

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



203336



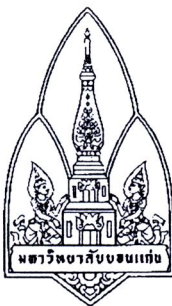
ศึกษาผลกระทบของ Spin Torque ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต
ในหัวอ่านชนิด TMR
A STUDY OF SPIN TORQUE DUE TO ESD ON TMR READ HEAD

นายณัฐชัย อุทอง

วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553



ศึกษาผลกระทบของ Spin Torque ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต
ในหัวอ่านชนิด TMR

A STUDY OF SPIN TORQUE DUE TO ESD ON TMR READ HEAD



นายณัฐชัย จุทอง

วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553

ศึกษาผลกระทบของ Spin Torque ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต
ในหัวอ่านชนิด TMR

นายณัฐชัย จุทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2553

A STUDY OF SPIN TORQUE DUE TO ESD ON TMR READ HEAD

MR. NUTTACHAI JUTONG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY**

2010



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
หลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ชื่อวิทยานิพนธ์: ศึกษาผลกระทบของ Spin Torque ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตในหัวอ่าน
ชนิด TMR

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์: นายณัฐชัย จุทอง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ดร. ดวงพร สมพงษ์

ประธานกรรมการ

ดร. ทิพานิส ซาชิโย

กรรมการ

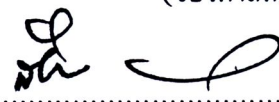
รศ.ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์:

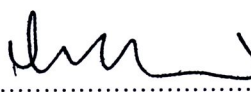
.....  อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร)

..... 

(รองศาสตราจารย์ ดร. ลำปาง แมนมัตย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

..... 

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมนึก อีระกุลพิศุทธิ์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

ณัฐชัย จุทอง. 2553. ศึกษาผลกระทบของ Spin Torque ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต
ในหัวอ่านชนิด TMR. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ. ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร

บทคัดย่อ

203336

ความเสียหายประเภทแฟล็ก ที่เกิดขึ้นในหัวอ่านที่เอ็มอาร์ (Tunneling Magnetoresistance, TMR) อันเป็นผลเนื่องมาจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) เป็นปัญหาที่ อุตสาหกรรมการผลิตการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้ความสำคัญสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่ยากต่อการตรวจจับ และอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อหัวบันทึกในระหว่างที่ทำการผลิต แต่อาจจะส่งผลเมื่อถึงขบวนการผลิตขั้นสุดท้าย

หัวอ่านที่เอ็มอาร์ประกอบไปด้วย ชั้นสารหลาย ๆ ชั้น ซึ่งประกอบไปด้วย สารแม่เหล็ก และสารฉนวน ที่มีความบางมาก ทำให้ง่ายต่อการทะลุ โดยเฉพาอย่างยิ่งการทะลุที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต การทะลุที่เกิดขึ้นในหัวอ่านที่เอ็มอาร์นั้น แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การทะลุแบบหนัก ที่เกิดขึ้นในชั้นสารฉนวน และการทะลุแบบเบา ที่เกิดจากพินโฮล (Pin-hole) ซึ่งการจะตรวจจับความเสียหายโดยอาศัยเครื่องมือวัดนั้น สามารถทำได้หลังจากที่ หัวอ่านที่เอ็มอาร์เกิดความเสียหายแล้ว โดยที่ไม่สามารถระบุถึงสาเหตุเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการทะลุได้

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ แบบจำลองไฟฟ้าของหัวอ่านที่เอ็มอาร์ เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นในหัวอ่านที่เอ็มอาร์ อันเป็นผลเนื่องมาจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต จากการจำลองคายประจุไฟฟ้าสถิตจากแบบจำลองมนุษย์ ไปยังหัวอ่านที่เอ็มอาร์ พบว่า โครงสร้างของหัวอ่านที่เอ็มอาร์ มีคุณสมบัติเป็นวงจรอสมมาตร ซึ่ง ทั้งคุณลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นรวมถึงระดับแรงดันทะลุ ที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจริงเป็นอย่างมาก จากการวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยอาศัยแบบจำลองไฟฟ้าพบว่า การคายประจุไฟฟ้าสถิตเข้าไปยังขั้วบวก ของหัวอ่านที่เอ็มอาร์ มีผลทำให้เกิดการหลุดออกของอะตอมออกซิเจน อันเป็นเหตุให้หัวอ่านที่เอ็มอาร์ เกิดการทะลุอย่างหนัก ในขณะที่ การคายประจุไฟฟ้าสถิตเข้าไปยังขั้วลบ ของหัวอ่านที่เอ็มอาร์ เป็นเหตุให้เกิดการกระจายตัวของโบรอน เข้ายังชั้นฉนวนของแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กที่เอ็มอาร์ อันเป็นเหตุให้หัวอ่านที่เอ็มอาร์ เกิดการทะลุเบา การวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้ได้ถูกยืนยันโดยอาศัยการจำลองโครงสร้างอะตอมของแผ่นฟิล์มบางที่เอ็มอาร์ นอกจากนี้ผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต โดยอาศัยแบบจำลองเครื่องจักร แบบจำลองการสะสมประจุในอุปกรณ์ รวมไปถึงแนวทางป้องกันความเสียหาย อันเนื่องมาจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต ที่เกิดขึ้นในหัวอ่านที่เอ็มอาร์ ยังได้ถูกศึกษาโดยอาศัย แบบจำลองที่ได้นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้

