E_{s,s}}{E_{0,s}} \right|^2 = |r_{012,s}|^2 \quad \text{--- (ก.12)}$$

โดยที่มุมตกกระทบและมุมที่แสงเดินทางผ่านชั้นตัวกลางสามารถคำนวณได้จากกฎของ Snell ดังนี้

$$N_0 \sin(\theta_0) = N_1 \sin(\theta_1) = N_2 \sin(\theta_2) \quad \text{--- (ก.13)}$$

ก.2 ฟิล์มหลายชั้นบน Substrate (Multilayers)

การคำนวณการแทรกสอดของแสงในฟิล์มที่มีหลายชั้นสามารถใช้วิธีเดียวกันกับที่ได้อธิบายไปในหัวข้อที่ 1 แล้วจากรูปที่ ก.3 [27] แสดงถึงแบบจำลองของการแทรกสอดของแสงในฟิล์ม 2 ชั้นบน Substrate ซึ่งจะสามารถแบ่งการคำนวณได้ดังที่แสดงไว้ยังรูปที่ ก.3 (b) โดยจะทำการคำนวณฟิล์มชั้นที่ 2 (2nd layer) กับ Substrate ก่อนโดยใช้สมการที่ (ก.8) และ (ก.9) โดยที่มีตัวแปรต่างๆดังที่แสดงไว้ในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 วิธีการคำนวณการแทรกสอดของแสงในฟิล์มที่มีหลายชั้น [27]

การคำนวณแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงและการเดินทางผ่านของแสงของฟิล์มชั้นที่ 2 กับ Substrate แสดงไว้ยังสมการที่ (ก.14) และ (ก.15)

$$r_{123} = \left[\frac{r_{12} + r_{23}e^{(2i\beta_2)}}{1 + r_{12}r_{23}e^{(2i\beta_2)}} \right] \quad \text{--- (ก.14)}$$

$$t_{123} = \left[\frac{t_{12}t_{23}e^{(i\beta_2)}}{1 + r_{12}r_{23}e^{(2i\beta_2)}} \right] \quad \text{--- (ก.15)}$$

โดยที่การเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสงเมื่อเดินทางผ่านชั้นตัวกลางที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\beta_2 = \frac{2\pi d_2 N_2 \cos(\theta_2)}{\lambda} \quad \text{--- (ก.16)}$$

จากสมการที่ (ก.14) ถึง (ก.16) สามารถคำนวณแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงและการเดินทางผ่านของแสงของแบบจำลองได้ดังนี้

$$r_{0123} = \left[\frac{r_{01} + r_{123}e^{(2i\beta_1)}}{1 + r_{01}r_{123}e^{(2i\beta_1)}} \right] \quad \text{--- (ก.17)}$$

$$t_{0123} = \left[\frac{t_{01}t_{123}e^{(i\beta_1)}}{1 + r_{01}r_{123}e^{(2i\beta_1)}} \right] \quad \text{--- (ก.18)}$$

โดยที่การเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสงเมื่อเดินทางผ่านชั้นตัวกลางที่ 1 สามารถคำนวณได้ดังนี้

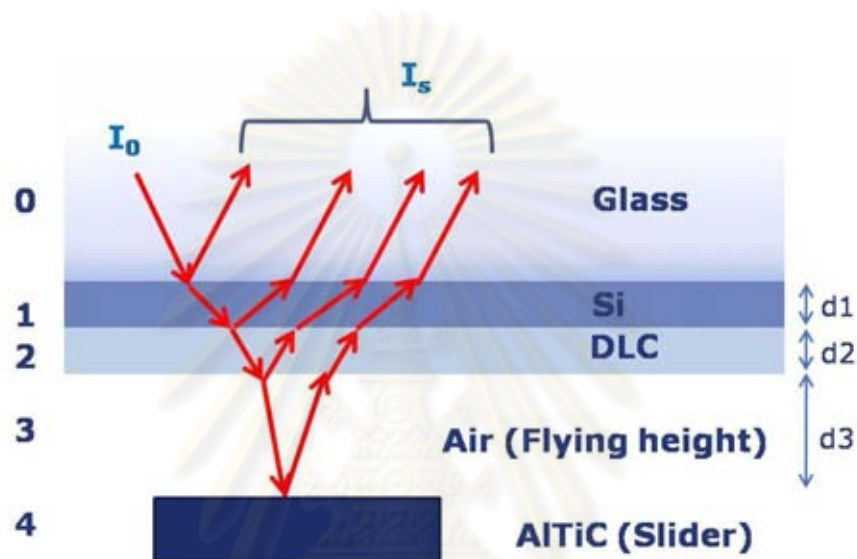
$$\beta_1 = \frac{2\pi d_1 N_1 \cos(\theta_1)}{\lambda} \quad \text{--- (ก.16)}$$

อัตราส่วนความเข้มแสง (ความเข้มแสงที่สะท้อนออกจากแบบจำลองต่อความเข้มแสงที่ตกกระทบกับแบบจำลองสามารถคำนวณได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$\frac{I_{s,p}}{I_{0,p}} = \left| \frac{E_{s,p}}{E_{0,p}} \right|^2 = |r_{0123,p}|^2, \quad \frac{I_{s,s}}{I_{0,s}} = \left| \frac{E_{s,s}}{E_{0,s}} \right|^2 = |r_{0123,s}|^2 \quad \text{--- (ก.17)}$$

ก.3 การแทรกสอดของแสงในการวัด Flying height โดยใช้ดิסקที่มีชั้นของซิลิกอนและ DLC

จากวิธีการคำนวณที่ได้อธิบายไว้ยังหัวข้อที่ 1 และ 2 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากแบบจำลองการวัด Flying height ด้วยจานแก้วที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC ได้ โดยแบบจำลองการสะท้อนของแสงในการวัด Flying height แสดงไว้ดังรูปที่ ก.4 โดยที่แสงที่ตกกระทบทำมุมตั้งฉากกับผิวจานแก้ว ($\theta_0 = 0$)



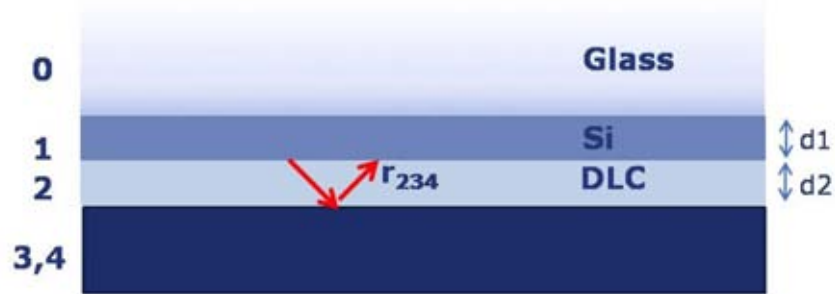
รูปที่ ก.4 แบบจำลองการสะท้อนของแสงในการวัด Flying height ด้วยจานแก้วที่เคลือบด้วยซิลิกอนและ DLC

จากรูปที่ ก.4 จะเริ่มจากการยุบรวมของชั้นของตัวกลางที่ 3 (อากาศ) และ 4 (AITiC slider) ซึ่งสามารถการคำนวณแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงของฟิล์มชั้นที่ 3 กับ 4 และการเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสงเมื่อเดินทางผ่านชั้นตัวกลางที่ 3 ได้ดังนี้

$$r_{234} = \left[\frac{r_{23} + r_{34}e^{(2i\beta_3)}}{1 + r_{23}r_{34}e^{(2i\beta_3)}} \right] \quad \text{--- (ก.18)}$$

$$\beta_3 = \frac{2\pi d_3 N_3}{\lambda} \quad \text{--- (ก.19)}$$

โดยรูปที่ ก.5 แสดงถึงรูปที่ ก.4 หลังจากการยุบรวมของชั้นตัวกลางที่ 3 และ 4



รูปที่ ก.5 แบบจำลองการวัด Flying height หลังจากยุบรวมชั้นตัวกลางที่ 3 และ 4

หลังจากนั้นทำการยุบรวมชั้นของตัวกลางที่ 2 (DLC) และ 3, 4 ซึ่งสามารถคำนวณแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงของฟิล์มชั้นที่ 2 กับ 3, 4 และการเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสงเมื่อเดินทางผ่านชั้นตัวกลางที่ 2 ได้ดังนี้

$$r_{1234} = \left[\frac{r_{12} + r_{234}e^{(2i\beta_2)}}{1 + r_{12}r_{234}e^{(2i\beta_2)}} \right] \quad \text{--- (ก.20)}$$

$$\beta_2 = \frac{2\pi d_2 N_2}{\lambda} \quad \text{--- (ก.21)}$$

โดยรูปที่ ก.6 แสดงถึงรูปที่ ก.4 หลังจากการยุบรวมของชั้นตัวกลางที่ 2 และ 3, 4



รูปที่ ก.6 แบบจำลองการวัด Flying height หลังจากยุบรวมชั้นตัวกลางที่ 2 และ 3, 4

หลังจากนั้นทำการยุบรวมชั้นของตัวกลางที่ 1 (ซิลิกอน) และ 2, 3, 4 ซึ่งสามารถคำนวณแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงของฟิล์มชั้นที่ 1 กับ 2, 3, 4 และการเปลี่ยนแปลงของเฟสของแสงเมื่อเดินทางผ่านชั้นตัวกลางที่ 1 ได้ดังนี้

$$r_{01234} = \left[\frac{r_{01} + r_{1234}e^{(2i\beta_1)}}{1 + r_{01}r_{1234}e^{(2i\beta_1)}} \right] \quad \text{--- (ก.22)}$$

$$\beta_1 = \frac{2\pi d_1 N_1}{\lambda} \quad \text{--- (ก.23)}$$

โดยรูปที่ ก.7 แสดงถึงรูปที่ ก.4 หลังจากการยุบรวมของชั้นตัวกลางที่ 1 และ 2, 3, 4 โดยที่ r_{01234} คือแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงทั้งหมดที่สะท้อนออกมาจากแบบจำลองการวัด Flying height



รูปที่ ก.7 แบบจำลองการวัด Flying height หลังจากยุบรวมชั้นตัวกลางที่ 1 และ 2, 3, 4

ซึ่งสามารถคำนวณอัตราส่วนความเข้มแสงทั้งหมดที่สะท้อนออกมาจากแบบจำลองได้ดังนี้

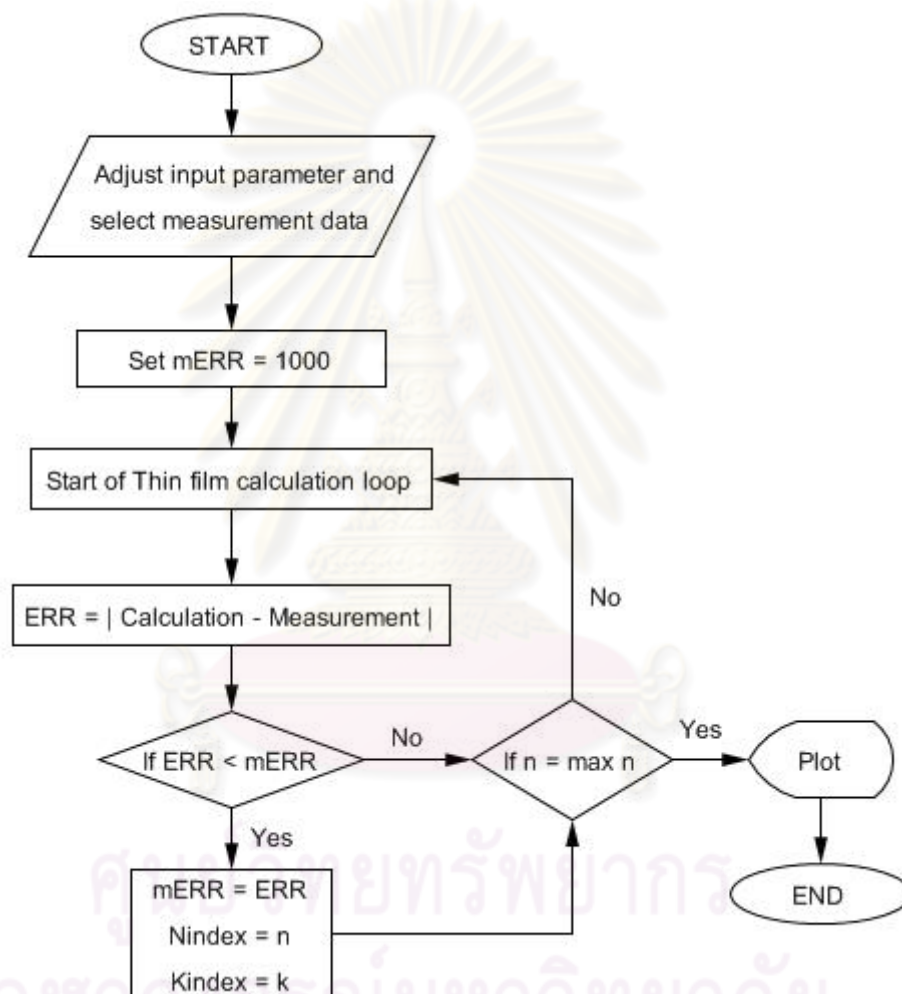
$$\frac{I_s}{I_0} = \left| \frac{E_s}{E_0} \right|^2 = |r_{01234}|^2 \quad \text{--- (ก.24)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ชุดคำสั่งของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้ Matlab เพื่อใช้ในการคำนวณ

ข.1 โปรแกรมเพื่อ Fitting หาค่าดรรชนีหักเหของดิสก์จากค่าความเข้มแสงที่ได้จากการวัด



รูปที่ ข.1 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.1

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BEGIN PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
%===== INPUT PARAMETERS =====

fh = [0e-9:1e-9:500e-9];           % Flying height (Air gap)
d = 15e-9;                         % DLC thickness
L = [650e-9];                      % Wave length Red 650, green
                                     % 550, blue 450
Mode = [2];                         % Measurement condition 1:glass
                                     % disk ,2:Si 1nm disk ,3:Si 5nm

MEA = 2;                            % USE data from which measurement
FT_ON = 0;                          % Fitting loop ON = 1, OFF = 0
FT_S = 1;                           % Fit start and stop
FT_ST = 4;
PLD = 200;                          % PLOT display to this FH
SHF = 0;                            % Amount of FH shift of each point, minimum
                                     % value can't lower than -19

NS = 1.2;                           % N initial
NF = 5;                             % N final
KS = 0;                             % K initial
KF = 0.02;                          % K final
ST = 0.01;                          % Step to vary nc and kc for iteration loop
%=====

mERR = 1000;
Iter = 0;
if L == 450e-9
    Ng = 1.54+0.02i;                 % Glass
    Ns = 3.926+1.404i;               % Si amorphous
    Nd = 2.169+0.2087i;              % DLC
    Na = 1;                          % Air
    Nh = 2.39+0.432i;                % ALTiC
    if Mode == 1
        PT2(1) = 1028.6;
        PT2(2) = 1516;
        PT2(3) = 1942.85;
        PT2(4) = 2246.965;
        %=====
        PT2_min(1) = 742;
        PT2_min(2) = 721;
        PT2_min(3) = 733;
        PT2_min(4) = 718;
        %=====
        PT2_max(1) = 2406;
        PT2_max(2) = 2313;
        PT2_max(3) = 2414;
        PT2_max(4) = 2403;
    elseif Mode == 2
        PT2(1) = 548.465;
        PT2(2) = 873.253;
        PT2(3) = 1300.223;
        PT2(4) = 1708.532;
        %=====
        PT2_min(1) = 582;
        PT2_min(2) = 576;
        PT2_min(3) = 555;
        PT2_min(4) = 516;
        %=====
        PT2_max(1) = 2268;
        PT2_max(2) = 2188;
        PT2_max(3) = 2265;
    end
end

```



```

        PT2_max(4) = 2264;
elseif Mode == 3
    PT2(1) = 318.363;
    PT2(2) = 584.634;
    PT2(3) = 875.948;
    PT2(4) = 1143.104;

    %=====
    PT2_min(1) = 336;
    PT2_min(2) = 341;
    PT2_min(3) = 317;
    PT2_min(4) = 309;

    %=====
    PT2_max(1) = 1595;
    PT2_max(2) = 1567;
    PT2_max(3) = 1604;
    PT2_max(4) = 1595;
end
elseif L == 550e-9
    Ng = 1.51+0.01i;           % Glass
    Ns = 3.789+0.951i;        % Si amorphous
    Nd = 2.1699+0.1416i;     % DLC
    Na = 1;                   % Air
    Nh = 2.354+0.363i;       % AlTiC
    if Mode == 1
        PT2(1) = 926.152;
        PT2(2) = 1268;
        PT2(3) = 1612.227;
        PT2(4) = 1910.342;

        %=====
        PT2_min(1) = 736;
        PT2_min(2) = 717;
        PT2_min(3) = 724;
        PT2_min(4) = 717;

        %=====
        PT2_max(1) = 2250;
        PT2_max(2) = 2174;
        PT2_max(3) = 2261;
        PT2_max(4) = 2257;
    elseif Mode == 2
        PT2(1) = 603.834;
        PT2(2) = 834.358;
        PT2(3) = 1171.059;
        PT2(4) = 1533.226;

        %=====
        PT2_min(1) = 635;
        PT2_min(2) = 616;
        PT2_min(3) = 615;
        PT2_min(4) = 604;

        %=====
        PT2_max(1) = 2255;
        PT2_max(2) = 2186;
        PT2_max(3) = 2259;
        PT2_max(4) = 2255;
    elseif Mode == 3
        PT2(1) = 237.783;
        PT2(2) = 446.363;
        PT2(3) = 726.075;
        PT2(4) = 1007.907;

        %=====
        PT2_min(1) = 279;
        PT2_min(2) = 278;

```

```

        PT2_min(3) = 256;
        PT2_min(4) = 250;
%=====
        PT2_max(1) = 1578;
        PT2_max(2) = 1569;
        PT2_max(3) = 1598;
        PT2_max(4) = 1596;
    end
elseif L == 650e-9
    Ng = 1.52; % Glass
    Ns = 3.711+0.7261i; % Si amorphous
    Nd = 2.1631+0.0985i; % DLC
    Na = 1; % Air
    Nh = 2.289+0.344i; % AlTiC
    if Mode == 1
        PT2(1) = 907.842;
        PT2(2) = 1250.883;
        PT2(3) = 1625.133;
        PT2(4) = 1984.017;
%=====
        PT2_min(1) = 727;
        PT2_min(2) = 689;
        PT2_min(3) = 710;
        PT2_min(4) = 699;
%=====
        PT2_max(1) = 2639;
        PT2_max(2) = 2542;
        PT2_max(3) = 2643;
        PT2_max(4) = 2640;
    elseif Mode == 2
        PT2(1) = 598.335;
        PT2(2) = 830.244;
        PT2(3) = 1181.986;
        PT2(4) = 1594.638;
%=====
        PT2_min(1) = 628;
        PT2_min(2) = 599;
        PT2_min(3) = 610;
        PT2_min(4) = 592;
%=====
        PT2_max(1) = 2725;
        PT2_max(2) = 2637;
        PT2_max(3) = 2728;
        PT2_max(4) = 2735;
    elseif Mode == 3
        PT2(1) = 214.815;
        PT2(2) = 391.986;
        PT2(3) = 687.532;
        PT2(4) = 1026.384;
%=====
        PT2_min(1) = 250;
        PT2_min(2) = 246;
        PT2_min(3) = 246;
        PT2_min(4) = 234;
%=====
        PT2_max(1) = 1971;
        PT2_max(2) = 1952;
        PT2_max(3) = 1981;
        PT2_max(4) = 1980;
    end
end
end

```

```

%----- DEFINE FILM THICKNESS AND FH FROM MEASUREMENT
if Mode == 1
    fhm2(1) = 19.79;           % FH from measurement of each point
    fhm2(2) = 43.6;
    fhm2(3) = 61.99;
    fhm2(4) = 81.98;
    TXT = 'Glass';
elseif Mode == 2
    T = 1e-9;                 % Si thickness
    fhm2(1) = 19.79;
    fhm2(2) = 43.6;
    fhm2(3) = 61.99;
    fhm2(4) = 81.98;
    TXT = 'Si 1nm';
elseif Mode == 3
    T = 5e-9;                 % Si thickness
    fhm2(1) = 19.79;
    fhm2(2) = 43.6;
    fhm2(3) = 61.99;
    fhm2(4) = 81.98;
    TXT = 'Si 5nm';
end
for Nc = NS:ST:Nf
    for Kc = KS:ST:KF
        Iter = Iter+1;
        nc = [complex(Nc,Kc), % refractive index of composite
              1, % which iterated(Nc,Kc)
              Nh]; % refractive index of air
              % refractive index of AlTiC
%=====
%=====      ASSIGN Rij,Tij      =====
%=====
        for u = 1:length(nc)
            for v = 1:length(nc)
                rco(u,v) = (nc(u)-nc(v))/(nc(u)+nc(v));
                tco(u,v) = 2*nc(u)/(nc(u)+nc(v));
            end
        end
%=====
%=====      DEFINE 1st composite layer      =====
%=====
%-----COMP-----1
%-----Air-----2
%-----AlTiC-----3
        Rdm = rco(1,2); % Beam which reflect from middle layer
        Rdb = rco(2,3); % Beam which reflect from bottom layer
        for u = 1:length(fh)
            Bc(u) = (2*pi*fh(u)*nc(2))/L;
            RC(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*Bc(u))))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*Bc(u))));
            AmpC(u,1) = abs(RC(u,1))^2;
            PhsC(u,1) = angle(RC(u,1));
        end
%=====
%=====      NORMALIZED INTENSITY TO 0-2      =====
%=====
        AmpC_N = AmpC-min(AmpC);
        m_CN = 2/max(AmpC_N);
        AmpC_N2 = AmpC_N.*m_CN;
%=====
%=====      MEASUREMENT LOOP      =====

```

```

%=====
% Use intensity from measurement from each case to re-plot FH
if MEA == 1
    PT = PT1;
    PT_min = PT1_min;
    PT_max = PT1_max;
    fhm = fhm1+SHF;
    MTXT = '1st';
elseif MEA == 2
    PT = PT2;
    PT_min = PT2_min;
    PT_max = PT2_max;
    fhm = fhm2+SHF;
    MTXT = '2nd';
elseif MEA == 3
    PT = PT3;
    PT_min = PT3_min;
    PT_max = PT3_max;
    fhm = fhm3+SHF;
    MTXT = '3rd';
elseif MEA == 0
    ac1 = 0;
    %==== Merge data from 1&2 measurement ====
    for a1 = 1:length(fhm1)
        fhmd(a1,1) = fhm1(a1);
        PTd(a1,1) = PT1(a1);
        PTd_min(a1,1) = PT1_min(a1);
        PTd_max(a1,1) = PT1_max(a1);
    end
    for a2 = length(fhm1)+1:length(fhm1)+length(fhm2)
        ac1 = ac1+1;
        fhmd(a2,1) = fhm2(ac1);
        PTd(a2,1) = PT2(ac1);
        PTd_min(a2,1) = PT2_min(ac1);
        PTd_max(a2,1) = PT2_max(ac1);
    end
    %=====
    %=== Sort intensity data by assending fh ===
    fhmdS = sort(fhmd);
    for as = 1:length(fhmd)
        for as2 = 1:length(fhmd)
            if fhmdS(as) == fhmd(as2)
                A_index(as,1) = as2;
            end
        end
    end
    %==== Define all necessary input parameters ====
    for Is = 1:length(fhmd)
        PT(Is,1) = PTd(A_index(Is));
        PT_min(Is,1) = PTd_min(A_index(Is));
        PT_max(Is,1) = PTd_max(A_index(Is));
    end
    fhm = fhmdS+SHF;
    MTXT = 'ALL';
end
for m = 1:length(fhm)
    IP(m) = ((PT(m)-PT_min(m))/(PT_max(m)-PT_min(m)))*2;
    if IP(m) < 0
        IP(m) = 0;
    end
end
end

```

```

    if FT_ON == 0
        break, end
    %=====
    %===== FITTING LOOP =====
    %=====
    % Fit N&K which its intensity give nearest FH to measurement data
    CT = 0;
    Cf = 0;
    for u = FT_S:FT_ST
        CT = CT+1;
        mI = 200;
        for v = 1:round(max(fhm))+1+5
            Cf = Cf+1;
            fERR(Cf,1) = abs(AmpC_N2(v)-IP(u));
            if fERR(Cf,1)<mI
                mI = fERR(Cf,1);
                fhC = v-1;
            end
        end
        FHC(CT) = fhC; % Find the FH of each intensity which
nearest to measured intensity
    end
    Sfhm = size(fhm(FT_S:FT_ST));
    SFHC = size(FHC);
    if Sfhm(1,1) ~= SFHC(1,1)
        FHC = FHC';
    end
    ERR(Iter,1) = sum((fhm(FT_S:FT_ST)-FHC).^2);
    if ERR(Iter)< mERR
        mERR = ERR(Iter);
        Nindex = Nc;
        Kindex = Kc;
        FHC2 = FHC;
    end
end
end
if FT_ON == 1
    %=====
    %===== FOR PLOT =====
    %=====
    np = [complex(Nindex,Kindex), % refractive index of composite
        1, % which iterated (Nc,Kc)
        Nh]; % refractive index of air
        % refractive index of AlTiC
    %=====
    %===== ASSIGN Rij,Tij =====
    %=====
    for u = 1:length(np)
        for v = 1:length(np)
            rcp(u,v) = (np(u)-np(v))/(np(u)+np(v));
            tcp(u,v) = 2*np(u)/(np(u)+np(v));
        end
    end
    %=====
    %===== DEFINE 1st composite layer =====
    %=====
    %----COMP-----1
    %----Air-----2
    %----AlTiC-----3
    Rdm = rcp(1,2); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rcp(2,3); % Beam which reflect from bottom layer

```

```

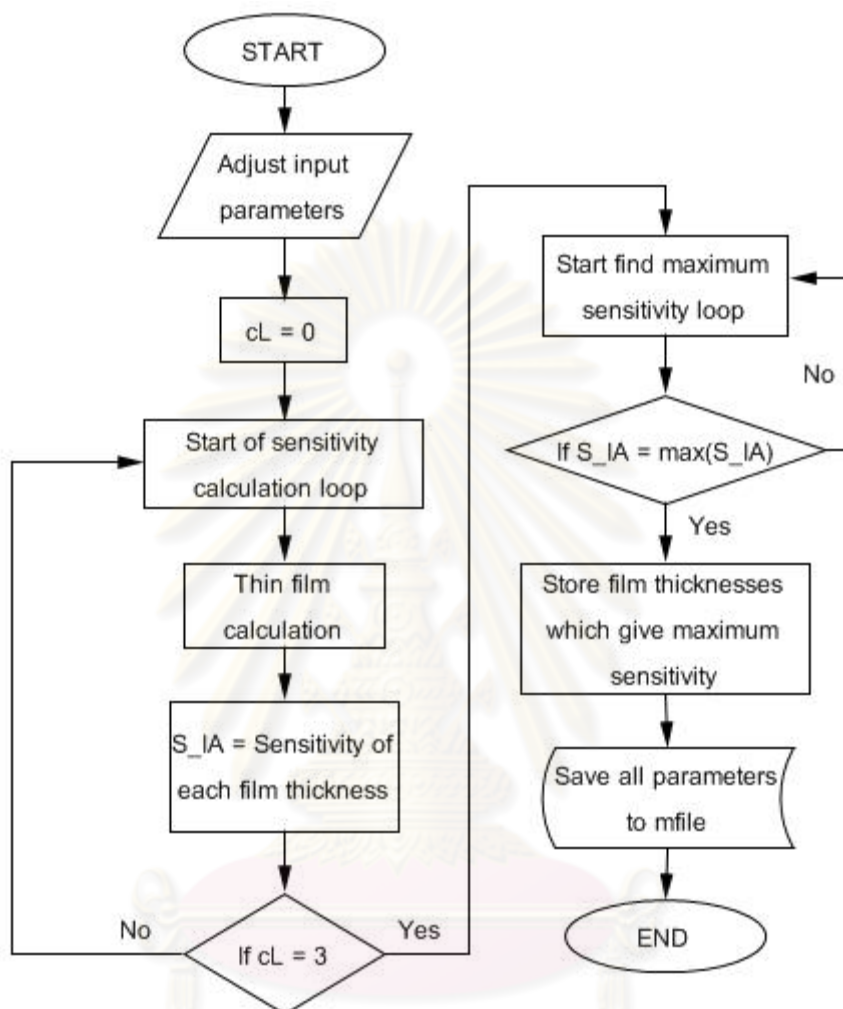
    for u = 1:length(fh)
        Bp(u) = (2*pi*fh(u)*np(2))/L;
        Rp(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*Bp(u)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*Bp(u)))));
        AmpP(u,1) = abs(Rp(u,1))^2;
        PhsP(u,1) = angle(Rp(u,1));
    end
%=====
%=====      NORMALIZED INTENSITY TO 0-2      =====
%=====
    AmpP_N = AmpP-min(AmpP);
    m_PN = 2/max(AmpP_N);
    AmpP_N2 = AmpP_N.*m_PN;
%=====
    if L == 450e-9
        Co = 'b';
        Co2 = 'b*';
    elseif L == 550e-9
        Co = 'g';
        Co2 = 'g*';
    elseif L == 650e-9
        Co = 'r';
        Co2 = 'r*';
    end
    plot(fh(1:PLD).*10^9,AmpP_N2(1:PLD),Co,fhm,IP,Co2)
    legend(['n = ',num2str(Nindex),'k = ',num2str(Kindex)])
    title(['Fitting of ',TXT,' disk with ',MTXT,' measurement data with
point ',num2str(FT_S),' to ',num2str(FT_ST),])
    ylabel('Intensity ratio')
    xlabel('FH(nm)')
    grid on
    grid minor
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 โปรแกรมเพื่อ **Optimize sensitivity** โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ DLC



รูปที่ ข.2 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BEGIN PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
%=====
%===== INPUT PARAMETERS =====
%=====
fh = [0e-9:1e-9:400e-9];           % Flying height (Air gap)
T1 = [0e-9:0.5e-9:2e-9];         % 1st SiO2 thickness
d1 = [45e-9:1e-9:65e-9];         % 1st DLC thickness
T2 = [2e-9:0.5e-9:4e-9];         % SiO2 thickness
d2 = [15e-9:1e-9:35e-9];         % 2nd DLC thickness
WL = [450e-9,550e-9,650e-9];     % Wave length 650/550/450e-9
                                   % only are allowed

Add_layer = 'Si';
%=====
%===== LAYER =====
%=====
cL = 0;
MX = 0;
for iL = 1:length(WL)
    L = WL(iL);
    cL = cL+1;    % Define loop number
    cs = 0;
    if L == 450e-9
        Ng = 1.54+0.02i;           % Glass
        Ns = 4.419+1.328i;         % Si amorphous
        Nso = 1.465;               % SiO2
        Nal = 1.78;                % Al2O3
        Nd = 2.169+0.2087i;        % DLC
        Na = 1;                    % Air
        Nh = 2.39+0.432i;          % AlTiC
    elseif L == 550e-9
        Ng = 1.51+0.01i;           % Glass
        Ns = 4.232+0.634i;         % Si amorphous
        Nso = 1.459;               % SiO2
        Nal = 1.77;                % Al2O3
        Nd = 2.1699+0.1416i;       % DLC
        Na = 1;                    % Air
        Nh = 2.354+0.363i;         % AlTiC
    elseif L == 650e-9
        Ng = 1.52;                 % Glass
        Ns = 4.014+0.309i;         % Si amorphous
        Nso = 1.456;               % SiO2
        Nal = 1.765;               % Al2O3
        Nd = 2.1631+0.0985i;       % DLC
        Na = 1;                    % Air
        Nh = 2.289+0.344i;         % AlTiC
    end
    %----GLASS-----1
    %----SiO2-----2
    %----DLC1-----3
    %----SiO2-----4
    %----DLC2-----5
    %----Air-----6
    %----AlTiC-----7
    if Add_layer == 'S'
        n = [Ng,           % Glass
             Nso,          % SiO2 (T1)
             Nd,           % DLC 1
             Nso,          % SiO2 (T2)
             Nd,           % DLC 2

```



```

        Na,      % Air
        Nh];    % AlTiC
elseif Add_layer == 'A'
    n = [Ng,    % Glass
        Na1,   % Al2O3_1
        Nd,    % DLC 1
        Na1,   % Al2O3_2
        Nd,    % DLC 2
        Na,    % Air
        Nh];   % AlTiC
elseif Add_layer == 'Si'
    n = [Ng,    % Glass
        Ns,    % Si1
        Nd,    % DLC 1
        Ns,    % Si2
        Nd,    % DLC 2
        Na,    % Air
        Nh];   % AlTiC
end
=====
=====          ASSIGN Rij,Tij          =====
=====
for u = 1:length(n)
    for v = 1:length(n)
        r(u,v) = (n(u)-n(v))/(n(u)+n(v));
        t(u,v) = 2*n(u)/(n(u)+n(v));
    end
end
c= 0;
cd = 0;
for z = 1:length(T1)
    for x = 1:length(d1)
        for w = 1:length(T2)
            for v = 1:length(d2)
                for u = 1:length(fh)
=====
=====          DEFINE 1st composite layer          =====
=====
%----DLC2-----5
%----Air-----6
%----AlTiC-----7
Rdm = r(5,6); % Beam which reflect from middle layer
Rdb = r(6,7); % Beam which reflect from bottom layer
B(u) = (2*pi*fh(u)*n(6))/L; % BETA, Below r of composite 1
rc1(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*B(u)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*B(u)))));
=====
=====          DEFINE 2nd composite layer          =====
=====
%----SiO2-----4
%----DLC2-----5
%----COMP1-----rc1
A(v,1) = (2*pi*d2(v)*n(5))/L; % ALPHA, Below r of material
Rdm = r(4,5); % Beam which reflect from middle layer
Rdb = rc1(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
rc2(v,u) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*A(v,1)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*A(v,1)))));
=====
=====          DEFINE 3rd composite layer          =====
=====
%----DLC1-----3
%----SiO2-----4
%----COMP2-----rc2

```

```

G(w,1) = (2*pi*T2(w)*n(4))/L; % ALPHA, Below r of material
Rdm = r(3,4); % Beam which reflect from middle layer
Rdb = rc2(v,u); % Beam which reflect from bottom layer
rc3(w,v,u) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*G(w,1)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*G(w,1))));
%=====
%----- DEFINE 4th composite layer -----
%=====
%-----Glass-----2
%-----DLC1-----3
%-----COMP3-----rc3
O(x,1) = (2*pi*d1(x)*n(3))/L; % ALPHA, Below r of material
Rdm = r(2,3); % Beam which reflect from middle layer
Rdb = rc3(w,v,u); % Beam which reflect from bottom layer
rc4(x,w,v,u) =
(Rdm+Rdb*(exp(2*i*O(x,1)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*O(x,1))));
%=====
%----- DEFINE 5th composite layer -----
%=====
%-----Glass-----1
%-----SiO2-----2
%-----COMP4-----rc4
AL = (2*pi*T1(z)*n(2))/L; % ALPHA, Below r of material
Rdm = r(1,2); % Beam which reflect from middle layer
Rdb = rc4(x,w,v,u); % Beam which reflect from bottom layer
rc5(z,x,w,v,u) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*AL)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*AL)));
Amp(z,x,w,v,u) = abs(rc5(z,x,w,v,u))^2;
Phs(z,x,w,v,u) = angle(rc5(z,x,w,v,u));
if u == length(fh)
AmpN(z,x,w,v,:) = Amp(z,x,w,v,:)-min(Amp(z,x,w,v,:));
mN = 2/max(AmpN(z,x,w,v,:));
AmpN2(z,x,w,v,:) = AmpN(z,x,w,v,:).*mN;
%=====
%===== SENSITIVITY =====
%=====
cs = cs+1;
S_arr1 = [1,10,20,30,40,50];
S_arr2 = [2,12,22,32,42,52];
DS_I = AmpN2(z,x,w,v,S_arr2)-AmpN2(z,x,w,v,S_arr1);
% Dummy to store first rc3, cal from 1st value of FH
S_I(cs,cL) = sum(DS_I);
if cL == 1
Mt_index(cs,1) = z; % 1st SiO2 layer
Mt_index(cs,2) = x; % 1st DLC layer
Mt_index(cs,3) = w; % 2nd SiO2 layer
Mt_index(cs,4) = v; % 2nd DLC layer
end
end
end
end
end
end
end
end
%=====
%===== STORE SENSITIVITY OF EACH WAVELENGTH =====
%=====
if cL == 1
AmpB = AmpN2;
S_I1 = S_I(:,cL);
elseif cL == 2
AmpG = AmpN2;
S_I2 = S_I(:,cL);

```

```

elseif cL == 3
    AmpR = AmpN2;
    S_I3 = S_I(:,cL);
end
end
end
%=====
%=====          END CALCULATION LOOP          =====
%=====
%===== POST PROCESSING LOOP =====
S_IA = S_I1+S_I2+S_I3;
for xs = 1:cs
    if S_IA(xs) == max(S_IA)
        MX = MX+1;
        M_index(MX) = xs;
    end
end
end
for i = 1:length(M_index)
    SiO1(i) = Mt_index(M_index(i),1);
    DLC1(i) = Mt_index(M_index(i),2);
    SiO2(i) = Mt_index(M_index(i),3);
    DLC2(i) = Mt_index(M_index(i),4);

    DLC1_T(i) = d1(DLC1(i))*10^9;
    SiO1_T(i) = T1(SiO1(i))*10^9;
    DLC2_T(i) = d2(DLC2(i))*10^9;
    SiO2_T(i) = T2(SiO2(i))*10^9;
end

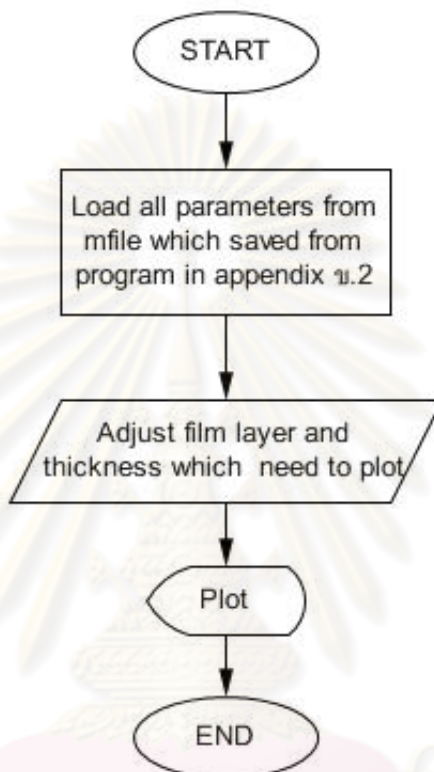
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.3 โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ Sensitivity ที่ได้จากโปรแกรม ข.2 (ต้องทำการ Run โปรแกรม ข.2 ก่อน)

สามารถ Run โปรแกรม ข.2 และบันทึกผลของโปรแกรมไว้ก่อนและนำผลมาเรียกใช้กับ โปรแกรม ข.3 เพื่อวิเคราะห์ Sensitivity ในการวัด Flying height ในช่วงความหนาที่ต้องการ



รูปที่ ข.3 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.3

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BEGIN PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% NEED TO RUN TEST_SENSE_2.m first
clear S_IAT i j F1 F2 X Y TF TF_L

FX = '24'; % Fix film thickness for plot, first digit
          % is 1st fixed layer where
          % the second digit define the 2nd fixed
          % layer
T_FX = 55; % Thickness of layer FX which fixed,
          % this value must not exceed range of
          % thickness of array above

T_FX2 = 25;
PLC = 2;
PLD = 400;
DLC1_T; % Real thickness DLC, SiO2 and DLC which
          % has highest sensitivity

SiO2_T;
DLC2_T;
Plus1 = 0;
Plus2 = 0;
  
```

```

for u = 1:length(fh)
    AmpBP(u,1) = AmpB(SiO1,DLC1,SiO2,DLC2,u);
    AmpGP(u,1) = AmpG(SiO1,DLC1,SiO2,DLC2,u);
    AmpRP(u,1) = AmpR(SiO1,DLC1,SiO2,DLC2,u);
end
%----Glass-----1
%----Air-----2
%----AlTiC-----3
for iL = 1:length(WL)
    L = WL(iL);
    cL = cL+1; % Define loop number
    if L == 450e-9
        Ng = 1.54+0.02i; % Glass
        Ns = 4.419+1.328i; % Si amorphous
        Nso = 1.465; % SiO2
        Nal = 1.78; % Al2O3
        Nd = 2.169+0.2087i; % DLC
        Na = 1; % Air
        Nh = 2.39+0.432i; % AlTiC
    elseif L == 550e-9
        Ng = 1.51+0.01i; % Glass
        Ns = 4.232+0.634i; % Si amorphous
        Nso = 1.459; % SiO2
        Nal = 1.77; % Al2O3
        Nd = 2.1699+0.1416i; % DLC
        Na = 1; % Air
        Nh = 2.354+0.363i; % AlTiC
    elseif L == 650e-9
        Ng = 1.52; % Glass
        Ns = 4.014+0.309i; % Si amorphous
        Nso = 1.456; % SiO2
        Nal = 1.765; % Al2O3
        Nd = 2.1631+0.0985i; % DLC
        Na = 1; % Air
        Nh = 2.289+0.344i; % AlTiC
    end
    ng = [Ng, % Glass
        Na, % Air
        Nh]; % AlTiC
    for u = 1:length(ng)
        for v = 1:length(ng)
            rg(u,v) = (ng(u)-ng(v))/(ng(u)+ng(v));
            tg(u,v) = 2*ng(u)/(ng(u)+ng(v));
        end
    end
    end
    for u = 1:length(fh)
        Rdm = rg(1,2); % Beam which reflect from middle layer
        Rdb = rg(2,3); % Beam which reflect from bottom layer
        Bg(u) = (2*pi*fh(u)*ng(2))/L; % BETA, Below r of composite model
        Rg(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*Bg(u))))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*Bg(u))));
        % Light reflect from composite model
        Ampg(u,1) = abs(Rg(u,1))^2;
        Phsg(u,1) = angle(Rg(u,1));
    end
    AmpgN = Ampg-min(Ampg);
    mgN = 2/max(AmpgN);
    AmpgN2 = AmpgN.*mgN;
    if L == 450e-9
        AMPG_NB = AmpgN2;
    elseif L == 550e-9
        AMPG_NG = AmpgN2;
    end
end

```

```

elseif L == 650e-9
    AMPG_NR = AmpgN2;
end
end
if PLC == 2
    switch FX
        case '24'
            FX1 = 2;
            FX2 = 4;
            F1 = length(T1);
            F2 = length(T2);
            X = T1.*10^9;
            Y = T2.*10^9;
            TF1 = d1.*10^9;
            TF2 = d2.*10^9;
            TXT = [Add_layer, ' 1st layer'];
            YTXT = [Add_layer, ' 2nd layer'];
            TTXT = ['Sensitivity: fixed DLC 1st at
', num2str(T_FX), ' nm and 2nd layer at ', num2str(T_FX2), ' nm'];
        case '13'
            FX1 = 1;
            FX2 = 3;
            F1 = length(d1);
            F2 = length(d2);
            X = d1.*10^9;
            Y = d2.*10^9;
            TF1 = T1.*10^9;
            TF2 = T2.*10^9;
            TXT = 'DLC 1st layer';
            YTXT = 'DLC 2nd layer';
            TTXT = ['Sensitivity: fixed ', Add_layer, ' 1st at
', num2str(T_FX), ' nm and 2nd layer at ', num2str(T_FX2), ' nm'];
        case '34'
            FX1 = 3;
            FX2 = 4;
            F1 = length(T1);
            F2 = length(d1);
            X = T1.*10^9;
            Y = d1.*10^9;
            TF1 = T2.*10^9;
            TF2 = d2.*10^9;
            TXT = [Add_layer, ' 1st layer'];
            YTXT = 'DLC 1st layer';
            TTXT = ['Sensitivity: fixed ', Add_layer, ' 1st at
', num2str(T_FX), ' nm and 1st DLC layer at ', num2str(T_FX2), ' nm'];
        end
        sT_FX = num2str(T_FX);
        fsT_FX = findstr(sT_FX, '.');
        sT_FX2 = num2str(T_FX2);
        fsT_FX2 = findstr(sT_FX2, '.');
        if fsT_FX > 0
            T_FX = T_FX*100;
            TF1 = TF1.*100;
            Plus1 = 1;
        end
        if fsT_FX2 > 0
            T_FX2 = T_FX2*100;
            TF2 = TF2.*100;
            Plus2 = 1;
        end
        end
        for i = 1:length(TF1)

```

```

        if round(T_FX) == round(TF1(i))
            TF_L = i;
        end
    end
end
for i = 1:length(TF2)
    if round(T_FX2) == round(TF2(i))
        TF_L2 = i;
    end
end
end
if Plus1 == 1;
    T_FX = T_FX/100;
    TF1 = TF1./100;
end
if Plus2 == 1;
    T_FX2 = T_FX2/100;
    TF2 = TF2./100;
end
ck = 0;
for i = 1:cs
    if Mt_index(i,FX1) == TF_L && Mt_index(i,FX2) == TF_L2
        ck = ck+1;
        T_index(ck,1) = i;
    end
end
ck2 = 0;
for i = 1:F1
    for j = 1:F2
        ck2 = ck2+1;
        S_IAT(i,j) = S_IA(T_index(ck2));
    end
end
S_IAP = ((S_IA-0.6013)./0.6013).*100;
S_IAT = ((S_IAT-0.6013)./0.6013).*100;

for i = 1:F1
    for j = 1:F2
        if S_IAT(i,j) < 0
            S_IAT(i,j) = 0;
        end
    end
end

for i = 1:F1
    for j = 1:F2
        if S_IAT(i,j) == max(max(S_IAT))
            XM = X(i);
            YM = Y(j);
        end
    end
end
contourf(X,Y,S_IAT',20)
colorbar
grid minor
title(TTXT)
xlabel(XTXT)
ylabel(YTXT)
hold on
plot(XM,YM,'-
mo','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','w','MarkerFaceColor','b','marker
size',6);

```

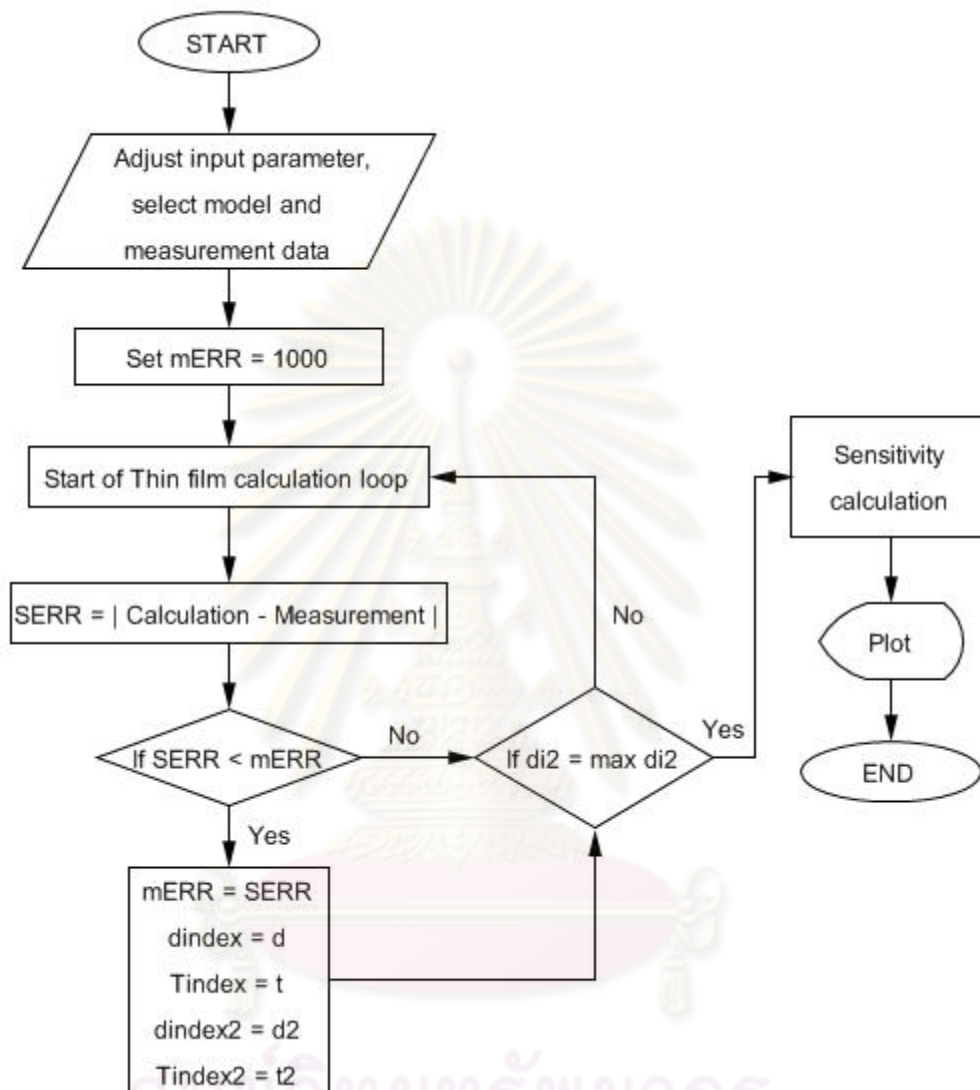
```
text(XM, YM-((Y(2)-Y(1))), ['\fontsize{13}\bf\color{white} S =  
' , num2str(max(max(S_IAT)))] , ' at (' , num2str(XM) , ',' , num2str(YM) , ')')  
hold on  
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.4 โปรแกรมเพื่อ Fitting ความเข้มแสงที่ได้จากการวัดเพื่อหาความหนาของฟิล์ม และ
คำนวณ Sensitivity ที่ได้จากความหนา



รูปที่ ข.4 Flowchart ของโปรแกรมที่ ข.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BEGIN PROGRAM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
%===== INPUT PARAMETERS =====
fh = [0e-9:1e-9:500e-9];           % Flying height (Air gap)
WL = [450e-9, 550e-9, 650e-9];    % Wave length Red 650, green 550,
                                   % blue 450
Mode = 1;                          % Measurement condition 1: AVG data
                                   % of Si1/DLC77 (3Layers)
                                   % 2: AVG data of 5Layers disk

FT_ON = 1;                          % Fitting loop ON = 1, OFF = 0
FT_S = 1;                          % Fit start and stop
FT_ST = 4;

PLD = 100;                          % PLOT display to this FH
SHF = 0;                          % Amount of FH shift of each point, minimum
                                   % value can't lower than -19

DS1 = [60,80];                      % Thickness range of DLC1
DS2 = [21,29];                      % Thickness range of DLC2
SS1 = [0.5,1.2];                    % Thickness range of Si1
SS2 = [2.5,3.5];                    % Thickness range of Si2

SD = 1;                             % Step to vary DLC thickness for iteration loop
ST = 0.01;                          % Step to vary Si thickness for iteration loop
SC = 20;                            % Sensitivity cal Only 20 and 50 can be input
%=====
%=====
%===== DEFINE RELATION =====
%=====
if Mode == 1
    MEA = 1;
    DS2 = [1,1];
    SS2 = [1,1];
    fhm1(1) = 18.94;
    fhm1(2) = 44.6;
    fhm1(3) = 63;
    fhm1(4) = 83.2;
elseif Mode == 2
    MEA = 2;
    fhm2(1) = 16.09;
    fhm2(2) = 42.2;
    fhm2(3) = 60.6;
    fhm2(4) = 80.54;
end
%=====
%===== CALCULATION =====
%=====
mERR = 1000;
Iter = 0;
for di2 = DS2(1):SD:DS2(2)
    for Ti2 = SS2(1):ST:SS2(2)
        for di = DS1(1):SD:DS1(2)
            for Ti = SS1(1):ST:SS1(2)
                d = di*1e-9;
                T = Ti*1e-9;
                if Mode == 1
                    d2 = 0;

```



```

%=====
PT1_max(1) = 1378.4;
PT1_max(2) = 1378.4;
PT1_max(3) = 1378.6;
PT1_max(4) = 1387.6;
elseif Mode == 2
PT2(1) = 879.494;
PT2(2) = 1350.186;
PT2(3) = 1672.807;
PT2(4) = 1901.923;
%=====
PT2_min(1) = 434.6;
PT2_min(2) = 428.8;
PT2_min(3) = 406;
PT2_min(4) = 398.8;
%=====
PT2_max(1) = 2083;
PT2_max(2) = 2069;
PT2_max(3) = 2090;
PT2_max(4) = 2086.8;
end
elseif L == 650e-9
Ng = 1.52; % Glass
Ns = 4.014+0.309i; % Si amorphous
Nd = 2.1631+0.0985i; % DLC
Na = 1; % Air
Nh = 2.289+0.344i; % ALTiC
if Mode == 1
PT1(1) = 540.167;
PT1(2) = 947.603;
PT1(3) = 1262.077;
PT1(4) = 1532.146;
%=====
PT1_min(1) = 364;
PT1_min(2) = 338.6;
PT1_min(3) = 330.2;
PT1_min(4) = 317;
%=====
PT1_max(1) = 1961.6;
PT1_max(2) = 1979.2;
PT1_max(3) = 1971.2;
PT1_max(4) = 1980.4;
elseif Mode == 2
PT2(1) = 970.224;
PT2(2) = 1629.896;
PT2(3) = 2133.666;
PT2(4) = 2550.377;
%=====
PT2_min(1) = 572.4;
PT2_min(2) = 559.6;
PT2_min(3) = 517.8;
PT2_min(4) = 508.8;
%=====
PT2_max(1) = 3188.6;
PT2_max(2) = 3179.4;
PT2_max(3) = 3206.6;
PT2_max(4) = 3200.6;
end
end
%=====
%===== ASSIGN Rij,Tij %=====

```

```

%=====
n = [Ng,      % Glass
     Ns,      % Si
     Nd,      % DLC
     Ns,      % Si2
     Nd,      % DLC2
     Na,      % Air
     Nh];     % AlTiC
for u = 1:length(n)
    for v = 1:length(n)
        r(u,v) = (n(u)-n(v))/(n(u)+n(v));
        t(u,v) = 2*n(u)/(n(u)+n(v));
    end
end
end

%=====
%===== DEFINE 1st composite layer =====
%=====
%----DLC2----- 5
%----Air----- 6
%----AlTiC----- 7
for u = 1:length(fh)
    Rdm = r(5,6); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = r(6,7); % Beam which reflect from bottom layer
    B = (2*pi*fh(u)*n(6))/L; % BETA, Below r of composite 1
    rc1(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*B)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*B)));
%=====
%===== DEFINE 2nd composite layer =====
%=====
%--Add layer2-- 4
%----DLC2----- 5
%----COMP1-----rc1
    A = (2*pi*d2*n(5))/L; % ALPHA, Below r of material
    Rdm = r(4,5); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rc1(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
    rc2(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*A)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*A)));
%=====
%===== DEFINE 3rd composite layer =====
%=====
%----DLC1----- 3
%--Add layer2-- 4
%----COMP2-----rc2
    G = (2*pi*T2*n(4))/L; % ALPHA, Below r of material
    Rdm = r(3,4); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rc2(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
    rc3(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*G)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*G)));
%=====
%===== DEFINE 4th composite layer =====
%=====
%--Add layer1--2
%----DLC1-----3
%----COMP2-----rc3
    O = (2*pi*d*n(3))/L; % ALPHA, Below r of material
    Rdm = r(2,3); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rc3(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
    rc4(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*O)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*O)));
%=====
%===== DEFINE 5th composite layer =====
%=====
%----Glass-----1
%--Add layer1--2

```

```

%----COMP2-----rc4
    Q = (2*pi*T*n(2))/L; % ALPHA, Below r of material
    Rdm = r(1,2); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rc4(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
    rc5(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*Q)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*Q)));
    Amp(u,1) = abs(rc5(u,1))^2;
    Phs(u,1) = angle(rc5(u,1));

end

%=====
%===== NORMALIZED INTENSITY TO 0-2 =====
%=====
    AmpN = Amp-min(Amp);
    mN = 2/max(AmpN);
    AmpC_N2 = AmpN.*mN;

%=====
%===== MEASUREMENT LOOP =====
%=====
% Use intensity from measurement from each case to re-plot FH
    if MEA == 1
        PT = PT1;
        PT_min = PT1_min;
        PT_max = PT1_max;
        fhm = fhm1+SHF;
        MTXT = '1st';
    elseif MEA == 2
        PT = PT2;
        PT_min = PT2_min;
        PT_max = PT2_max;
        fhm = fhm2+SHF;
        MTXT = '2nd';
    elseif MEA == 0
        ac1 = 0;
        %==== Merge data from 1&2 measurement ===
        for a1 = 1:length(fhm1)
            fhmd(a1,1) = fhm1(a1);
            PTd(a1,1) = PT1(a1);
            PTd_min(a1,1) = PT1_min(a1);
            PTd_max(a1,1) = PT1_max(a1);
        end
        for a2 = length(fhm1)+1:length(fhm1)+length(fhm2)
            ac1 = ac1+1;
            fhmd(a2,1) = fhm2(ac1);
            PTd(a2,1) = PT2(ac1);
            PTd_min(a2,1) = PT2_min(ac1);
            PTd_max(a2,1) = PT2_max(ac1);
        end
        %=====
        %==== Sort intensity data by assending fh ====
        fhmdS = sort(fhmd);
        for as = 1:length(fhmd)
            for as2 = 1:length(fhmd)
                if fhmdS(as) == fhmd(as2)
                    A_index(as,1) = as2;
                end
            end
        end
        %==== Define all necessary input parameters ==
        for Is = 1:length(fhmd)
            PT(Is,1) = PTd(A_index(Is));
            PT_min(Is,1) = PTd_min(A_index(Is));
            PT_max(Is,1) = PTd_max(A_index(Is));
        end
    end
end

```

```

        end
        fhm = fhmdS+SHF;
        MTXT = 'ALL';
    end
    for m = 1:length(fhm)
        IP(m) = ((PT(m)-PT_min(m))/(PT_max(m)-PT_min(m)))*2;
        if IP(m) < 0
            IP(m) = 0;
        end
    end
    if FT_ON == 0
        break, end
%=====
%=====      FITTING LOOP      =====
%=====
% Fit N&K which its intensity give nearest FH to measurement data
CT = 0;
Cf = 0;
for u = FT_S:FT_ST
    CT = CT+1;
    mI = 200;
    for v = 1:round(max(fhm))+1+5
        Cf = Cf+1;
        fERR(Cf,1) = abs(AmpC_N2(v)-IP(u));
        if fERR(Cf,1)<mI
            mI = fERR(Cf,1);
            fhC = v-1;
        end
    end
    FHC(CT) = fhC; % Find the FH of each intensity which
nearest to measured intensity
end
Sfhm = size(fhm(FT_S:FT_ST));
SFHC = size(FHC);
if Sfhm(1,1) ~= SFHC(1,1)
    FHC = FHC';
end
ERR = sum((fhm(FT_S:FT_ST)-FHC).^2);
if LC == 1
    ERR1 = ERR;
    nb = n;
    IPB = IP;
elseif LC == 2
    ERR2 = ERR;
    ng = n;
    IPG = IP;
elseif LC == 3
    ERR3 = ERR;
    nr = n;
    IPR = IP;
end

end

SERR = ERR1+ERR2+ERR3;
if SERR< mERR
    mERR = SERR;
    Tindex = T;
    dindex = d;
    Tindex2 = T2;
    dindex2 = d2;
    FHC2 = FHC;

```



```

%=====
%===== DEFINE 4th composite layer =====
%=====
%--Add layer1--2
%-----DLC1-----3
%-----COMP2-----rc3
    O = (2*pi*dindex*n(3))/L; % ALPHA, Below r of material
    Rdm = r(2,3); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rc3(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
    rc4(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*O)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*O)));
%=====
%===== DEFINE 5th composite layer =====
%=====
%-----Glass-----1
%--Add layer1--2
%-----COMP2-----rc4
    Q = (2*pi*Tindex*n(2))/L; % ALPHA, Below r of material
    Rdm = r(1,2); % Beam which reflect from middle layer
    Rdb = rc4(u,1); % Beam which reflect from bottom layer
    rc5(u,1) = (Rdm+Rdb*(exp(2*i*Q)))/(1+Rdm*Rdb*(exp(2*i*Q)));
    Amp(u,1) = abs(rc5(u,1))^2;
    Phs(u,1) = angle(rc5(u,1));
end

%=====
%===== NORMALIZED INTENSITY TO 0-2 =====
%=====
    AmpN = Amp-min(Amp);
    mN = 2/max(AmpN);
    AmpP_N2 = AmpN.*mN;
    if L == 450e-9
        Cb = 'b';
        Cb2 = 'b*';
        AMPP_NB = AmpP_N2;
    elseif L == 550e-9
        Cg = 'g';
        Cg2 = 'g*';
        AMPP_NG = AmpP_N2;
    elseif L == 650e-9
        Cr = 'r';
        Cr2 = 'r*';
        AMPP_NR = AmpP_N2;
    end
end
if SC == 20
    S_arr1 = [1,10,20];
    S_arr2 = [2,12,22];
    GSEN = 0.1929;
elseif SC == 50
    S_arr1 = [1,10,20,30,40,50];
    S_arr2 = [2,12,22,32,42,52];
    GSEN = 0.6013;
end
SB = sum(abs(AMPP_NB(S_arr2)-AMPP_NB(S_arr1)));
SG = sum(abs(AMPP_NG(S_arr2)-AMPP_NG(S_arr1)));
SR = sum(abs(AMPP_NR(S_arr2)-AMPP_NR(S_arr1)));
SEN = SB+SG+SR;
SENP = ((SEN-GSEN)/GSEN)*100;
fh = fh.*10^9;
plot(fh(1:PLD), AMPP_NB(1:PLD), Cb, fhm, IPB, Cb2, fh(1:PLD), AMPP_NG(1:PLD)
, Cg, fhm, IPG, Cg2, fh(1:PLD), AMPP_NR(1:PLD), Cr, fhm, IPR, Cr2)
if Mode == 1

```

```

        legend(['DLC = ',num2str(dindex*10^9),' nm ' , 'Si =
',num2str(Tindex*10^9),' nm'])
elseif Mode == 2
        legend(['DLC1 = ',num2str(dindex*10^9),' nm, ' , 'Si1 =
',num2str(Tindex*10^9),' nm, DLC2 = ',num2str(dindex2*10^9),' nm, Si2
= ',num2str(Tindex2*10^9),' nm'])
end
ylabel('Normalized intensity')
xlabel('FH(nm)')
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% END PROGRAM %%%%%%%%%

```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกรกช เพชรดี เกิดเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2528 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศยาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยพัธพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย