

ความเชื่อถือได้ของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ  
ในการทดสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์ ไมเกรชันและการทำงานอายุการใช้งาน

นาย กันคินันท์ ทรัพย์เสริมผล



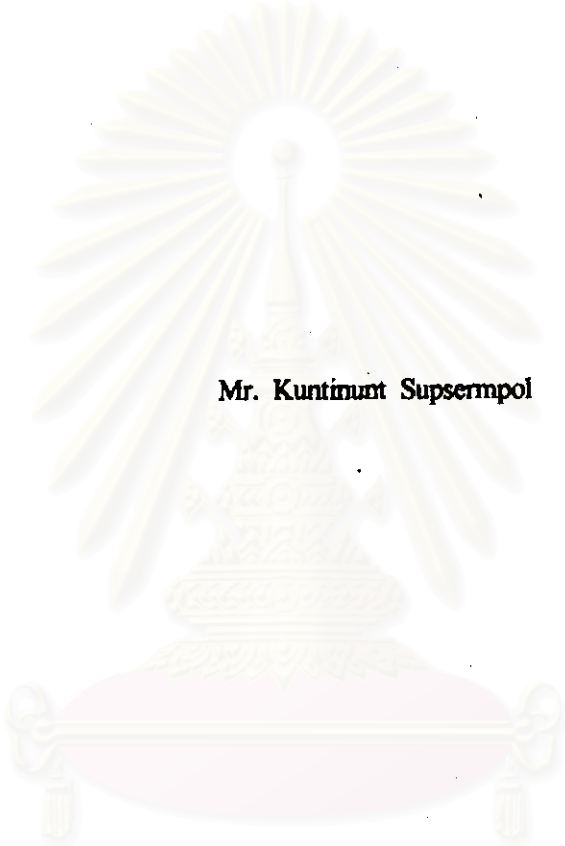
สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-948-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**RELIABILITY OF MAGNETORESISTIVE HEADS  
IN ELECTRO-MIGRATION TEST AND LIFETIME PREDICTION**



**Mr. Kuntinunt Supsermpol**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering  
Department of Industrial Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

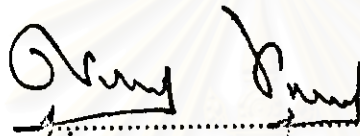
**Academic Year 1998**

**ISBN 974-639-948-9**

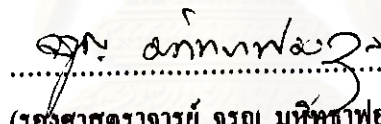
หัวข้อวิทยานิพนธ์      ความเชื่อถือได้ของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิตีฟ ในการทดสอบแบบ  
อิเล็กทรอนิกส์ไมเกรชันและการทำนายอายุการใช้งาน  
โดย                              นาย กันคินันท์ ทวีพย์เสริมผล  
ภาควิชา                              วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
อาจารย์ที่ปรึกษา              ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม        ดร.จอยซ์ ทอมปีตัน


---

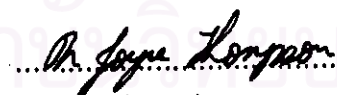
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

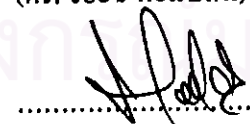
  
..... กณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

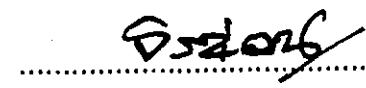
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จรูญ มหิทธิภาพองกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. จอยซ์ ทอมปีตัน)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ปารเมศ ชุตินมา)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

กัณดินันท์ ทรัพย์เสริมผล : ความเชื่อถือได้ของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟในการทดสอบแบบอิเล็กโทรไมเกรชันและการทำนายอายุการใช้ (RELIABILITY OF MAGNETORESISTIVE HEADS IN ELECTRO-MIGRATION TEST AND LIFETIME PREDICTION) อ.ที่ปรึกษา : ศ. ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ , อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. จอยซ์ ทอมป์สัน , 160 หน้า.  
ISBN 974-639-948-9

