



ผลกระทบของความร้อนจากภายนอกต่อลักษณะเฉพาะทางเฟอร์โรแมกเนติกเรโซแนนซ์ของหัวอ่านชนิด TMR

Effects of External Heat Upon Ferromagnetic Resonance Characteristics of TMR heads

สิรินันท์ วงศ์ล้ำม และจิรณัฐ เสงี่ยมศักดิ์*

Sirinan Wonglam and Chiranut Sa-ngiamsak*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

*Correspondent author: chiranut@kku.ac.th

บทคัดย่อ

เสถียรภาพของคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของหัวอ่านเมื่ออยู่ในสภาวะที่ได้รับความร้อนนั้นโดยส่วนมากจะพิจารณาเสถียรภาพของหัวอ่านระดับมหภาคหรือแบบทั้งชิ้น ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้ในระดับชั้นของแผ่นแม่เหล็กฟิล์มบาง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบผลกระทบของความร้อนจากภายนอกต่อเสถียรภาพของความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ในชั้นอิสระ (free layer, FL) และชั้นอ้างอิง (reference layer, RL) / ชั้นตรึง (pinned layer, PL) ของหัวอ่านชนิดทีเอ็มอาร์ (tunneling magnetoresistance, TMR) โดยวิธีเฟอร์โรแมกเนติกเรโซแนนซ์ (ferromagnetic resonance, FMR) ช่วงความถี่ 0.2 GHz ถึง 10 GHz ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดงลักษณะเฉพาะของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านที่ถูกให้ความร้อนจากลมร้อน (hot air, HA) โดยอ้างอิงกับลักษณะเฉพาะของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านที่อยู่ในสภาวะปกติ (normal) การทดสอบประสิทธิภาพของหัวอ่านถูกแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไขดังนี้ (I) กรณีจ่ายสนามแม่เหล็ก 750 Oe ถึง 1,200 Oe ในระนาบเดียวกันกับทิศของสนามแม่เหล็กถาวร (hard bias, HB) ของหัวอ่าน (II) กรณีจ่ายสนามแม่เหล็ก ± 520 Oe ทิศทางขนานกับความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของชั้น RL ผลการทดลองสรุปได้ว่า เงื่อนไข (I) พบว่าหัวอ่านที่ได้รับความร้อนจะมีฟลักแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนสูงกว่าระดับปกติ 2-3 เท่าปรากฏในย่านความถี่ประมาณ 9 GHz ซึ่งแสดงถึงความผันผวนทางแม่เหล็กของ RL/PL อันเนื่องมาจากความร้อนซึ่งทำให้ exchange bias field (H_{EB}) มีค่าลดลง ขณะที่สัญญาณรบกวนของหัวอ่านปกติจะมีสภาวะราบเรียบซึ่งแสดงถึงเสถียรของ H_{EB} ในเงื่อนไข (II) หัวอ่านที่ได้รับความร้อนภายนอกมีค่าเฉลี่ยของผลต่างแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนมากกว่าหัวอ่านปกติถึง 4.13 เท่าแสดงให้เห็นถึงการเกิดความไม่สมมาตร (asymmetry) ซึ่งอาจจะเกิดจากคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปของ HB อันเนื่องมาจากความร้อน

Abstract

Thermal stability of magnetic recording heads is an important issue; and most analysis was carried out in macro-magnetic state as a whole which leaving out the micro-magnetic analysis state particularly in the layer-level state of TMRs. This work focuses on the analysis of thermal stability of TMR heads in layer-level state; free layer (FL), reference layer (RL) and pinned layer (PL) using ferromagnetic resonance (FMR) during 0.2GHz – 10 GHz range of frequency. Heat energy was transferred to TMR heads through hot air; and the results were compared with TMR heads without heat transfer which operating at room temperature. The experiments were conducted under two conditions; (I) External magnetic field of 750 Oe – 1,200 Oe was applied to TMR heads in the direction of hard bias field (HB) (II) External magnetic field of ± 520 Oe was applied to TMR heads in the direction of reference layer (RL). The conclusions are: Condition (I) TMR heads with heat transfer through hot air had 2-3 times higher peak amplitude of noise than that of TMR heads without heat transfer through hot air at the approximate resonance frequency of 9 GHz. This indicated the magnetic fluctuation caused by heat and resulted in lowering the exchange bias field, H_{EB} while the normal TMR heads showed no peak amplitude of noise over testing frequency; hence higher stability. Condition (II) TMR heads with heat transfer through hot air had differential peak amplitude of noise voltage is 4.14 times of normal TMR. This indicates asymmetry caused by the degradation of HB field due to thermal energy from heat transfer through hot air.

คำสำคัญ: เสถียรภาพทางความร้อน เฟอโรแมกเนติกเรโซแนนซ์ ความร้อน หัวอ่านชนิดทีเอ็มอาร์

Keywords: Thermal stability, Ferromagnetic resonance, Heat, TMR heads

1. บทนำ

การเพิ่มความหนาแน่นของการบันทึกข้อมูลในเชิงพื้นที่ (areal density) ของแผ่นเก็บข้อมูล (media) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นเหตุให้ขนาดบิตที่ใช้จัดเก็บข้อมูลในแผ่นเก็บข้อมูลมีขนาดลดลง เมื่อบิตมีขนาดเล็กลงจึงทำให้ขนาดของหัวอ่านลดลงไปด้วยซึ่งจะส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อน (Δ) ลดลง ซึ่งเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าประมาณดังนี้ $\Delta \approx \frac{At_F H_K M_s}{2k_B T}$ เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัด, t_F คือ ความหนาของแผ่นแม่เหล็กฟิล์มบาง, M_s คือ การอิ่มตัวทางแม่เหล็ก (saturation magneti-

zation), H_K คือ สนามแอนไอโซทรอปี (anisotropy field), T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ และ k_B คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant) จากค่าประมาณเสถียรภาพทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าเมื่อหัวอ่านมีขนาดเล็กลงเป็นเหตุให้ $A \cdot t_F$ มีค่าลดลงตาม ส่งผลให้โอกาสที่หัวอ่านจะเกิดความไม่เสถียรทางแม่เหล็กเนื่องจากความร้อนมีมากขึ้น ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีบางกระบวนการที่มีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเช่น การอบด้วยความร้อน (annealing) การขัด (lapping) เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงความร้อนจากกระบวนการผลิตเหล่านี้ได้

ศัพท์เฉพาะ

I_0 คือ กระแสไบแอสหัวอ่าน (A)

ΔR คือ saturation-to-saturation sensor resistance change (Ω)

V คือ ปริมาตรของแผ่นแม่เหล็กฟิล์มบาง (m^3)

k คือ ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (1.38×10^{-23} J/K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

M_s คือ การอิ่มตัวทางแม่เหล็ก saturation magnetization (A/m)

α คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง Gilbert damping coefficient

γ คือ ค่าคงตัวไจโรแมกเนติก gyromagnetic constant (2.21×10^5 m/As)

H_{stiff} คือ สนามความแข็งดั่งยังผล effective stiffness field (A/m)

H_{EB} คือ exchange bias field (A/m)

μ_0 คือ ค่าความขบขี้มได้ของสนามแม่เหล็กของสุญญากาศ (12.6×10^{-7} H/m)

θ คือ มุมของเวกเตอร์ความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของ FL เทียบกับ hard bias (degree)

H_k คือ crystalline anisotropy field (A/m)

H_A คือ shape anisotropy field (A/m)

H_{HB} และ H_E คือ hard bias field และสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง x และ y (A/m)

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเรื่องเสถียรภาพทางความร้อนในหัวอ่านชนิดแมกเนโตรซิสทีฟพบว่า ความร้อนส่งผลให้เกิดการแพร่ของอะตอมภายในชั้นสาร (1-2) และทำให้สนาม exchange bias ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดระหว่างชั้น PL และชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic, AFM) ซึ่งทำให้เกิดแรงทางแม่เหล็กยึดเวกเตอร์ความเป็นแม่เหล็กของ PL ไม่ให้มีการเปลี่ยนทิศทางมีค่าลดลง (3-4) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของหัวอ่านลดลง โดยทั่วไปแล้วการศึกษาเสถียรภาพของหัวอ่านใช้วิธีการตรวจสอบจากเส้นโค้งทรานสเฟอร์ (transfer curve) สัญญาณรบกวนเมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กตามขวาง (transverse) และความต้านทานทางไฟฟ้าของหัวอ่าน ทำการตรวจวัดได้โดยเครื่อง Quasi-Static Tester (QST) ซึ่งจะตรวจสอบคุณภาพหัวอ่านได้ในสถานะแม่เหล็กระดับมหภาค (macromagnetic state) หรือทั้งชิ้นของหัวอ่าน (5) อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะทราบถึงรายละเอียดของสาเหตุหรือข้อบกพร่องในหัวอ่านการ

ใช้วิธีการวัดแบบ QST จึงไม่เพียงพอ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาเสถียรภาพทางแม่เหล็กจากสัญญาณรบกวนทางความร้อนแม่เหล็ก หรือ thermal magnetic noise (mag-noise) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่สูงสามารถตรวจจับความผันผวนทางแม่เหล็ก (magnetic fluctuation) ได้ในสถานะแม่เหล็กระดับจุลภาค (micromagnetic state) โดยใช้เทคนิคการวัดที่เรียกว่าเฟร์โรแมกเนติกเรโซแนนซ์ หรือ FMR (6)

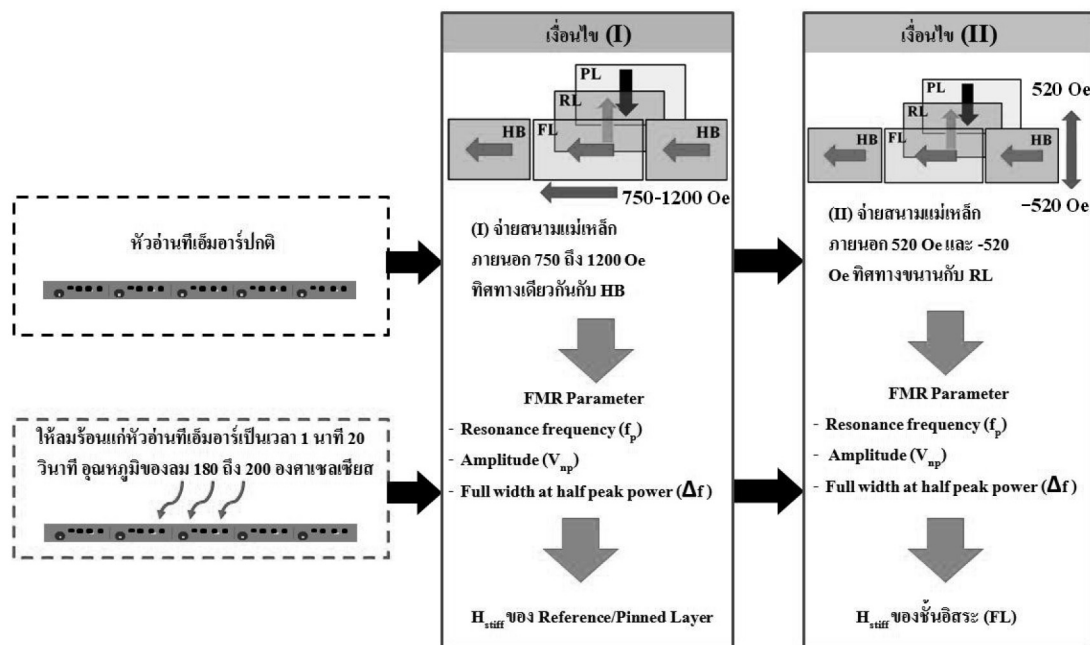
FMR เป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายชิ้นวัสดุทดสอบและสามารถใช้หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในวัสดุแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มบางและเซนเซอร์แบบฟิล์มบางหลายชั้นได้ (7-8) FMR ยังสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพ เสถียรภาพ การตอบสนองการอ่านข้อมูล (sensitivity) ของหัวอ่านชนิดแมกเนโตรซิสทีฟได้ (9) และคุณลักษณะทางด้านไดนามิกส์ของความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ภายในหัวอ่านที่มีขนาดเล็ก (10) นอกจากนี้วิธีการวัดแบบ FMR ยังสามารถนำไปใช้

คำนวณค่าของสนามความแข็งตึง (stiffness field, H_{stiff}), สัมประสิทธิ์การหน่วง (damping coefficient) ซึ่งค่าเหล่านี้จะสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหัวอ่านที่ไม่สามารถคำนวณหาได้ง่ายด้วยวิธีการวัดแบบอื่น (11) งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของความร้อนที่มีต่อ mag-noise ในหัวอ่านแบบแมกเนโตรีซิสทิฟ (12-14) แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาได้ศึกษาเฉพาะผลกระทบของความร้อนต่อ mag-noise โดยพิจารณาความผันผวนทางแม่เหล็กในหัวอ่านโดยรวมเท่านั้น ไม่ได้แยกพิจารณาความผันผวนถึงระดับชั้นแม่เหล็กเพอร์แมกเนติกในหัวอ่าน

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบของความร้อนภายนอกที่มีต่อค่าสนามความแข็งตึงยังผล (effective stiffness field) ในชั้น FL และรอยต่อของชั้น RL/PL โดยวิธีการวัด FMR ในหัวอ่านชนิด TMR เพื่อนำผลมาพิจารณาหาสาเหตุและตำแหน่งของความไม่เสถียรภาพทางแม่เหล็กในหัวอ่าน

2. วิธีการทดลอง

สัญญาณรบกวน mag-noise นั้นถูกวัดโดยเครื่อง FMRA-2008 (Ferro-magnetic Resonance Analyzer, Integral Solutions Int'l) ที่ช่วงความถี่ 0.2 GHz ถึง 10 GHz ทำการทดลองในหัวอ่านชนิด TMR ที่มีความกว้างของแทร็ก (track width) เท่ากับ 40 nm หัวอ่านมีการไบแอสความต่างศักย์อยู่ที่ 140 mV ซึ่งหัวอ่าน TMR ทั้งหมดมาจากการผลิตในชุดเดียวกันและทำการวัดสัญญาณรบกวนที่ระดับสไลเดอร์บาร์ (slider bar) เพื่อตัดปัญหาจากสัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากสายเชื่อมต่อต่างๆ หัวอ่านที่นำมาทดลองแบ่งเป็นหัวอ่านสภาวะปกติ (อุณหภูมิห้อง) จำนวน 49 สไลเดอร์ และหัวอ่านถูกให้ความร้อนจำนวน 49 สไลเดอร์ โดยวิธีให้ลมร้อนเป็นเวลา 1 นาที 20 วินาที อุณหภูมิของลมอยู่ในช่วง 180 ถึง 200 องศาเซลเซียส จากนั้นปล่อยให้หัวอ่านเย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาทีแล้วจึงทำการวัดสัญญาณรบกวน

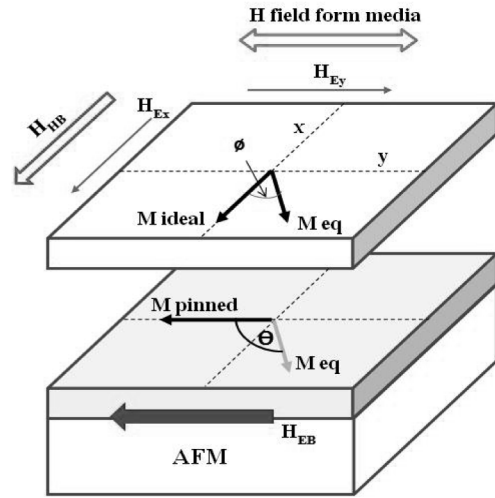


รูปที่ 1. แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

สเปกตรัมของสัญญาณรบกวนถูกประมวลผลและแสดงผลโดยโปรแกรมของเครื่อง FMRA และโปรแกรมได้คำนวณพารามิเตอร์ของสัญญาณรบกวน mag-noise ได้แก่ ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency, f_p) แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน (amplitude, v_{np}) ความกว้างของสัญญาณรบกวนเมื่อมีกำลังครึ่งหนึ่ง (full width at half peak power, Δf)

การวัดสัญญาณรบกวน mag-noise จะแบ่งการศึกษาเป็นสองเงื่อนไขคือ เงื่อนไขที่ (I) ทำการจ่ายสนามแม่เหล็กจากระดับ 750 Oe ถึง 1,200 Oe โดยเพิ่มสนามแม่เหล็กทีละ 50 Oe โดยให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กอยู่ทิศทางเดียวกันกับความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของ HB และ เงื่อนไขที่ (II) ทำการจ่ายสนามแม่เหล็ก 520 Oe และ -520 Oe ในทิศทางขนานกับความเป็นแม่เหล็กของชั้น RL ดังแสดงในรูปที่ 1

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

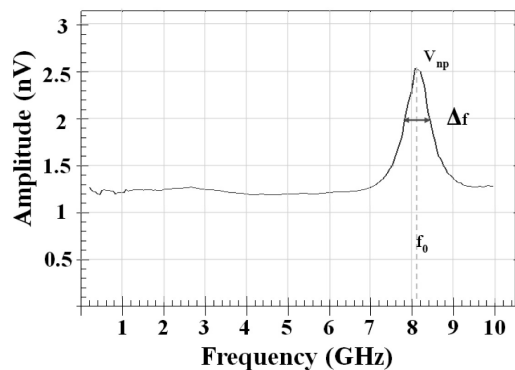


รูปที่ 2. แผนภาพเวกเตอร์ของความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของ FL, PL, H_{EB} , H_{HB} และ สนามแม่เหล็กจากตัวกลาง

ค่าสนามความแข็งดิงยังผล (effective stiffness field, H_{stiff}) ของ FL (6) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$H_{stiff} = [H_k + H_A] \cos 2\phi + (H_{HBx} + H_{Ex}) \cos \phi + (H_{HBy} + H_{Ey}) \sin \phi \quad [1]$$

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของสัญญาณรบกวน mag-noise ซึ่งพารามิเตอร์ของสัญญาณรบกวนประกอบไปด้วย ความถี่เรโซแนนซ์ (f_p), ความกว้างของสัญญาณรบกวนเมื่อมีกำลังครึ่งหนึ่ง (full width at half peak power, Δf), และแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน (amplitude, v_{np})



รูปที่ 3. สัญญาณรบกวน mag-noise ทำการวัดเมื่อไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอก ของหัวอ่านปกติที่ไม่ได้รับความร้อน

จาก mag-noise theory (11) ferromagnetic resonance frequency มีสมการดังนี้

$$f_p = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{M_s H_{stiff}} \quad [2]$$

ความกว้างของสัญญาณรบกวนเมื่อมีพลังงานครึ่งหนึ่ง (full width at half peak power)

$$\Delta f = \frac{\gamma}{2\pi} \alpha M_s \quad [3]$$

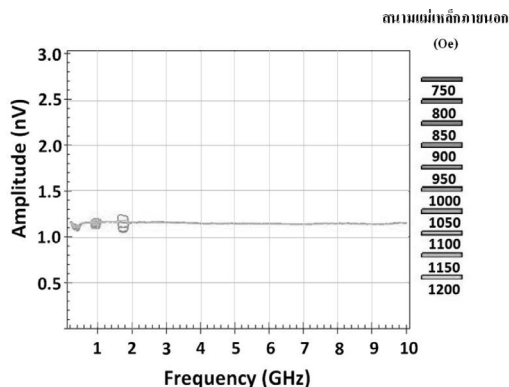
แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน (The resonance peak amplitude noise density) ที่ความถี่เรโซแนนซ์

$$v_{np} = I_b \frac{\Delta R \cos \phi}{\alpha H_{stiff}} \sqrt{\frac{\alpha k_B T}{\mu_0 \gamma M_s V} \left(\frac{H_{stiff}}{H_{stiff} + M_s} \right)} \quad [4]$$

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

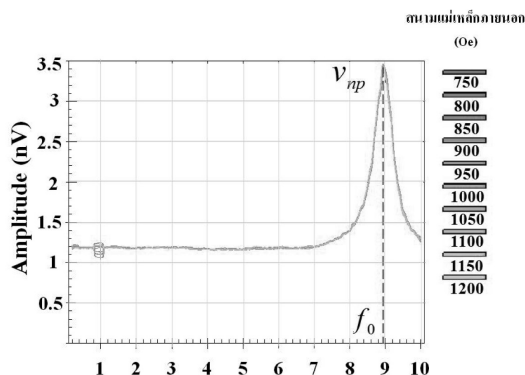
เงื่อนไข (I)

สัญญาณรบกวน mag-noise เป็นฟังก์ชันสัมพันธ์กับความผันผวนของชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติกดังแสดงในสมการที่ [4] ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณรบกวน mag-noise ซึ่งได้แก่แอมพลิจูด v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency, f_p) จึงสามารถสะท้อนถึงคุณลักษณะทางด้านไดนามิกส์ของความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของแผ่นแม่เหล็กฟิล์มบางในหัวอ่านแต่ละชั้นได้



รูปที่ 4. สัญญาณรบกวนที่วัดได้จากเงื่อนไข (I) ของหัวอ่านปกติที่ไม่ได้รับความร้อนจากภายนอก

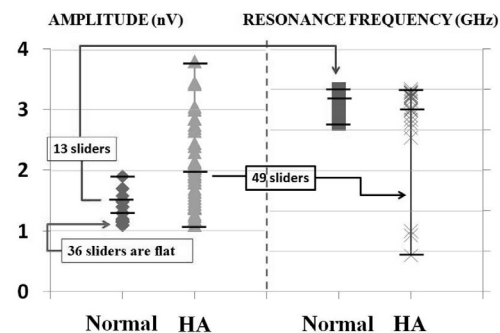
สัญญาณรบกวน mag-noise ที่วัดได้ภายใต้เงื่อนไข (I) ในกรณีของหัวอ่านปกติพบว่าสัญญาณรบกวนที่ปรากฏดังกล่าวนี้นี้บางครั้งเรียกกันว่า background noise จะมีลักษณะเรียบดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงถึงคุณลักษณะของ FMR เมื่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ของชั้น FL และ RL/PL นั้นอยู่ในระดับที่สูง อันเนื่องมาจากความเป็นแม่เหล็กของชั้น FL เกิดการอิ่มตัวเนื่องมาจากการจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอก (8, 11) และค่า exchange bias field, H_{EB} ของชั้น RL/PL นั้นอยู่ในระดับปกติเป็นเหตุให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของแผ่นแม่เหล็กฟิล์มบางของทั้งสองชั้นนี้อยู่ในระดับที่สูงกว่า 10 GHz ทั้งนี้ระดับสัญญาณรบกวนที่วัดได้ในช่วงความถี่ 0.9 GHz และ 1.8 GHz นั้นน่าจะเกิดจากคลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่ (GSM 0.9/1.8 GHz) (15) เนื่องมาจากการป้องกัน (shield) คลื่นรบกวนจากภายนอกยังไม่ดีพอ



รูปที่ 5. สัญญาณรบกวนที่วัดได้จากเงื่อนไข (I) ของหัวอ่านที่ได้รับความร้อนจากภายนอก

จากรูปที่ 5 แสดงสัญญาณรบกวนที่วัดได้จากเงื่อนไข (I) ในกรณีของหัวอ่านที่ได้รับความร้อนจากภายนอกจะพบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กในช่วง 750 Oe ถึง 1200 Oe กราฟของสัญญาณรบกวนจะทับกันเป็นเส้นเดียว ค่าพารามิเตอร์ของ FMR ที่นำมาวิเคราะห์ผลคือแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวน จากผลการทดลองในเงื่อนไข (I) ของหัวอ่านปกติพบว่าสนามแม่เหล็กที่จ่ายให้แก่หัวอ่านปกตินั้นทำให้ความเป็นแม่เหล็กของชั้น FL อยู่ในสถานะอิ่มตัวสังเกตได้จากสัญญาณรบกวนมีลักษณะเรียบและ

ไม่เกิดยอด (peak) ของแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน (11,16) ดังรูปที่ 4 ดังนั้นกรณีจ่ายสนามแม่เหล็กภายนอกภายใต้เงื่อนไข (I) ให้กับหัวอ่านที่ให้ความร้อนนั้น ความเป็นแม่เหล็กของ FL ก็น่าจะมีการอึดตัวเช่นกัน เพราะฉะนั้น ยอดของสัญญาณรบกวนที่ปรากฏขึ้นนั้นน่าจะเป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากชั้น RL/PL โดยปกติค่า H_{stiff} ของ RL/PL จะมีค่าสูงเป็นเหตุให้ความถี่เรโซแนนซ์ f_p นั้นสูงเกิน 10 GHz แต่ในกรณีที่หัวอ่านได้รับความร้อนจากภายนอก ส่งผลให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของชั้น RL/PL นั้นปรากฏอยู่ในย่านความถี่ระดับต่ำกว่า 10 GHz อันเนื่องมาจากค่า H_{EB} ลดลงอันเนื่องมาจากความร้อน (7,17) จึงส่งผลให้ค่าสนามความแข็ง H_{stiff} ของชั้น RL/PL ลดลงตามสมการที่ [1] ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ลดระดับลงมาที่ความถี่ต่ำลง และแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น ตามสมการที่ [2] และ [4]



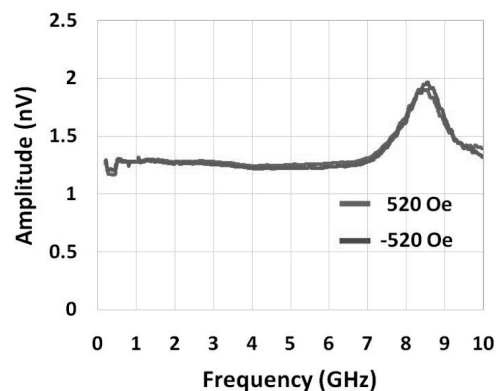
รูปที่ 6. เปรียบเทียบแอมพลิจูดและความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านปกติ (normal) และหัวอ่านที่ได้รับความร้อน (HA) ที่วัดได้จากเงื่อนไข (I)

ผลทางสถิติของหัวอ่านระดับสไลเดอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังกราฟที่ 6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ยอดแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านสภาวะปกติ (อุณหภูมิห้อง) จำนวน 49 สไลเดอร์ และหัวอ่านที่ได้รับความร้อนจากภายนอกจำนวน 49 สไลเดอร์ หัวอ่านที่ได้รับความร้อนจากภายนอกนั้นเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ภายใต้เงื่อนไขที่ (I) ทั้ง 49 หัว (100%) ที่ความถี่

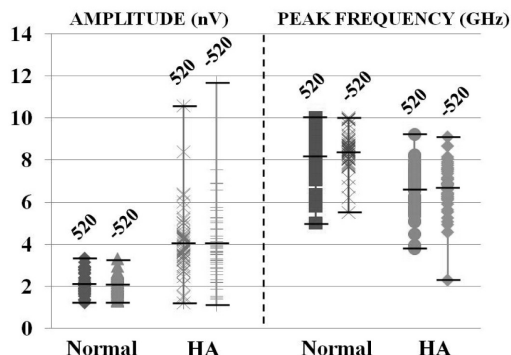
เฉลี่ย 9.10 GHz โดยมีความเฉลี่ยของ ยอดแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน ณ ความถี่เรโซแนนซ์ $v_{np} \approx 1.99$ nV ขณะที่กรณีหัวอ่านปกติจำนวน 49 สไลเดอร์นี้ มีหัวอ่านจำนวน 36 หัว (73.5%) ที่แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน v_{np} นั้นมีเพียง background noise ซึ่งไม่ปรากฏยอดของสัญญาณรบกวน ณ ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ซึ่งเหตุผลนั้นได้ชี้แจงแล้วในข้างต้น อย่างไรก็ตามมีหัวอ่านจำนวน 13 หัวแม้ไม่ผ่านการให้ความร้อนแต่ยังปรากฏเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ภายใต้เงื่อนไขที่ (I) ที่ความถี่เฉลี่ย 9.60 GHz และค่าเฉลี่ยยอดแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน $v_{np} \approx 1.49$ nV ซึ่งน่าจะเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในการปลูกแผ่นฟิล์มบางเป็นเหตุให้ exchange bias field, H_{EB} ซึ่งเป็นผลของชั้น RL/PL ของหัวอ่านบางตัวนั้นมีค่าน้อยกว่าหัวอ่านตัวอื่นแม้จะอยู่ในบาร์เดียวกัน จึงเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่ (I) แม้ไม่ได้รับความร้อนจากภายนอกก็ตาม

เงื่อนไข (II)

เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กตามเงื่อนไขที่ (II) พบว่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่ระดับ 520 Oe และ -520 Oe ในทิศทางขนานกับความเป็นแม่เหล็กชั้น RL พบว่าสัญญาณรบกวนที่วัดได้ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7. สัญญาณรบกวน mag-noise ที่วัดได้จากเงื่อนไข (II) ของหัวอ่านปกติที่ไม่ได้รับความร้อน



รูปที่ 8. เปรียบเทียบยอดแอมพลิจูด v_{np} และ ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านปกติและหัวอ่านที่ได้รับความร้อน ที่วัดได้จากเงื่อนไข (II)

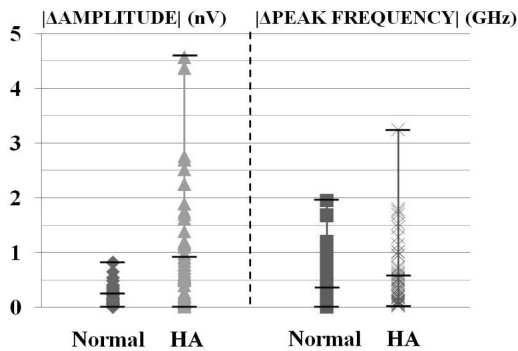
จากรูปที่ 8 แสดงค่าของยอดแอมพลิจูด v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวน mag-noise ในหัวอ่านปกติและหัวอ่านที่ได้รับความร้อน ซึ่งค่าเฉลี่ยยอดแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน v_{np} และค่าเฉลี่ยความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของหัวอ่านปกติและของหัวอ่านที่ได้รับความร้อนภายนอก เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็กตามเงื่อนไขที่ (II) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. แสดงค่าเฉลี่ยของยอดแอมพลิจูด v_{np} และ ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวนของหัวอ่านปกติและหัวอ่านที่ได้รับความร้อน ที่วัดได้จากเงื่อนไข (II)

FMR parameter	ค่าเฉลี่ยยอดแอมพลิจูด v_{np}		ค่าเฉลี่ย ความถี่เรโซแนนซ์ f_p	
H_c (Oe)	520	-520	520	-520
หัวอ่านปกติ (ไม่ได้รับความร้อน)	2.14 nV	2.11 nV	8.21 GHz	8.46 GHz
หัวอ่านที่ได้รับความร้อน	4.02 nV	4.00 nV	6.61 GHz	6.71 GHz

ผลทดสอบลักษณะเฉพาะทางเฟอร์โรแมกเนติก-เรโซแนนซ์ (ferromagnetic resonance) เบื้องต้นของหัวอ่านปกติจำนวน 49 สไลเดอร์ กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก พบว่าค่าเฉลี่ยความถี่เรโซแนนซ์ $f_p \gg 8.31$ GHz ซึ่งเป็นความถี่ของชั้น FL และเมื่อพิจารณาผลการทดลองของหัวอ่านปกติในเงื่อนไขที่ (II) พบว่าจากค่าเฉลี่ยของความถี่เรโซแนนซ์ f_p เมื่อจ่ายสนามแม่เหล็ก 520 Oe เท่ากับ 8.21 GHz และที่ -520 Oe เท่ากับ 8.46 GHz ซึ่งปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่เครื่อง FMRA ตรวจจับได้นี้ก็ควรจะเป็นของชั้น FL ด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองในรูปที่ 8 พบว่าสัญญาณรบกวนของหัวอ่านที่ได้รับความ

ร้อนภายนอกมียอดแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่าหัวอ่านปกติประมาณ 1.9 เท่า และความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของหัวอ่านที่ได้รับความร้อนภายนอกต่ำกว่าหัวอ่านปกติ แสดงให้เห็นว่าหัวอ่านที่ผ่านการให้ความร้อนนั้น แม้จะทำการวัดลักษณะเฉพาะของหัวอ่านหลังจากการเย็นตัวของหัวอ่านแล้วพบว่าค่าสนามความแข็งดิ่งยังผลของชั้น FL นั้นลดลง ซึ่งวิเคราะห์ได้จาก ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของหัวอ่านที่ผ่านความร้อนนั้นลดลงและสอดคล้องกับการเพิ่มระดับยอดแอมพลิจูด v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ด้วย



รูปที่ 9. เปรียบเทียบความแตกต่างของแอมพลิจูดและความแตกต่าง ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของสัญญาณรบกวนที่วัดได้จากเงื่อนไข (II)

ผู้วิจัยได้นำผลต่างของยอดแอมพลิจูด v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ f_p มาแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 9 เพื่อวิเคราะห์ผลจากความไม่สมมาตร (asymmetry) ซึ่งอาจเกิดจากค่าสนาม HB ลดลง (18-19) อันเนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่หัวอ่าน เป็นเหตุให้ความร้อนนั้นส่งผ่านไปยังสนาม HB ด้วยเช่นกัน เมื่อสนาม HB ได้รับความร้อนแล้วนั้นจะเกิดผลที่ตามมาสองกรณีด้วยกันคือ กรณีที่หนึ่งคือ พลั๊กแม่เหล็กของ HB จะกลับมามีค่าเท่าเดิมเมื่อลดอุณหภูมิลง และกรณีที่สองคือ ความร้อนจะทำให้สนาม HB เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในตัววัสดุ ส่งผลทำให้เมื่อลดอุณหภูมิลงแล้วพลั๊กแม่เหล็กจะมีค่าลดลงจากเดิม (20) การที่ผลต่างของยอดแอมพลิจูด v_{np} และความถี่เรโซแนนซ์ f_p ของหัวอ่านที่ได้รับความร้อนนั้น มีค่าที่สูงขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าระดับแนว (alignment) ของความเป็นแม่เหล็กของชั้น FL นั้นไม่อยู่ในมุมมองปกติ (มุมฉากกับ RL) พิจารณาได้จากผลต่างของ v_{np} และ f_p กรณีที่ให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก ± 520 Oe ซึ่งสะท้อนถึงค่าสนามความแข็งตึงยังผล H_{stiff} ของชั้น FL ที่แสดงในสมการ [1] นั้นมีค่าไม่เท่ากันกรณีสนามแม่เหล็กจากภายนอก ± 520 Oe ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าระดับแนว (alignment) ของความเป็นแม่เหล็กของชั้น FL นั้นไม่อยู่ในมุมมองปกติ ซึ่งน่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงด้าน

กายภาพของวัสดุ ทำให้ค่าสนาม HB เปลี่ยนแปลงอย่างถาวรอันเนื่องมาจากความร้อนและเมื่อ H_{stiff} ลดลงจะส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ f_p ลดระดับลงมาที่ความถี่ต่ำลง แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ [2] และ [4] ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพของความเป็นแม่เหล็กใน FL ลดลง (21)

4. สรุป

การศึกษาผลของความร้อนจากภายนอกต่อคุณลักษณะของหัวอ่าน TMR โดยใช้เทคนิค FMR โดยมีการให้สนามแม่เหล็กจากภายนอก 2 กรณี ดังนี้ เงื่อนไข (I) ให้สนามแม่เหล็กภายนอก 750 Oe ถึง 1,200 Oe ทิศทางเดียวกับสนาม HB เพื่อวิเคราะห์ชั้น RL/PL และในเงื่อนไข (II) จ่ายสนามแม่เหล็ก ± 520 Oe ทิศทางขนานกับความเป็นแม่เหล็ก RL เพื่อวิเคราะห์ชั้น FL ผลการทดลองสรุปได้ว่าความร้อนจากภายนอกนั้นส่งผลกระทบถึงเสถียรภาพของหัวอ่าน คือ

1. ค่า exchange bias field, H_{EB} ที่เกิดระหว่างชั้น PL และ AFM นั้นลดลง เป็นเหตุให้หัวอ่านนั้นอาจเกิดการอ่านข้อมูลผิดพลาดอันเนื่องมาจากการกลับทิศความเป็นแม่เหล็กของชั้นอ้างอิง RL
2. ความไม่สมมาตร (asymmetry) ของหัวอ่าน ซึ่งเกิดจากการคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของ HB นั้นเปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากการได้รับความร้อนจากภายนอก ซึ่งสะท้อนมายังค่าความถี่เรโซแนนซ์นั้นจะมีค่าไม่คงที่กรณีที่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากันแต่ทิศทางตรงกันข้ามกัน เป็นผลจากการที่สนาม HB เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติไปหลังจากได้รับความร้อนภายนอก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบขอบคุณบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Fukumoto Y, Shimura K, Kamijo A, Tahara S, and Yoda H. High thermal stability of magnetic tunnel junctions with oxide diffusion barrier layers. *Appl. Phys. Lett.* 2004;84(2): 223-35.
- (2) Li F, Sharif R, Jiang L, Zhang X, Han X, Wang Y, et al. Thermal stability of Ir-Mn/Co-Fe-B/Al-O/Co-Fe-B tunnel junctions. *J. Appl. Phys.* 2005;98(113710):1-4.
- (3) Liu X, Mazumdar D, Shen W, Schrag B, and Xiao G. Thermal stability of magnetic tunneling junctions with MgO barriers for high temperature spintronics. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89(023504): 1-3.
- (4) Mazumdar D, Liu X, Schrag B, Shen W, Carter M, and Xiao G. Thermal stability, sensitivity, and noise characteristics of MgO-based magnetic tunnel junction. *J. Appl. Phys.* 2007;101: 09B5021-6.
- (5) Baril L, Higgins B, and Wallash A. Effects of ESD transients on noise in tunneling recording heads. *J. Electrostat.* 2006;64: 147-50.
- (6) Taratorin A. Measurement of effective free layer magnetization orientation of TMR sensors. *IEEE Trans. Magn.* 2009;45(10): 3449-52.
- (7) Heinonen O and Cho H. Thermal Magnetic Noise in Tunneling Readers. *IEEE Trans. Magn.* 2004;40(4): 2227-32.
- (8) Han G, Zheng Y, Liu Z, Liu B, and Mao S. Field dependence of high-frequency magnetic noise in tunneling magnetoresistive heads. *J Appl Phys.* 2006;100(063912):1-6.
- (9) Zhou Y, Roesler A, and Zhu J. Experimental observations of thermally excited ferromagnetic resonance and mag-noise spectra in spin valve heads. *J Appl Phys.* 2002;91(10): 7276-78.
- (10) Stutzke N, Burkett S, and Russek S. High-frequency noise measurements in spin-valve devices. *J Vac Sci Technol.* 2003;A21: 1167-71.
- (11) Klaassen K, Xing X, and Peppen J. Broad-Band Noise Spectroscopy of Giant Magnetoresistive Read Heads. *IEEE Trans. Magn.* 2005;41(7): 2307-17.
- (12) Han G, Zong B, Liu K, Wu Y, and Mao S. Temperature dependence of Thermally Activated Ferromagnetic Resonance in Tunneling Magnetoresistive Heads. *IEEE Trans. Magn.* 2007;43(2):819-21.
- (13) Stutzke N, Burkett S, and Russek S. Temperature and field dependence of high-frequency magnetic noise in spin valve devices. *Appl. Phys. Lett.* 2003;82(1): 91-3.
- (14) Lamy Y, Viala B, and Prejbeanu I. Temperature Dependence of magnetic properties of AF-Biased CoFe Films with High FMR. *IEEE Trans. Magn.* 2005;41(10): 3517-19.
- (15) The frequency of mobile phone in Thailand. [Internet] 2009 Nov. 15 [Update 2010 Aug. 13; cited 2013 Jan. 13]. Available from: http://www2.m108.com/jma/index.php?option=com_content&view=article&id=64:2010-08-13-01-45-12&catid=34:2010-08-07-06-52-26&Itemid=55
- (16) Jury J, Klaassen K, Peppen J, and Wang S. Measurement and Analysis of Noise Sources in Giant Magnetoresistive Sensors Up to 6 GHz. *IEEE Trans. Magn.* 2002;38(5): 3545-55.
- (17) Akimoto H, Kanai H, and Uehara Y. Analysis of thermal magnetic noise in spin-valve GMR heads by using micromagnetic simulation. *J. Appl. Phys.* 2005;97: 10N7051-3.
- (18) Miyatake M, Kugiya F, and Kodama N. Read Performance Reliability in TMR Head. *IEEE*

- Trans. Magn. 2012;12(1): 24-30.
- (19) Matsugi J, Mizoh Y, Nakano T, Nakamura K, and Sakakima H. ESD Phenomena in GMR Heads in the Manufacturing Process of HDD and GMR Heads. IEEE Trans. Magn. 2005;28(3): 206-12.
 - (20) Cullity B, and Graham C. Introduction to magnetic materials, 2nd ed. New Jersey; JohnWiley & Sons: 2009.
 - (21) Zeng T, Zhou Y, Lin K, Lai P, and Pong P. Edge Effect on Thermally Excited Mag-Noise in Magnetic Tunnel Junction Sensors. IEEE Trans. Magn. 2012;48(11): 2831-34.