Nuttachai Jutong. 2010. **A Study of Spin Torque Due to ESD on TMR Read Heads.**

Doctor of Philosophy Thesis in Eletrical Engineering, Graduate School,
Khon Kaen University.

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Apirat Siritaratiwat

ABSTRACT

203336

A Hidden failure in hard disk drive industrial due to Electrostatic discharge (ESD) is a major problem. Since this type of failure can not be detected during process, it maybe affect to hard disk drive in the end of process. The current instruments may not be capable to detect the failure because the magnetic layer of TMR thin film, particularly, in the atomic level is the main cause.

This research presents the analysis methodology for studying the TMR heads defects by using a circuit model of current and voltage across thin film. To study in atomic level, the electronics structure of TMR thin film is studied.

It is found from simulation and experiment that the equivalent of TMR head is asymmetric. The ESD discharge to R+ terminal requires a higher breakdown voltage than that to R- . The breakdown characteristics of different discharge paths can be found in this thesis. Based on the experiment, it is found that when discharge in to R+, an intrinsic breakdown can be observed while, when discharge in to R- , the extrinsic breakdown can be found. In addition, the spin transport properties of TMR thin film in a multilayer of CoFe/MgO/CoFe are also studied by using SMEAGOL package. It is found from calculation that , the Oxygen vacancy in interface region between the pin layer and the MgO barrier can cause of high resistance ,while Boron diffusion in to interface region between the free layer and the MgO barrier can cause of TMR low resistance .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ และสนับสนุนให้กำลังใจ อีกทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยเฉพาะทางด้าน ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในระดับปริญญาเอกแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่กรุณาได้ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจนสามารถนำมาใช้แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำวิจัยได้ดีด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร. ดวงพร สมพงษ์ และ ดร. ทิพานิส ซาชิโย ประธานกรรมการ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำรวมไปถึงตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบริษัทผู้ร่วมทำวิจัย จำกัด ที่กรุณาให้การสนับสนุนตัวอย่างหัวบันทึกสำหรับทดสอบสถานที่ และเครื่องมือ ตลอดจนคำปรึกษาต่างๆ แก่ผู้วิจัย และให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในการทดสอบหัวบันทึกจนแล้วเสร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ พี่น้อง ครอบครัว เพื่อนและรุ่นน้องทุกท่านที่สนับสนุนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ณัฐรัชย์ จุทอง

งานวิทยานิพนธ์นี้มอบส่วนดีให้บุพการีและคณาจารย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
คำอุทิศ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 สถานที่ทำวิจัย	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและผลงานที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Structure)	4
2.3 ทฤษฎีการขนย้ายอิเล็กตรอนสปิน	9
2.4 แผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR	14
2.5 หัวอ่านข้อมูลแม่เหล็กชนิด TMR	28
2.6 เฮดกิมบอลแอสเซมบลี (Head Gimbal Assembly, HGA)	31
2.7 การคายประจุไฟฟ้าสถิต	31
2.8 ผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตที่มีต่อหัวอ่าน TMR	34
บทที่ 3 การทดลอง	36
3.1 การออกแบบ แบบจำลองของหัวอ่าน TMR ในระดับการผลิต HGA	36
3.2 การทดลองโดยอาศัยแบบจำลอง	39
3.3 การทดลองโดยอาศัยการทดลอง	41
บทที่ 4 ผลการทดลอง	44
4.1 การทดสอบผลของแรงดันการคายประจุไฟฟ้าสถิตต่อหัวอ่าน	44
4.2 ผลของ FOS และ การต่อขนาน ต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิต	56
4.3 ผลของเส้นทางการคายประจุต่อหัวอ่านข้อมูล	62
4.4 ผลของการคายประจุต่อความสมมาตร	72
4.5 การวิเคราะห์ผลของการคายประจุที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานและความสมมาตร โดยอาศัยทฤษฎีการขนถ่ายอิเล็กตรอน	73
4.6 ผลของการคายประจุต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็ก	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลของแบบจำลองจักรกลต่อหัวอ่าน	90
4.8 ผลของแบบจำลองประจุสะสมในอุปกรณ์ต่อหัวอ่าน	95
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	100
5.1 ผลจากแรงดันการคายประจุต่อการทะลายในหัวบันทึก	100
5.2 ผลจากการคายประจุที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน	100
5.3 ข้อเสนอแนะ	100
เอกสารอ้างอิง	102
ภาคผนวก	107

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์สำหรับประมาณความเสียหาย

หน้า
43

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของแผ่นฟิล์มบางที่เอ็มอาร์	1
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแถบ ของระบบ Kronig-Penny ซึ่งเป็นระบบขนาด 1 มิติ	5
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ สารหนู	6
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของทองแดง	7
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุคอบอลต์ (Cobalt)	8
ภาพที่ 2.5 แนวคิดพื้นฐานของการเกิด ปรากฏการณ์การกระเจิงของอิเล็กตรอน	9
ภาพที่ 2.6 ขบวนการขนย้ายอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในความต้านทาน	10
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของผลึกไฮโดรเจน ในระบบสองมิติ	11
ภาพที่ 2.8 การขนย้ายอิเล็กตรอน เมื่อมีการจ่ายแรงดันขนาด V โวลต์	11
ภาพที่ 2.9 อุปกรณ์ในระดับอะตอม (Atomistic) ที่มีย่านการกระเจิง ขั้วด้านซ้ายและด้านขวา	14
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของแผ่นฟิล์มแม่เหล็ก TMR	15
ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง DOS และการเกิดสปินโพลาไลเซชัน	16
ภาพที่ 2.12 การไหลผ่านฉนวน คลื่นที่พุ่งเข้ามายังบริเวณฉนวน (Barrier)	18
ภาพที่ 2.13 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านสมมาตรต่าง ๆ	18
ภาพที่ 2.14 การแบ่งประเภทของสมมาตร ตาม วงโคจรของอิเล็กตรอน	19
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงาน และ $(k\Delta z)^2$	20
ภาพที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลง DOS ที่แต่ละชั้นของโครงสร้างของ Fe/MgO/Fe	21
ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ความต้านทาน และสัดส่วน TMR ที่อุณหภูมิห้อง	21
ภาพที่ 2.18 การเกิดการทะลุแบบหนักสำหรับแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็กที่มีความหนาต่างกัน	23
ภาพที่ 2.19 ผลของความร้อนที่มีต่อ การเกิดการทะลุ และ อัตราส่วน TMR	23
ภาพที่ 2.20 ผลของขนาดของพื้นที่ความต้านทาน ที่มีต่อการเกิดการทะลุและความหนาแน่นกระแส ที่เกิดจากการจ่ายแรงดันต่างขั้ว	24
ภาพที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแผ่นฟิล์มบางในอุณหภูมิต่ำ Fe/MgO/Fe	25
ภาพที่ 2.22 การเกิดพินโฮลภายในแผ่นฟิล์มบางแม่เหล็ก TMR	26
ภาพที่ 2.23 ภาพถ่าย TEM ของแผ่นฟิล์มบาง TMR	26
ภาพที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างการจ่ายแรงดัน และ พื้นที่ความต้านทาน	26
ภาพที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นฉนวน MgO และ ขนาดของพินโฮล	27
ภาพที่ 2.26 วิวัฒนาการของการค้นพบ และใช้งาน ความต้านทานแม่เหล็ก	28
ภาพที่ 2.27 โครงสร้างของหัวบันทึก TMR	28
ภาพที่ 2.28 ส่วนประกอบของหัวอ่านข้อมูลแบบ TMR	29
ภาพที่ 2.29 โครงสร้างของแผ่นฟิล์มบางประเภท TMR	30
ภาพที่ 2.30 ส่วนประกอบของเฮดกิมบอลแอสแซมบลี	31
ภาพที่ 2.31 วงจรการทดสอบ HBM	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 2.32 รูปคลื่นที่ได้จาก HBM ตาม มาตรฐาน ANSI/ESD STM5.1-2007	32
ภาพที่ 2.33 วงจรการทดสอบ MM	33
ภาพที่ 2.34 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการทดสอบ ESD ในระบบการวัดขนาด 3.5 GHz	33
ภาพที่ 2.35 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกชนิด TMR และ GMR ที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์	34
ภาพที่ 2.36 เส้นโค้งทรานส์เฟอร์ของหัวบันทึกที่เกิดความเสียหายจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์	35
ภาพที่ 2.37 ผลของแรงดันจากแบบจำลอง HBM ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของ Maximum Noise Spike	35
ภาพที่ 2.38 ผลของแรงดันจากแบบจำลอง HBM ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน	35
ภาพที่ 3.1 องค์ประกอบของเฮดกิมบอลแอสเซมบลี	36
ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบของ HGA	36
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างและแบบจำลองของหัวอ่านข้อมูล	37
ภาพที่ 3.4 แบบจำลองไฟฟ้าสายนำสัญญาณ	38
ภาพที่ 3.5 แบบจำลองไฟฟ้าระหว่างส่วนฐานและแขนรอง	39
ภาพที่ 3.6 สำหรับหัวบันทึกข้อมูลแบบ TMR ในระดับการผลิต HGA	39
ภาพที่ 3.7 วงจรที่ใช้สำหรับศึกษาการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์	40
ภาพที่ 3.8 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้ ทดสอบผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ โดยการคายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R+(-) และ R-(+)	41
ภาพที่ 3.9 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้ ทดสอบผลจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ โดยการคายประจุคร่อมระหว่างขั้ว R+ (-) และ กราวด์	42
ภาพที่ 3.10 เครื่อง QST ที่ใช้ในการทดลอง	42
ภาพที่ 3.11 Switching ที่ถูกใช้ในการทดลอง	42
ภาพที่ 3.12 Scope ที่ถูกใช้ในการทดลอง	43
ภาพที่ 3.13 ภาพรวมของการทดลอง	43
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ และกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR}	44
ภาพที่ 4.2 รูปสัญญาณของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} เมื่อทำการคายประจุโดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน	45
ภาพที่ 4.3 วงจรทดสอบการคายประจุ	45
ภาพที่ 4.4 แบบจำลองของหัวอ่านของหัวบันทึก	47
ภาพที่ 4.5 แบบจำลองที่ถูกจัดเรียงใหม่ในลักษณะของวงจร π	47
ภาพที่ 4.6 แบบจำลองของวงจรที่ใช้คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเมื่อคายประจุระหว่าง R+ เทียบกับกราวด์ และ R- เทียบกับกราวด์	48
ภาพที่ 4.7 $1/G_{TMR}(j\omega)$ ที่ได้จากการคายประจุระหว่าง R+ เทียบกราวด์ และ R- เทียบกราวด์	49
ภาพที่ 4.8 ระดับแรงดันที่ทำให้เกิดความเสียหาย จากการทดลองจริงเทียบกับการคายประจุใน 4 รูปแบบ	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหายเนื่องจาก กรณีที่ 1	51
ภาพที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหายเนื่องจาก กรณีที่ 2	52
ภาพที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหายเนื่องจาก กรณีที่ 3	53
ภาพที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของหัวบันทึก ที่เกิดความเสียหายเนื่องจาก กรณีที่ 4	54
ภาพที่ 4.13 ผลของการคายประจุที่มีต่อกระแสที่ไหลผ่านหัวบันทึกในระดับการผลิต HGA	55
ภาพที่ 4.14 ระดับแรงดันที่ทำให้หัวบันทึกเกิดความเสียหายจากการจำลองเทียบกับการทดลอง ที่เกิดจากการคายประจุในแต่ละกรณี	56
ภาพที่ 4.15 ผลของ C_FOS+ และ C_FOS - ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน	57
ภาพที่ 4.16 ผลของ C_FOS ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุ ขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยกรณีการคายประจุที่ต่างกัน	58
ภาพที่ 4.17 ผลของ R_{Shunt+} และ R_{Shunt-} ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	60
ภาพที่ 4.18 ผลของ R_{Shunt} ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุ ขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	61
ภาพที่ 4.19 ผลของ $R_{Parallel}$ ต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุ ขนาด 28 โวลต์ โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	61
ภาพที่ 4.20 ผลเฉลี่ย การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึก ในกรณีที่ 1 และ 2	64
ภาพที่ 4.21 แบบจำลองไฟฟ้าสำหรับการคายประจุในกรณีที่ 1 และ 2	65
ภาพที่ 4.22 แรงดันตกคร่อม R_{TMR} และ C_{BS} ที่เกิดจากการคายประจุกรณีที่ 1 และ 2	66
ภาพที่ 4.23 ผลเฉลี่ย การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัวบันทึกในกรณีที่ 3 และ 4	68
ภาพที่ 4.24 แบบจำลองไฟฟ้าสำหรับการคายประจุในกรณีที่ 3 และ 4	70
ภาพที่ 4.25 แรงดันตกคร่อม R_{TMR} และ C_{BS} ที่เกิดจากกรณีที่ 3 และ 4	71
ภาพที่ 4.26 ผลเฉลี่ย อสมมาตร ที่เกิดจากกรณีการคายประจุที่ต่างกัน	72
ภาพที่ 4.27 โครงสร้างของ CoFe/MgO/CoFe แบบ บัลด (Bulk)	73
ภาพที่ 4.28 ตัวอย่างการซ้อนทับ (Overlap) ระหว่างออร์บิทัลของอะตอมสองตัวที่อยู่ใกล้กัน	75
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน	77
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และพลังงานที่ระดับพลังงาน ใกล้ ๆ พลังงานเฟอร์มี	79
ภาพที่ 4.31 ขนาดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1-5	80
ภาพที่ 4.32 PDOS ของแต่ละอะตอมในโครงสร้างที่ 1	81
ภาพที่ 4.33 PDOS ของแต่ละอะตอมในโครงสร้างที่ 2 และ 3	82
ภาพที่ 4.34 PDOS ของแต่ละอะตอมในโครงสร้างที่ 4 และ 5	83
ภาพที่ 4.35 ทิศทางการไหลของกระแสที่เกิดจากโครงสร้างที่ 1 ถึง 5	85
ภาพที่ 4.36 ความเสียหายที่บริเวณแผ่นฟิล์ม TMR ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการคายประจุกรณีที่ 1-4	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.37 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮีสทีรีซิส ของเส้นโค้งทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 1	87
ภาพที่ 4.38 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮีสทีรีซิส ของเส้นโค้งทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 2	88
ภาพที่ 4.39 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮีสทีรีซิส ของเส้นโค้งทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุกรณีที่ 3	89
ภาพที่ 4.40 ค่าเฉลี่ย RMS ของสัญญาณขาออก ความต้านทาน การเกิดวงฮีสทีรีซิส ของเส้นโค้งทรานเฟอร์ และการกระโดดแบบบาร์กเฮาเซน ที่เกิดจากกรณีการคายประจุ กรณีที่ 4	89
ภาพที่ 4.41 ผลของแรงดันการคายประจุแบบ MM ต่อ ขนาดของกระแสไหลผ่าน R_{TMR}	90
ภาพที่ 4.42 รูปสัญญาณกระแส ที่ไหลผ่าน R_{TMR} (I_{TMR}) อันเป็นผลเนื่องมาจาก การคายประจุแบบ MM โดยอาศัยแรงดันการคายประจุขนาด 5 โวลต์	91
ภาพที่ 4.43 ผลของ C_{FOS+} และ C_{FOS-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 5 โวลต์จาก MM โดยอาศัยรูปการคายประจุที่ต่างกัน	92
ภาพที่ 4.44 ผลของ R_{Shunt+} และ R_{Shunt-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	93
ภาพที่ 4.45 ผลของ R_{Shunt} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	94
ภาพที่ 4.46 ผลของ $R_{Parallel}$ ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 5 โวลต์ จาก MM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	94
ภาพที่ 4.47 ผลของแรงดันการคายประจุแบบ CDM ต่อ ขนาดของกระแสไหลผ่าน R_{TMR}	95
ภาพที่ 4.48 รูปสัญญาณกระแส ที่ไหลผ่าน R_{TMR} (I_{TMR}) อันเป็นผลเนื่องมาจาก การคายประจุแบบ CDM โดยอาศัยแรงดันการคายประจุขนาด 1.45 โวลต์	96
ภาพที่ 4.49 ผลของ C_{FOS+} และ C_{FOS-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	97
ภาพที่ 4.50 ผลของ R_{Shunt+} และ R_{Shunt-} ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดัน การคายประจุขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	98
ภาพที่ 4.51 ผลของ $R_{Parallel}$ ที่มีต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่าน R_{TMR} ที่ระดับแรงดันการคายประจุ ขนาด 1.45 โวลต์ จาก CDM โดยอาศัยรูปแบบการคายประจุที่ต่างกัน	99