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์อิเล็กโทรไมเกรชันบนฟิล์มบางของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และสร้างโมเดลสำหรับทำนายอายุการใช้งานและเวลาการประลัย วิธีการทดสอบและการยืนยันความถูกต้อง ผลลัพธ์ที่ใช้ในการทดลอง คือหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A และแบบ B กราฟของการทำนายอายุการใช้งานได้จากการใช้แนวทางของโมเดลอาร์ซีเนียส ซึ่งได้จากการใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยบนข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ผลการทดสอบได้โมเดลอายุการใช้งานโดยมีค่า activation energy เท่ากับ 0.66851 eV สำหรับหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A และ 0.76174 eV สำหรับหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B โมเดลนี้นำไปคำนวณค่าความต้านทานสูงสุดของแมกนีโทริซิสทีฟ และค่าความสูงต่ำสุดของสไครป์ของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟสำหรับอายุการใช้งาน 5 ปี ที่ 12.5, 17, 25, 50 และ 100% duty cycle

หัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟที่ผ่านการทดสอบอิเล็กโทรไมเกรชันและเกิดการประลัย ได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาสาเหตุการประลัยด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การประลัยหลายวิธี เช่น Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM), Energy Dispersive Spectrometer (EDS), Focused Ion Beam (FIB) และ Scanning Probe Microscope (SPM) ผลการวิเคราะห์พบว่ามีเกิดการออกซิเดชันบนวัสดุเพอร์มัลลอย ( $Ni_{0.82}$  และ  $Fe_{0.18}$ ) ของแมกนีโทริซิสทีฟ และบริเวณซิดด์ทั้งสองที่อยู่รอบบริเวณแมกนีโทริซิสทีฟ และมีการตรวจพบโพรง (void) ที่เกิดขึ้นภายในแมกนีโทริซิสทีฟ เนื่องจากอิเล็กโทรไมเกรชัน โดยการใช้เทคนิค FIB และ FESEM

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....  
ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิติกร.....กัณดินันท์ ทรัพย์เสริมผล.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....Dr. Joyce Thompson.....

# # 3970077521 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD:

RELIABILITY / ELECTRO-MIGRATION / MAGNETORESISTIVE / ACTIVATION ENERGY /  
LIFETIME / DUTY CYCLE / TIME TO FAILURE / ARRHENIUS MODEL / FAILURE ANALYSIS  
KUNTINUNT SUPSERMPOL : RELIABILITY OF MAGNETORESISTIVE HEADS IN ELECTRO-  
MIGRATION TEST AND LIFETIME PREDICTION. THESIS ADVISOR : PROF. SIRICHAN  
THONGPRASERT, Ph.D. CO-ADVISOR : JOYCE THOMPSON, Ph.D. 160 pp. ISBN 9734-639-948-9

This investigation studied the electromigration phenomenon in thin film magnetoresistive (MR) recording heads for hard disk drives. Models for predicting the lifetime and time to failure were generated, experimentally tested, and verified. Two products, referred to as Type A and Type B, were used in the analysis. The lifetime prediction curves follow an Arrhenius model derived from applying linear regression to the experimental data. The Time to Failure (TTF) models yielded an activation energy of 0.66851 eV for Type A and 0.76174 eV for Type B. The models were then used to calculate the maximum allowable resistance and minimum stripe height of the MR heads to obtain a 5 year lifetime at 12.5, 17, 25, 50, and 100% duty cycles.

