

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



246257

การปรับประสิทธิภาพของงานเก็บและกระจายไว้ในกรณีวัดความชื้นของหัวถั่วฝักยาว  
โดยการเคลือบด้วยสารป้องกันเชื้อรา

นางนภกรกช เพชรดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๐ ๐๐๒ ๕๑๐๐๐



246257

การปรับปรุงความทนทานของงานแก้วและความไวในการวัดเพดานบินของหวานเขยน  
โดยการเคลือบด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร



นายกรกช เพชรดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 1 7 0 2 0 6 0 2 1

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

Mr.Korakoch Phetdee

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

การปรับปรุงความทนทานของงานแก้วและความไวใน  
การวัดเพดานบินของหัวอ่านเขียนโดยการเคลือบด้วย  
คาร์บอนคล้ำยเพชร

โดย

นายกรกช เพชรดี

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีสุวรรณิช

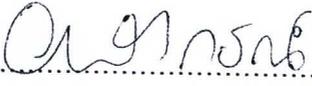
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

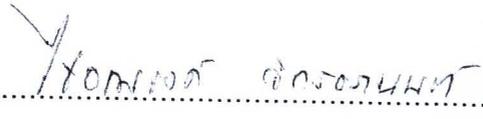
  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุนทีนี้ มณีรัตน์)

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

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

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์)

กรกช เพชรดี: การปรับปรุงความทนทานของจานแก้วและความไวในการวัดเพดานบินของหัวอ่านเขียนโดยการเคลือบด้วยคาร์บอนคล้ายเพชร. (IMPROVEMENT OF GLASS DISK DURABILITY AND SENSITIVITY IN FLYING HEIGHT MEASUREMENT BY DIAMOND-LIKE-CARBON COATING) อ.ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.วีระยุทธ ศรีธรรวานิช, 172 หน้า 246257

ในฮาร์ดดิสก์ เพดานบินของหัวอ่าน/เขียน (Flying height) หรือระยะห่างที่หัวอ่าน/เขียนบินเหนือแผ่นบันทึกแม่เหล็กได้ถูกออกแบบให้มีขนาดต่ำลงเรื่อยๆ ปัจจุบันมีขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตรเพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลได้หนาแน่นมากขึ้น โดยทั่วไปเพดานบินของหัวอ่าน/เขียนจะถูกวัดในเครื่องวัดเพดานบิน (Flying height tester) ซึ่งใช้หลักการแทรกสอดของแสงผ่านแผ่นจานแก้วใสที่มีความเรียบและตรงเป็นพิเศษ โดยในขณะที่ทำการวัดหัวอ่าน/เขียนจะเกิดการสัมผัสกับจานแก้วเป็นระยะๆซึ่งทำให้จานแก้วเกิดการสึกหรอได้ง่ายและมีอายุการใช้งานสั้นจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วนี้ค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) มีค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วนี้สูงถึง 2 ล้านบาทต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการเพิ่มความทนทานของจานแก้วโดยการเคลือบผิวจานแก้วด้วยวัสดุเคลือบแข็งประเภทคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC: Diamond-like-carbon) ซึ่งจะส่งผลให้อายุการใช้งานของจานแก้วเพิ่มขึ้นและทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วลงได้ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอการปรับปรุงความไว (Sensitivity) ในการวัดเพดานบินของหัวอ่าน/เขียนด้วยการปรับความหนาของชั้นเคลือบผิวบนดิสก์ที่พัฒนาขึ้น

การเคลือบผิวจานแก้วจะเริ่มจากการปลูกชั้นซิลิกอนเพื่อช่วยในการยึดเกาะแล้วตามด้วยชั้น DLC ด้วยวิธีการ Ion beam deposition จากการทดสอบการสึกหรอ (Wear test) ของดิสก์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับจานแก้วปกติด้วยเครื่อง Triboindenter พบว่าดิสก์ที่พัฒนาขึ้นซึ่งประกอบด้วยชั้นซิลิกอนหนา 3 นาโนเมตรและชั้น DLC หนา 15 นาโนเมตรสามารถลดความสึกของรอยขีดข่วนลงได้ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ จากการวัดอายุการใช้งานในเครื่องวัด Flying height พบว่าดิสก์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 30 เท่าเมื่อเทียบกับจานแก้ว จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของจานแก้วลงได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ในการปรับปรุงความไว (Sensitivity) ได้พัฒนาดิสก์ที่ประกอบด้วย 4 ชั้น คือชั้นซิลิกอน 1 หนา 1 นาโนเมตร ชั้นDLC 1 หนา 55 นาโนเมตร ชั้นซิลิกอน 2 หนา 3 นาโนเมตรและชั้นDLC 2 หนา 25 นาโนเมตรซึ่งพบว่าดิสก์ที่พัฒนาขึ้นมีความไวในการวัดเพดานบินเพิ่มมากขึ้นถึง 85 เปอร์เซ็นต์ในช่วงเพดานบินระหว่าง 0 ถึง 20 นาโนเมตรเมื่อเปรียบเทียบกับกรวัดโดยใช้จานแก้วปกติ อนึ่งแนวทางนี้ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของจานแก้วได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความไวในการวัด Flying height ได้อีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ..... ลายมือชื่อนิสิต .....  
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....  
 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

246257

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

Academic Year: 2010

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ศรีทุระวานิช ซึ่งได้ให้โอกาสประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงทั้งในด้านการศึกษาและการดำเนินชีวิตของผู้วิจัยเหนือสิ่งอื่นใดคือท่านอาจารย์ยังได้ให้วิธีการคิดแบบวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อทัศนคติของผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อลงกรณ์ พิมพ์พิน ที่ช่วยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างสูงในด้านทางการศึกษาและการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูล, อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย และผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อ พี่พุง ม่วงงาม, พี่ธีระวัฒน์ แก้วมณี, พี่สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, พี่ภูวนัย บุญหนัก และ พี่ลัชชานันท์ รักษาธรรม พี่จิวิศวรรบริษัทเวสเทิร์น 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 นนทิววัฒน์วณิช ที่ร่วมฝ่าฟันอุปสรรคตลอดการทำงานมาด้วยกัน และ ขอขอบคุณ นางสาวกิริติ์กานต์ กิริติวานิชย์ ที่เป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาตลอด

และในท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายประยุทธ และ นางจินตนา เพชรดี บิดามารดาของผู้วิจัยที่ได้ให้การเลี้ยงดูทั้งกายและใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านมาโดยตลอด 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 ทัศนวิธานกรรม .....	5
2.1 ฮาร์ดดิสก์ .....	5
2.2 การวัดระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็ก .....	7
2.3 คุณสมบัติของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใส.....	12
2.4 วิธีการปลูก DLC ฟิล์ม.....	15
2.5 การวัดรรัชนีหักเหของวัสดุเคลือบใส.....	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 การหาค่าดรรชนีหักเหของดิสก์ที่พัฒนาขึ้น.....	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

## สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
2.1 วัสดุและความแข็งแรงของวัสดุโปร่งใสและจานแก้ว.....	14
2.2 ความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใส.....	15
3.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์ม.....	35
5.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกปรับใน Critical condition .....	49
5.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการวัด Flying height ระหว่างจานแก้วและดิสก์ที่เคลือบผิวด้วย ซิลิกอนและ DLC .....	57
6.1 ดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ.....	64
6.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....	64
6.3 ตัวอย่างของการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร .....	66
6.4 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากจานแก้ว.....	71
6.5 ค่าความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของจานแก้ว .....	71
6.6 ค่าความเข้มแสง Max, Min และที่วัดได้ (Measure) จากการวัดดิสก์ที่มีซิลิกอน 1 นาโน เมตรและ DLC 15 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากจานแก้ว) .....	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 <sub>1</sub> 1, DLC <sub>1</sub> 55, Si <sub>2</sub> 3 และ DLC <sub>2</sub> 25 นาโนเมตรในการทดสอบ (โดยใช้ค่า Flying height ที่วัดจากจานแก้ว) .....	124
7.7	ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยมีความหนา Si <sub>1</sub> 1, DLC <sub>1</sub> 55, Si <sub>2</sub> 3 และ DLC <sub>2</sub> 25 นาโนเมตร .....	124
7.8	สรุปผลความไวในการวัด Flying height (Sensitivity) ที่เพิ่มขึ้นของดิสก์ที่สร้างขึ้นตามผลการ Optimize .....	126

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ [9].....	6
2.2 หัวอ่าน/เขียนที่บินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็ก [10].....	6
2.3 ไดอะแกรมแสดงถึง Flying height หรือความสูง (h) ที่หัวอ่าน/เขียนบินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็ก [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

รูปที่	หน้า
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 ไตอะแกรมกลไกการเกิดความเสียหายของฟิล์ม DLC (a) ฟิล์มเสียรูปร่างเนื่องจากการขีด (b) เกิดเศษของฟิล์มขึ้นเนื่องจากการขีด (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), ใช้ปืนไนโตรเจนเป่าสิ่งสกปรกออกจากผิวของจานแก้ว (ขวา) .....	33
3.3 ให้นำดิสก์ใส่เข้าไปในเครื่อง 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 Hysistron .....	42
4.3 หัวกดเพชรปลายแหลมชนิด Cube corner ที่มีรัศมีของหัวกด 100 นาโนเมตร [42].....	42
4.4 ภาพของรอยขีดข่วนบนดิสก์ที่ทำการทดสอบทั้งหมด.....	44
4.5 ความสัมพันธ์ของความลึกของรอยขีดข่วนกับความหนาของซิลิกอนโดยที่เส้นประแสดงถึง ความลึกของรอยขีดข่วนบนจานแก้ว .....	45
5.1 ไดอะแกรมของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการปรับ IPS.....	47
5.2 ไดอะแกรมของมุม Skew หรือมุมที่หัวอ่าน/เขียนวางตัวเบี่ยงเบนจากเส้นรัศมีของดิสก์....	48
5.3 ไดอะแกรมของระยะความสูง 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 ผิวหน้าของดิสก์หลังจากทำการวัดอายุการใช้งาน (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), ดรรชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนที่แปลงมาจากการ Fitting (c).....62

6.4 ขั้นตอนการวัดดรรชนีหักเหของฟิล์ม DLC การสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่ใช้ในการวัด 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 ซึ่งจะพิจารณาดีส์ก์เสมือนมีชั้นเดียว .....	76

6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับ Flying height ที่คำนวณจากสมการที่ (6.9) ซึ่งกำหนดให้ค่าดรรชนีหักเหของทั้ง 3 ความยาวคลื่นเป็น $1+0.01i$ .....	77
6.15 ตัวอย่างค่าความแตกต่างของค่า Flying height ที่ความเข้มแสงเดียวกันที่จะใช้เป็นเงื่อนไขในการ Fitting.....	78
6.16 เส้นโค้งความเข้มแสงของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.8 ที่ได้จากการ Fitting ด้วยข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด .....	79
6.17 ข้อความแสดง Error ขณะที่ทำการ Calibration ที่ตำแหน่ง TAE_4.....	80
6.18 เส้นโค้งความเข้มแสงของดิสก์ที่มีความหนาซิลิกอน 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่าดรรชนีหักเหที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.9 ที่ได้จากการ Fitting ด้วยข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัด โดยกำหนดให้ค่า $n$ ของดรรชนีหักเหมากกว่า 1.1 เป็นต้นไป.....	81
6.19 เปรียบเทียบระหว่างค่า Flying height (ไมโครนิ้ว) ที่วัดได้บนงานแก้วกับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหในตารางที่ 6.9 .....	82
6.20 ไดอะแกรมขั้นตอนการหาดรรชนีหักเหที่สามารถนำไปใช้ในการวัด Flying height ได้ถูกต้อง (a) ค่า Flying height ที่วัดได้จากงานแก้ว, (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 (ไมโครนิ้ว) ที่วัดได้บนงานแก้ว (ซ้าย) กับค่า Flying height ที่วัดได้บนดิสก์ที่มีซิลิกอนหนา 1 นาโนเมตรและ DLC 15 นาโนเมตรที่ใช้ค่าดรรชนีหักเหตารางที่ 6.11 (ขวา).....	86

7.1	ฟิล์มซิลิกอนและ DLC ที่ปลูกบนซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีชั้นของ SiO <sub>2</sub> .....	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 <sub>1</sub> , d <sub>2</sub> , และ d <sub>3</sub> คือความหนาของ Si, DLC และ Flying heightตามลำดับโดยวัสดุที่ใช้ทำ 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 ชั้นโดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของซิลิกอนและ 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 ซึ่งบริเวณที่เกิดการหลุดลอกของ 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 Si<sub>1</sub>, DLC<sub>1</sub>, Si<sub>2</sub> และ DLC<sub>2</sub>..... 105

7.17 ไดอะแกรมการวัด Flying height ของเครื่อง flying height tester โดยใช้จานแก้วแบบปกติ ซึ่งในการคำนวณจะใช้ดิสก์ที่มี 5 ชั้นแทนจานแก้วซึ่งการสะท้อนของแสงจะซับซ้อนกว่ามาก 105

7.18 แบบจำลองของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่ใช้ในการคำนวณเพื่อปรับปรุง Sensitivity ในการวัด Flying height โดยที่ d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub>, d<sub>4</sub> และ d<sub>5</sub> คือความหนาของ Si<sub>1</sub>, DLC<sub>1</sub>, Si<sub>2</sub>, DLC<sub>2</sub> และ Flying height ตามลำดับโดยวัสดุที่ใช้ทำ Slider คือ AlTiC ..... 106

7.19 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่มีความหนาของ Si<sub>1</sub>, DLC<sub>1</sub>, Si<sub>2</sub> และ DLC<sub>2</sub> 1 นาโนเมตร ..... 108

7.20 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้ Interval หยาบแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดความหนาของ $Si_1$ และ $Si_2$ เท่ากับ 2 และ 5 นาโนเมตร.....	110
7.21 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยใช้ Interval หยาบแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดความหนาของ $DLC_1$ 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 ละเอียดแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดความหนาของ $Si_1$ 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 ละเอียดแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดความหนาของ $DLC_1$ 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 แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดความหนา $Si_1$ และ $Si_2$ เท่ากับ 0.5 และ 1.5 นาโนเมตร.....	113
7.25 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นโดยกำหนดขอบเขตความหนาของ $DLC$ ที่ 100 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดความหนา $DLC_1$ 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 แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากจานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา $Si_1$ และ $Si_2$ เท่ากับ 1 และ 3 นาโนเมตร.....	114

7.27 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ DLC<sub>1</sub> 45 ถึง 65 และ DLC<sub>2</sub> 15 ถึง 35 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา Si<sub>1</sub> และ Si<sub>2</sub> เท่ากับ 1 และ 3 นาโนเมตร.....115

7.28 Sensitivity ในการวัด Flying height ของดิสก์ที่มี 5 ชั้นในช่วงความหนาที่สนใจคือ Si<sub>1</sub> 0 ถึง 2 และ Si<sub>2</sub> 2 ถึง 4 นาโนเมตร แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นจากงานแก้วโดยกำหนดให้ความหนา DLC<sub>1</sub> และ DLC<sub>2</sub> เท่ากับ 55 และ 25 นาโนเมตร.....116

7.29 ลักษณะเส้นโค้งความเข้มแสงที่เป็นฟังก์ชันของ Flying height ของดิสก์ที่มี Si<sub>1</sub> 1, DLC<sub>1</sub> 55, Si<sub>2</sub> 3 และ DLC<sub>2</sub> 25 นาโนเมตร .....116

7.30 ดิสก์ที่มี 5 ชั้นที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มซิลิกอนและ DLC สลับกันซึ่งมีความหนาดังนี้ Si<sub>1</sub> 1, DLC<sub>1</sub> 55, Si<sub>2</sub> 3 และ DLC<sub>2</sub> 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 Si<sub>1</sub> 1, DLC<sub>1</sub> 55, Si<sub>2</sub> 3 และ DLC<sub>2</sub> 25 นาโนเมตร.....125

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

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

### อักษรกรีก

$\beta_i$	เฟสของแสงที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเดินทางผ่านชั้นตัวกลาง $i$
$\lambda$	ความยาวคลื่นของแสง

### อักษรย่อ

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