Heads stressed to failure were characterized by a variety of failure analysis techniques such as Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM), Energy Dispersive Spectrometer (EDS), Focused Ion Beam (FIB) and Scanning Probe Microscope (SPM). Oxidation occurred on the Permalloy material ( $\text{Ni}_{0.82}$  and  $\text{Fe}_{0.18}$ ) of the magnetoresistive element and the shields on either side the magnetoresistive element. The voids also were observed within the magnetoresistive element by using the FIB and FESEM techniques.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....  
ปีการศึกษา..... 2541.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำอย่างดีของ ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. จอยซ์ ทอมป์สัน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ จรูญ มหิตาพงษ์กุล ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา และ อาจารย์ จิรวัฒน์ เชาประเสริฐ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ นอกจากนี้ก็ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ จันทร์ประทีป คุณวดีภรณ์ ชูจิตร และคุณกิตติ จินไรสงค์ ที่ช่วยทำการวิเคราะห์ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) และ Energy Dispersive Spectrometer (EDS) ขอขอบคุณ คุณขจรศักดิ์ ดีนาถ ที่ร่วมกันทำงานติดตั้งเกี่ยวกับ Electromigration Tester และทำการทดลอง

ขอขอบคุณอีกครั้งสำหรับ ดร. จอยซ์ ทอมป์สัน ที่ช่วยเหลืองานในด้านบริหาร และบริษัท ไรท์-ไรท์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณบุษรา ทรัพย์เสริมผล (ภรรยา) ที่เป็นกำลังใจ และจัดทำรูปเล่มของงานวิจัยฉบับนี้ ขอขอบคุณคุณแม่ น้องสาว ลูกน้ำผึ้งและน้องตัวเล็กที่เป็นกำลังใจให้ตลอดช่วงการทำงานวิจัยนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ี
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 สภาพความเป็นมา แนวทางเหตุผลและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบสมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบสมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ (Magnetoresistive head).....	6
2.2 อิเล็กโทรไมเกรชันในฟิล์มบาง (Electromigration in thin films).....	19
2.3 โมเดลการเร่งทางกายภาพ (Physical Acceleration Models).....	21
2.4 อาร์ฮีเนียสโมเดล (Arrhenius model).....	23
2.5 การวิเคราะห์การถดถอย.....	25
2.6 ความเชื่อถือได้ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive Reliability).....	32
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 หัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟที่ใช้ทดสอบ , ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และเครื่องทดสอบ.....	44
3.1 หัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟที่ใช้ในการทดสอบ.....	44
3.2 การวัดความต้านทานของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟในระดับสไลเดอร์.....	46
3.3 การครอสเซ็กชัน (Cross section) หัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟในระดับ สไลเดอร์.....	47

3.4 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and Energy Dispersive Spectrometer (EDS).....	51
3.5 การวัดความต้านทานหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ HGA.....	58
3.6 Electro-Migration Tester (EMT).....	58
4 การออกแบบและขั้นตอนการทำงานทดลอง.....	62
4.1 โมเดลการวิเคราะห์ความร้อนสำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ.....	62
4.2 ขั้นตอนการทำงานทดลอง.....	64
5 การวิเคราะห์ผลของการทดสอบและการหาโมเดลการทำนายอายุของผลิตภัณฑ์.....	73
5.1 ผลการวิเคราะห์สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ "A".....	73
5.2 ผลการวิเคราะห์สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ "B".....	98
6 การวิเคราะห์การประลัยของการเกิดอิเล็กโทรไมเกรชันบนหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ.....	127
7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	145
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	145
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	147
รายการอ้างอิง.....	149
ภาคผนวก.....	151
ภาคผนวก ก.....	151
ภาคผนวก ข.....	153
ภาคผนวก ค.....	156
ภาคผนวก ง.....	158
ประวัติผู้เขียน.....	160

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงความสัมพันธ์ทั่วไปของลิเนียร์แอ็คเซอติเวชัน (General Linear Acceleration Relationships).....	23
ตารางที่ 3.1	แสดงผลการทดสอบความแม่นยำของ HP34401A ที่ใช้กับ Single Slider Probe.....	48
ตารางที่ 3.2	แสดงผลการสอบเทียบมาตรฐานกับ SRM 484g.....	55
ตารางที่ 3.3	การทดสอบความแม่นยำของการวัดความสูงแมกนีโทริซิตีฟ ด้วย FE-SEM.....	57
ตารางที่ 3.4	แสดงผลการทดสอบความแม่นยำของ โมเดล HP34404A โดยใช้ค่าความต้านทาน $32 \pm 1\%$ .....	59
ตารางที่ 3.5	แสดงผลการทดสอบความแม่นยำของการอ่านความต้านทานของ EMT ด้วยความต้านทาน $32 \pm 1\%$ .....	61
ตารางที่ 5.1	แสดงผลการวัดความต้านทานของแมกนีโทริซิตีฟ และความสูงของแมกนีโทริซิตีฟ ( $h_{amp}$ ) สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิตีฟ แบบ A.....	81
ตารางที่ 5.2	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานของแมกนีโทริซิตีฟ แบบ A สำหรับการศึกษาความร้อนของแมกนีโทริซิตีฟที่ $60^\circ\text{C}$ .....	83
ตารางที่ 5.3	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของลวดนำไฟฟ้าสำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิตีฟแบบ A.....	83
ตารางที่ 5.4	แสดงความต้านทานของแมกนีโทริซิตีฟกับอุณหภูมิของแมกนีโทริซิตีฟที่สภาวะการทำงาน $60^\circ\text{C}$ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิตีฟแบบ A.....	84
ตารางที่ 5.5	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโทริซิตีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิตีฟแบบ A สำหรับการทดสอบอายุการใช้งานที่ $140^\circ\text{C}$ และใช้กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์.....	87
ตารางที่ 5.6	แสดงผลของการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ $140^\circ\text{C}$ กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิตีฟแบบ A.....	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 5.7	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A สำหรับการทดสอบอายุการใช้งานที่ 175 °C และใช้กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์.....	89
ตารางที่ 5.8	แสดงผลของการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 175 °C กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A.....	90
ตารางที่ 5.9	แสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานสูงสุดและค่าความสูงต่ำสุดของแมกนีโทริซิสทีฟสไตรฟ์ ( $h_{strip}$ ) ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ที่ 12.5 , 17 , 25 , 50 และ 100% duty cycle สำหรับอายุการใช้งาน 5 ปี และที่ภาระกระแสไฟฟ้าตรง 8 และ 10 มิลลิแอมป์.....	92
ตารางที่ 5.10	แสดงผลการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 60 °C , 16 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A.....	93
ตารางที่ 5.11	แสดงผลการประเมินอายุการใช้งานหรือ TTF ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ที่สภาวะการทำงานโดยมีกระแสไฟฟ้าตรง 8 , 10 และ 16 มิลลิแอมป์ ที่สภาวะการใช้งาน 25 และ 100% Duty cycle...	95
ตารางที่ 5.12	แสดงผลการวัดความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟและความสูงของแมกนีโทริซิสทีฟ ( $h_{strip}$ ) สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B....	106
ตารางที่ 5.13	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B สำหรับการศึกษาร้อนของแมกนีโทริซิสทีฟที่ 60 °C.....	108
ตารางที่ 5.14	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้าสำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	109
ตารางที่ 5.15	แสดงความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟกับอุณหภูมิของแมกนีโทริซิสทีฟที่สภาวะการทำงาน 60 °C สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	111
ตารางที่ 5.16	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B สำหรับการทดสอบอายุการใช้งานที่ 140 °C และใช้กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์.....	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 5.17	แสดงผลของการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 140 °C กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	114
ตารางที่ 5.18	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ แบบ B สำหรับการทดสอบอายุการใช้งานที่ 175 °C และใช้กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์.....	115
ตารางที่ 5.19	แสดงผลของการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 175 °C กระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	116
ตารางที่ 5.20	แสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานสูงสุดและค่าความสูงต่ำสุดของแมกนีโทริซิสทีฟสไคร์ฟ ( $h_{mnp}$ ) ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B ที่ 12.5 , 17 , 25 , 50 และ 100% duty cycle สำหรับอายุการใช้งาน 5 ปี และที่ภาระกระแสไฟฟ้าตรง 8 และ 10 มิลลิแอมป์.....	118
ตารางที่ 5.21	แสดงสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B สำหรับการทดสอบเพื่อสนับสนุนโมเดลที่ 16 มิลลิแอมป์ 60 °C.....	119
ตารางที่ 5.22	แสดงความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟกับอุณหภูมิของแมกนีโทริซิสทีฟที่สภาวะการทำงาน 60 °C ที่กระแสไฟฟ้าตรง 16 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ .....	120
ตารางที่ 5.23	แสดงผลการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 60 °C , 16 มิลลิแอมป์ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	122
ตารางที่ 5.24	แสดงผลการประเมินอายุการใช้งานหรือ TTF ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B ที่สภาวะการทำงาน โดยมีกระแสไฟฟ้าตรง 8 , 10 และ 16 มิลลิแอมป์ ที่สภาวะการใช้งาน 25 และ 100% Duty cycle.....	124
ตารางที่ 6.1	แสดงศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของโลหะชนิดต่าง ๆ ณ. ที่อุณหภูมิ 25 °C.....	131
ตารางที่ ก.	แสดงตารางธาตุ.....	151
ตารางที่ ข.	แสดงค่าต่าง ๆ ทางเคมีและฟิสิกส์ของธาตุบางชนิด.....	153

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ ค.	แสดงค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	156
ตารางที่ ง.	แสดงค่าที่ใช้แปลงหน่วย.....	158



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	ภาพถ่าย Scanning Electron Microscopy หัวอ่านเขียนแบบ แมกนีโทริซิสทีฟ (Magnetoresistive Head).....	1
รูปที่ 1.2	แสดงกราฟรูปร่างนำสำหรับอัตราการประดัย.....	2
รูปที่ 2.1	แสดงองค์ประกอบของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ.....	6
รูปที่ 2.2	แสดง AMR effect ใน a single - domain thin - film stripe.....	7
รูปที่ 2.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Magneto-resistive ระหว่างความค้ำทานกับ Magnetization angle.....	8
รูปที่ 2.4	แสดง Easy axis , สนามแม่เหล็กจากแผ่นดิสก์ , Magnetic poles ที่ขอบ และ vertical demagnetization field.....	8
รูปที่ 2.5	แสดงการเปลี่ยนแปลงความค้ำทานของแมกนีโทริซิสทีฟกับสนามแม่เหล็ก จากแผ่นดิสก์ , แสดงผลกระทบของ Demagnetizing field.....	10
รูปที่ 2.6	แสดงการหลุดของการเปลี่ยนแปลงความค้ำทานกับสนามแม่เหล็กจาก ดิสก์ และแสดง ความชัน และ Bias field.....	10
รูปที่ 2.7	แผนภาพแสดงการอ่านของแมกนีโทริซิสทีฟ ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน แบบที่มีและ ไม่มี Bias field.....	11
รูปที่ 2.8	แสดงขั้วสนามแม่เหล็กและ Horizontal demagnetizing field.....	12
รูปที่ 2.9	การหลุดของ Vertical demagnetizing field กับความลึก D และ แสดงค่าเฉลี่ย.....	12
รูปที่ 2.10	การหลุดของ Horizontal demagnetizing field กับความกว้างและ แสดงค่าเฉลี่ย.....	13
รูปที่ 2.11	โครงสร้างของ SAL.....	14
รูปที่ 2.12	แสดงแมกนีโทริซิสทีฟที่ถูกแมกนีโทซ์จะมี Single domain ที่บริเวณตรง กลางและจะมี Multi domain ที่บริเวณปลาย.....	15
รูปที่ 2.13	แสดงการเคลือบวัสดุนำไฟฟ้าบนแมกนีโทริซิสทีฟ.....	16
รูปที่ 2.14	โครงสร้างของเอ็กซ์เซนจ์ แทปส์.....	16
รูปที่ 2.15	โครงสร้างของฮาร์ดดีดัม.....	17

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.16	ภาพตัดขวางของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ ซึ่งเกิดจากการรวมหัวอ่านเขียนอินดักทีฟและ โครงสร้างขั้วของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ.....	18
รูปที่ 2.17	โครงสร้างของ SAL-biased , shielded MRH ซึ่งใช้เอ็กซ์เชนแทป.....	18
รูปที่ 2.18	โครงสร้างของ SAL-biased , shielded MRH ซึ่งใช้ฮาร์ดไบอัส.....	19
รูปที่ 2.19	แสดงวงจรถอร์มอดแอ็คเซอติเวชันระหว่างการเกิดอเล็กโทร ไมเกรชัน.....	20
รูปที่ 2.20	แสดงลักษณะการประลัยของอเล็กโทร ไมเกรชันในฟิล์มบาง Al - Cu.....	21
รูปที่ 2.21	แสดงค่าเฉลี่ยของประชากรและลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นของ $e$ .....	29
รูปที่ 2.22	แสดงค่าเฉลี่ยของประชากรและค่า $y$ ที่จุดใด ๆ.....	29
รูปที่ 2.23	แสดงฐานข้อมูลความเชื่อถือได้ ( Reliability Database ).....	34
รูปที่ 2.24	แสดง MTBF ภาคสนามและ AFR ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์.....	38
รูปที่ 2.25	แสดง MTBF จากภาคสนามของกลุ่มคอมพิวเตอร์แบบเคต็กท็อป.....	39
รูปที่ 2.26	แสดง MTBF จากภาคสนามของกลุ่มคอมพิวเตอร์แบบเวิร์กสเตชัน .....	39
รูปที่ 2.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระดับต่าง ๆ และเวลาในการประลัยของการทดสอบแบบอเล็กโทร ไมเกรชันในฟิล์มบางของ Ni-Fe.....	42
รูปที่ 2.28	แสดงการพล็อตล็อกการิทึมของเวลาในการประลัยแบบอเล็กโทรไมเกรชันของฟิล์มบาง Ni-Fe กับอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ.....	42
รูปที่ 2.29	แสดงการพล็อตระหว่าง R/R <sub>0</sub> กับอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ.....	43
รูปที่ 3.1	แสดงภาพ Transmission Electron Microscope (TEM) สำหรับโครงสร้างของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ.....	45
รูปที่ 3.2	แสดงหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟในระดับสไลเดอร์.....	46
รูปที่ 3.3	แสดงหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ HGA ซึ่งประกอบไปด้วยหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบสไลเดอร์ ถัดมากระแสไฟฟ้าพร้อมบอร์ดและซัสเพนชัน.....	47
รูปที่ 3.4	แสดงคอปเปอร์เพลท (Copper plate station) สำหรับการขัดหยาบ.....	49
รูปที่ 3.5	แสดงทินเพลทสเตชัน (Tin plate station) สำหรับการขัดละเอียดและโพลิช.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.6	แสดงภาพตัดด้านหน้าของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ หลังจากผ่าน การครอตเช็กรัน.....50
รูปที่ 3.7	แสดงภาพตัดขวางของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ.....51
รูปที่ 3.8	แสดงตัวอย่างของ FE-SEM/EDS.....52
รูปที่ 3.9	การทำสหสัมพันธ์ระหว่าง SRM 484g กับ ค่าที่ได้จาก FE-SEM.....56
รูปที่ 3.10	แสดงการวัดความสูงของแมกนีโทริซิสทีฟ.....54
รูปที่ 3.11	แสดงเครื่อง Electro-Migration Tester (EMT).....60
รูปที่ 4.1	แสดงแผนภาพของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ.....63
รูปที่ 4.2	แสดงการไหลของ HGA ใส่เข้าไปในฟีกเจอร์.....67
รูปที่ 4.3	แสดงการวัดความต้านทานของ HGA.....67
รูปที่ 4.4	แสดงการใส่รีจันทดสอบกับเมนบอร์ด (Mainboard) ที่อยู่ใน ตู้ทำความร้อน.....68
รูปที่ 5.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟกับ $h_{\text{stripe}}$ และ $1/h_{\text{stripe}}$ ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ในระดับสไลเดอร์.....82
รูปที่ 5.2	แสดงกราฟของ $MRR_{\text{HGA}}$ กับ $T_{\text{stripe}}$ ที่สภาวะการทำงาน $60^{\circ}\text{C}$ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ แบบ A.....85
รูปที่ 5.3	แสดงกราฟของ $MRR_{\text{Slider}}$ กับ $T_{\text{stripe}}$ ที่สภาวะการทำงาน $60^{\circ}\text{C}$ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ แบบ A.....86
รูปที่ 5.4	กราฟของ $\ln(TTF)$ กับ $1/T_{\text{stripe}}$ ของหัวอ่านเขียน แมกนีโทริซิสทีฟแบบ A.....91
รูปที่ 5.5	กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จาก โมเดลการทำนายอายุของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A.....94
รูปที่ 5.6	แสดงกราฟอายุการใช้งานของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A กับกระแสไฟฟ้าตรงที่ 8 มิลลิแอมป์ ที่สภาวะการใช้งาน 25 และ 100% Duty cycle.....96

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.7	แสดงกราฟอายุการใช้งานของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A กับกระแสไฟฟ้าตรงที่ 10 มิลลิแอมป์ ที่สภาวะการใช้งาน 25 และ 100% Duty cycle.....	97
รูปที่ 5.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟกับ $h_{\text{stripe}}$ และ $1/h_{\text{stripe}}$ ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B ในระดับสไลเดอร์.....	107
รูปที่ 5.9	แสดงกราฟของ $MRR_{\text{HGA}}$ กับ $T_{\text{stripe}}$ ที่สภาวะการทำงาน $60^{\circ}\text{C}$ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	110
รูปที่ 5.10	แสดงกราฟของ $MRR_{\text{Slider}}$ กับ $T_{\text{stripe}}$ ที่สภาวะการทำงาน $60^{\circ}\text{C}$ สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ แบบ B.....	112
	103	
รูปที่ 5.11	กราฟของ $\ln(TTF)$ กับ $1/T_{\text{stripe}}$ ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	117
รูปที่ 5.12	แสดงกราฟของ $MRR_{\text{Slider}}$ กับ $T_{\text{stripe}}$ ที่สภาวะการทำงาน $60^{\circ}\text{C}$ ที่ 12, 14 และ 16 มิลลิแอมป์สำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	121
รูปที่ 5.13	กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากโมเดลการทำนายอายุของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B.....	123
รูปที่ 5.14	แสดงกราฟอายุการใช้งานของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B กับกระแสไฟฟ้าตรงที่ 8 มิลลิแอมป์ ที่สภาวะการใช้งาน 25 และ 100% Duty cycle.....	125
รูปที่ 5.15	แสดงกราฟอายุการใช้งานของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B กับกระแสไฟฟ้าตรงที่ 10 มิลลิแอมป์ ที่สภาวะการใช้งาน 25 และ 100% Duty cycle.....	126
รูปที่ 6.1	แสดงตัวอย่างภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคปบนบริเวณที่เกิดรอยดำที่บริเวณแมกนีโทริซิสทีฟและซิดด์ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า.....	128



สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.2	แสดงภาพถ่ายบริเวณแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ด้วย FE-SEM ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ของหัวอ่านแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A หลังจากผ่านการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 175 °C และกระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 500 ชั่วโมง.....129
รูปที่ 6.3	แสดงภาพถ่ายบริเวณแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ด้วย FE-SEM ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า ของหัวอ่านแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B หลังจากผ่านการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 175 °C และกระแสไฟฟ้าตรง 10 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 500 ชั่วโมง.....129
รูปที่ 6.4	แสดงค่าพลังงานเสรีในการเกิดออกไซด์บางชนิดที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....131
รูปที่ 6.5	แสดงไมโครกราฟ FESEM ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B และสเปกตรัมของ Energy Dispersive Spectrometer บนบริเวณขีด 1 พบว่ามีออกซิเจนเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานปกติ.....132
รูปที่ 6.6	แสดงไมโครกราฟ FESEM ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B และสเปกตรัมของ Energy Dispersive Spectrometer บนบริเวณขีด 2 พบว่ามีคาร์บอน ออกซิเจน และเหล็กเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานปกติ.....133
รูปที่ 6.7	แสดงภาพพื้นผิว (Topography) บริเวณที่เกิดออกไซด์บน โพล 2 ขีด 2 และ ขีด 1 ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ที่ผ่านการทดสอบ EMT ที่ 175 °C 10 mA โดยใช้ Atomic Force Microscopy (AFM) ใน Tapping mode.....135
รูปที่ 6.8	แสดงภาพ 3 มิติ ของบริเวณที่เกิดออกไซด์บน โพล 2 ขีด 2 และ ขีด 1 ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ที่ผ่านการทดสอบ EMT ที่ 175 °C 10 mA.....136
รูปที่ 6.9	แสดงการวัดความหนาของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนขีด 1 และ ขีด 2 ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ที่ผ่านการทดสอบ EMT ที่ 175 °C 10 mA .....137

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 6.10	แสดงภาพพื้นผิว (Topography) บริเวณโหนดและซีกด์ทั้งสองของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟที่ไม่ผ่านการทดสอบ EMT โดยใช้ AFM ใน Tapping mode.....	138
รูปที่ 6.11	แสดงภาพ Topography กับ Magnetic Force Microscopy (MFM) ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B ที่ผ่านการทดสอบ EMT ที่ 175 °C 10 mA .....	139
รูปที่ 6.12	แสดงภาพ Topography กับ Magnetic Force Microscopy (MFM) ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟที่ไม่ผ่านการทดสอบ EMT ที่ 175 °C 10 mA .....	139
รูปที่ 6.13	แสดงภาพถ่วงบริเวณแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ A ด้วย FE-SEM ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า หลังจากผ่านการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 60 °C และกระแสไฟฟ้าตรง 16 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 428 ชั่วโมง.....	141
รูปที่ 6.14	แสดงภาพถ่วงบริเวณแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B ด้วย FE-SEM ที่กำลังขยาย 150,000 เท่า หลังจากผ่านการทดสอบ Accelerated Electro-Migration ที่อุณหภูมิ 60 °C และกระแสไฟฟ้าตรง 16 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 428 ชั่วโมง.....	141
รูปที่ 6.15	แสดงโมเดลการแผ่ความร้อนโดยมีแมกนีโทริซิสทีฟเป็นแหล่งความร้อน โดยมีจุดศูนย์กลางความร้อนอยู่ที่จุดกึ่งกลางของแมกนีโทริซิสทีฟ เนื่องจากเป็นจุดให้ความร้อนสูงสุด.....	142
รูปที่ 6.16 (ก)	แสดงภาพไมโครกราฟจาก SEM เพื่อสังเกตลักษณะการประลัยที่เกิดจากอิเล็กโทรไมเกรชันบนแมกนีโทริซิสทีฟ.....	143
รูปที่ 6.16 (ข)	แสดงภาพไมโครกราฟ โครงสร้างภายในของแมกนีโทริซิสทีฟที่เกิดปรากฏการณ์อิเล็กโทรไมเกรชัน โดยใช้ Focused Ion Beam.....	143

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

รูปที่ 6.17	แสดงภาพไมโครกราฟโครงสร้างภายในของแมกนีโทริซิสทีฟของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟแบบ B โดยการใช้ FIB กัดเจาะที่บริเวณแมกนีโทริซิสทีฟ พบว่าแมกนีโทริซิสทีฟด้านในเกิดการบวมและเกิดโพรงภายใน (Accelerated Electro-Migration ที่ 10 mA 175 °C เป็นเวลา 500 ชั่วโมง).....	144
-------------	---	-----



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย