

การศึกษาวิจัยเชิงทดลองของกระบวนการเขียนและอ่าน
ในการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย

AN EXPERIMENTAL STUDY OF WRITE AND READ PROCESS
IN HEAT ASSISTED MAGNETIC RECORDING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564
KMITL-2021-EN-D-018-026

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN EXPERIMENTAL STUDY OF WRITE AND READ PROCESS
IN HEAT ASSISTED MAGNETIC RECORDING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL-2021-EN-D-018-026

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาวิจัยเชิงทดลองของกระบวนการเขียนและอ่านในการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย |
| ชื่อนักศึกษา | นายณัฐพล ไชยดวงศรี |
| รหัสประจำตัว | 59601313 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2564 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล |

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยเป็นเทคนิคการบันทึกที่สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่เอาชนะขีดจำกัดของเทคโนโลยีการบันทึกแบบตั้งฉาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีนี้สามารถเพิ่มความหนาแน่นแทร็คทำได้แล้วแต่การเพิ่มความหนาแน่นบิตจำเป็นที่จะศึกษาและพัฒนา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยที่เป็นอุปสรรคในการพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยด้วยการทดสอบชิ้นส่วนต้นแบบกับเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์ ผลการศึกษาพบว่าผลกระทบจากสัญญาณพื้นหลังส่งผลต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงถึง 2.17 dB เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีสัญญาณพื้นหลัง นอกจากนี้งานวิจัยได้นำเสนอวิธีที่สามารถลดผลกระทบสัญญาณพื้นหลังคือการลดความหนาแน่นระบายความร้อนให้บางลง ซึ่งพบว่าสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้ถึง 0.5 dB เมื่อเทียบกับกรณีชั้นระบายความร้อนแบบหนา สุดท้ายนี้ผลการศึกษาจะมีส่วนช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยให้เพิ่มความหนาแน่นบิตต่อตารางนิ้วให้สูงขึ้นในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------|---|
| Thesis Title | An experimental study of write and read process in Heat Assisted Magnetic Recording |
| Student | Mr. Nuttapon Chaiduangstri |
| Student ID. | 59601313 |
| Degree | Doctor of Engineering |
| Program | Electrical Engineering |
| Year | 2021 |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr.Somyot Kaitwanidvilai |

ABSTRACT

Heat assist magnetic recording (HAMR) is a promising technique due to the higher areal density compared to conventional perpendicular magnetic recording (PMR). However, following the literature review found that this technology needs to be developed and investigated to increase the bit density while track density can be achieved. In this research, the purpose is to investigate a novel limiting factor of HAMR areal density growth via the prototype HAMR component and a spin-stand experiment. The ensemble waveform of signal to noise ratio measurement shows that the HAMR technology faces the background interference impact (BGI). The SNR loss is about 2.17dB when compared between the AC erase and PRBS pattern background. To improve the BGI impact, the thinner heat sink layer can reduce BGI impact for 0.5 dB relative to the thicker heat sink layer condition. Finally, the result of this work expects to support the HAMR technology development to achieve an ultra-high areal density technique in the future.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จึงขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ดำรงศักดิ์ ทองสมพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำการวิจัย รวมถึงความเอื้อเฟื้อและช่วยเหลือในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการจัดทำและนำเสนอผลงานทางวิชาการแก่ผู้วิจัยตลอดมา

โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) หมายเลขทุน PHD60I0070 บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนด้านทุนการศึกษาครั้งนี้

คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับคุณเรืองศักดิ์ ไชยดวงศรี และพรรณิ ไชยดวงศรี ผู้เป็นบิดาและมารดา ครอบครัวและคุณฐิตวดี ประดับคำซึ่งเป็นที่รักยิ่ง รวมถึงเพื่อนร่วมงาน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและสนับสนุน ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยมาตลอด รวมถึงผู้บังคับบัญชาในสายงานที่เปิดโอกาสให้ได้เข้าศึกษาในหลักสูตรนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นายณัฐพล ไชยดวงศรี

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VI |
| สารบัญรูป | VII |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการทำวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย | 6 |
| 1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตงานวิจัย | 6 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 7 |
| 1.5 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ | 7 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 8 |
| 2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ | 8 |
| 2.2 การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย | 10 |
| 2.3 กระบวนการเขียนและอ่าน | 12 |
| 2.3.1 กระบวนการเขียนบันทึก | 12 |
| 2.3.2 กระบวนการอ่านกลับ | 16 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 18 |
| 2.4.1 การผันแปรของ H_k (H_k variation) | 18 |
| 2.4.2 การผันแปรของอุณหภูมิคูรีบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก (T_c variation) | 20 |
| 2.4.3 ความแปรปรวนของอุณหภูมิจากหัวเขียน (temperature variation) .. | 23 |
| 2.4.4 ความโค้งงอของรอยต่อระหว่างบิต (transition curvature) | 27 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 เครื่องมือวิจัยและกระบวนการทดลอง | 30 |
| 3.1 หัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็ก..... | 30 |
| 3.2 เครื่องทดสอบสปินสแตนด (spin-stand tester) | 32 |
| 3.3 รูปแบบการบันทึกข้อมูล..... | 34 |
| 3.3.1 รูปแบบข้อมูลความถี่เดียว (single tone frequency pattern) | 34 |
| 3.3.2 รูปแบบข้อมูลแบบสุ่ม (pseudo random bit sequence pattern) ... | 36 |
| 3.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) | 38 |
| 3.4.1 การจำแนกคลื่นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน | 38 |
| 3.4.2 การวิเคราะห์ไตบิต (dibit extraction) | 39 |
| 3.5 การวัดความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density)..... | 40 |
| 3.6 การออกแบบแทร็ก (Track layout) | 41 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล | 42 |
| 4.1 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background interference: BGI)..... | 42 |
| 4.1.1 กระบวนการทดลอง..... | 42 |
| 4.1.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์ | 43 |
| 4.1.3 สรุปผลทดลองศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง | 48 |
| 4.2 ผลกระทบความหนาแน่นระบายความร้อนที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง..... | 49 |
| 4.3 ผลกระทบความหนาแน่นอินเทอร์เลเยอร์ที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง..... | 52 |
| 4.4 ผลกระทบของรูปแบบข้อมูลที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง..... | 55 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 58 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 59 |
| เอกสารอ้างอิง | 60 |
| ภาคผนวก | 63 |
| ประวัติผู้เขียน | 81 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของแผ่นบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย | 32 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 คำจำกัดความพื้นฐานในการบันทึกแม่เหล็ก..... | 2 |
| 1.2 แนวโน้มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 3 |
| 1.3 ขีดจำกัดการพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลจากปรากฏการณ์แม่เหล็กพาราอียิงวด..... | 4 |
| 2.1 Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC)..... | 9 |
| 2.2 ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์..... | 10 |
| 2.3 แผนภาพกระบวนการบันทึกแม่เหล็กเทคโนโลยี HAMR..... | 12 |
| 2.4 สนามแม่เหล็กในแท่งแม่เหล็กพันด้วยขดลวด..... | 13 |
| 2.5 การไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก..... | 14 |
| 2.6 การจำลองการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก..... | 15 |
| 2.7 ลูป M-H ฮิสเทอรีซิส..... | 15 |
| 2.8 การจำลองโครงสร้างหัวอ่าน..... | 17 |
| 2.9 การจำลองสัญญาณอ่านกลับ..... | 17 |
| 2.10 H_k ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีการกระจายแบบ Gaussian ที่ทุกๆอุณหภูมิ..... | 18 |
| 2.11 SNR กับสนามแม่เหล็กสำหรับ H_k ที่แตกต่างกัน ภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิ 3 K/nm และ 6 K/nm ขนาดเกรน 5 nm..... | 19 |
| 2.12 แมกนีไทเซชันที่มีการผันแปร H_k 20% ภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิ 15 K/nm..... | 19 |
| 2.13 แผนภาพ H_k กับอุณหภูมิที่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรี เป็น -5% +5% และไม่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรี..... | 20 |
| 2.14 กำลังสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีเป็น 0% 5% 10% และ 15% ภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิ 9 K/nm และ 18 K/nm..... | 21 |
| 2.15 โดเมนแม่เหล็กของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีเป็น 0% 5% 10% และ 15% ตามลำดับ..... | 22 |
| 2.16 SNR กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน..... | 22 |
| 2.17 สัญญาณรบกวนบริเวณรอยต่อระหว่างบิตกับ SNR ที่มีสัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิคูรีและ H_k | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.18 | แผนภาพของ NFT อยู่เหนือเกรนแม่เหล็ก และปัจจัยที่มีผลต่ออุณหภูมิของเกรนขณะกระบวนการให้ความร้อน..... 24 |
| 2.19 | SNR กับสนามแม่เหล็กที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันคือ 0% 2% 4% และ 6% ตามลำดับ..... 24 |
| 2.20 | โดเมนแม่เหล็กจากการบันทึกด้วยเกรเดียนท์อุณหภูมิเป็น 15 K/nm และขนาดเกรน 5 nm ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะให้ความร้อน และมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 6%..... 25 |
| 2.21 | แผนภาพผลกระทบของการบันทึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิคูรี..... 26 |
| 2.22 | ค่า SNR ที่เหมาะสมที่ 1 MFCI กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิคูรีและอุณหภูมิในการบันทึก..... 26 |
| 2.23 | โปรไฟล์ความร้อนสี่เหลี่ยมและกลม มีเกรเดียนท์อุณหภูมิเป็น 6 K/nm 27 |
| 2.24 | SNR กับความหนาแน่นเชิงเส้นที่ความกว้างหัวอ่านเท่ากับความกว้างในการเขียนของสัญญาณที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและกลม..... 28 |
| 2.25 | (ซ้าย) ขนาดสนามแม่เหล็กคงที่ในแนวขวางแทร์ค (ขวา) ขนาดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงในแนวขวางแทร์ค บันทึกด้วยโปรไฟล์ความร้อนวงกลมจะทำให้ได้รูปร่างบิตที่แตกต่างกัน..... 29 |
| 2.26 | แผนภาพที่ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามแม่เหล็กในแนวขวางแทร์ค. 29 |
| 3.1 | ภาพถ่าย SEM และถ่ายด้วยกล้องของตัวอย่างหัวบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย..... 31 |
| 3.2 | แผ่นบันทึกแม่เหล็ก (ซ้าย) โครงสร้างแผ่นบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย (ขวา)..... 31 |
| 3.3 | เครื่องมือทดลองสปินสแตนด์..... 33 |
| 3.4 | ตัวอย่างการเคลื่อนที่หัวบันทึกขณะทำงาน 33 |
| 3.5 | กระบวนการทำงานเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์..... 34 |
| 3.6 | ตัวอย่างคลื่นสัญญาณข้อมูลความถี่เดียว แบบความถี่ 10 MHz..... 35 |
| 3.7 | ภาพจำลองบิตข้อมูลที่เขียนด้วยรูปแบบความถี่เดียว..... 35 |
| 3.8 | ชุดบิตข้อมูลแบบเสมือนจริง..... 36 |
| 3.9 | สัญญาณอุดมคติชุดบิตข้อมูลแบบเสมือนจริง..... 37 |
| 3.10 | สัญญาณอ่านกลับชุดบิตข้อมูลแบบเสมือนจริง 37 |
| 3.11 | ภาพจำลองแมกนิไทเซชันที่บันทึกข้อมูลรูปแบบ PRBS ต่อเนื่อง 50 ชุด 38 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.12 สัญญาณอ่านกลับของข้อมูล รูปแบบ PRBS ต่อเนื่อง 50 ชุด | 38 |
| 3.13 สัญญาณข้อมูลที่ปราศจากการสัญญาณรบกวนทางเวลา | 39 |
| 3.14 สัญญาณรบกวนทางเวลา..... | 39 |
| 3.15 สัญญาณข้อมูลที่ไม่มีการรบกวนและสัญญาณรบกวนเชิงพื้นที่ | 39 |
| 3.16 กระบวนการ cross-correlation ระหว่างสัญญาณต้นแบบและสัญญาณอ่านกลับ..... | 40 |
| 3.17 รูปแบบแนวบันทึกที่ใช้ทดสอบ (1) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (2) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง (3) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ (4) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง..... | 42 |
| 4.1 รูปแบบการบันทึกที่ใช้ทดสอบ (a) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (b) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแตร็คเคียงทั้งสองข้าง (c) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ (d) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง..... | 43 |
| 4.2 ผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลังบนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ระยะห่างระหว่างแตร็คต่างๆ ในการบันทึกแม่เหล็กแบบความรั้นช่วย | 44 |
| 4.3 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง..... | 45 |
| 4.4 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง..... | 45 |
| 4.5 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง.. | 46 |
| 4.6 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง | 47 |
| 4.7 การวัดค่า BER เมื่อบันทึกรูปแบบทั้ง 4 แบบ 1) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง 2) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง 3) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ 4) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง | 47 |
| 4.8 การจำลองโครงสร้างหัวอ่านขณะอ่านข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง | 48 |
| 4.9 ภาพสองมิติจากการประมวลสัญญาณอ่านกลับที่มีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง | 48 |
| 4.10 โครงสร้างแผ่นบันทึกแม่เหล็กแสดงถึงชั้นระบายความร้อน | 49 |
| 4.11 ภาพจำลองรูปแบบการบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากความหนาชั้นระบายความร้อน (ซ้าย) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (ขวา) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง | 49 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.12 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการของเลเซอร์สำหรับแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีความหนาชั้นระบายความร้อนเงื่อนไขต่างๆ..... | 50 |
| 4.13 ผลกระทบของความหนาชั้นระบายความร้อนต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน | 51 |
| 4.14 ผลต่างของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างไม่มีข้อมูลพื้นหลังและมีข้อมูลพื้นหลังที่ความหนาชั้นระบายความร้อนต่างๆ..... | 51 |
| 4.15 กระบวนการทดลอง..... | 52 |
| 4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าของเลเซอร์สำหรับแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบต่างๆ..... | 53 |
| 4.17 ผลกระทบของความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ต่อ BER | 54 |
| 4.18 ผลต่างของ BER ระหว่างไม่มีสัญญาณข้อมูลพื้นหลังและมีสัญญาณข้อมูลพื้นหลังที่ความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ต่างๆ..... | 54 |
| 4.19 รูปแบบการบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากรูปแบบข้อมูล (a) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (b) สัญญาณพื้นหลังแบบความถี่เดียว (c) สัญญาณพื้นหลังแบบ PRBS . | 55 |
| 4.20 ผลการวัด BER ของรูปแบบการบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแทร็คที่แตกต่างกัน..... | 56 |
| 4.21 ผลต่างของ BER ระหว่างแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลังและรูปแบบการบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแทร็คที่แตกต่างกัน..... | 56 |
| 4.22 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเมื่อบันทึกรูปแบบข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแทร็คที่แตกต่างกัน..... | 57 |
| 4.23 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์เมื่อบันทึกรูปแบบข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแทร็คที่แตกต่างกัน | 57 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของการทำวิจัย

ภาคอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทยอย่างมาก ปัจจุบันมีส่งออกเป็นอันดับที่ 13 ของโลก คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 24.3 ของมูลค่าการส่งออกสินค้าทั้งหมดของประเทศ และก่อให้เกิดการจ้างงานรวมทั้งสิ้นมากกว่า 750,000 คน [1] เมื่อพิจารณาอย่างเฉพาะเจาะจงพบว่าอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างงาน สร้างรายได้ให้ประเทศที่สำคัญคือ อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์บันทึกแม่เหล็กหรือฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive: HDD) ซึ่งประเทศไทยมีสัดส่วนการส่งออกคิดเป็นร้อยละ 82 ของมูลค่าการส่งออกทั่วโลก โดยประเทศไทยนั้นถือเป็นแหล่งผลิตที่สำคัญที่สุดในโลก เนื่องจากมีกำลังการผลิตที่มากที่สุด โดยมีถึงสองบริษัทชั้นนำของโลกเข้ามาประกอบกิจการโรงงานผลิต ได้แก่ ซีเกท เทคโนโลยี (Seagate Technology) และ เวสเทิร์น ดิจิตอล (western digital) ในแต่ละปีมีการจ้างพนักงานมากกว่าหนึ่งแสนอัตรา ด้วยความเชื่อมั่นในศักยภาพของความสามารถของแรงงานไทย งานวิจัยและค่าใช้จ่ายในการลงทุนพัฒนาจากประเทศไทย ทำให้ประเทศไทยจึงได้กลายเป็นฐานผลิตที่สำคัญ [2]

เมื่อก้าวถึงอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลในยุคปัจจุบัน สิ่งแรกผู้ใช้งานจะนึกถึงคือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลในรูปแบบแม่เหล็ก) จุดเด่นคือความหนาแน่นเชิงพื้นที่หรือความหนาแน่นบิตสูง การเข้าถึงข้อมูลอย่างรวดเร็ว และราคาต่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ถูกที่สุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลชนิดอื่น ดังนั้นจึงมีการใช้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลายเช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ระบบฐานข้อมูลต่างๆ เป็นต้น [3]

แม้ว่าภายหลังความต้องการฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะลดน้อยลงจากความต้องการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ลดลง หันไปใช้แท็บเล็ตและสมาร์ตโฟนมากขึ้น ภายใต้สถานการณ์ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ทวีความรุนแรงอย่างต่อเนื่อง ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังคงมีความท้าทายต่อความต้องการอุปกรณ์บันทึกแม่เหล็กความจุสูง เพราะโลกกำลังเข้าสู่ยุคการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 หรือ Industry 4.0 [4] ที่มุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาใช้ในการประกอบกิจการ ปัจจุบันองค์กรส่วนใหญ่ใช้พื้นที่บนฮาร์ดดิสก์เพียง 30-40 % เท่านั้น ทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุนด้านไอที โดยจะมุ่งเน้นการเก็บข้อมูลไว้ที่ “การจัดเก็บข้อมูลแบบกลุ่มเมฆ (cloud storage)” เป็นการทำงานโดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่มากมายบนเครือข่าย เพียงแค่เชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย โดยไม่ต้องสนใจว่าทรัพยากรที่ใช้ั้นจะมาจากที่ใด ต่างระบบเครือข่าย ทั้งที่อยู่ใกล้ๆ หรือไกลออกไป ดังนั้น cloud จึงตอบโจทย์ทำให้บริษัทสามารถลดต้นทุนได้ค่อนข้างมาก จากการคาดการณ์ของบริษัทวิจัย International Data Corporation (IDC) [5] การเติบโตดังกล่าวคิดเป็นอัตราการเติบโตเฉลี่ย 30% ต่อปี ทำให้ปริมาณการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะไม่สูงเท่าเดิมแต่ราคาต่อหน่วยจะเพิ่มสูงขึ้น

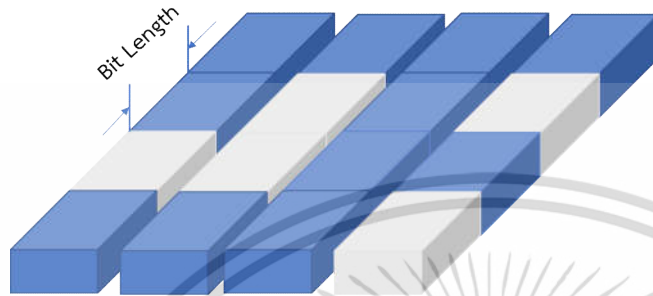
การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal density: ADC) สามารถทำได้สองรูปแบบ คือ (1) เพิ่มจำนวนบิตข้อมูลต่อหนึ่งนิ้ว (Bit per inch: BPI) และ (2) เพิ่มจำนวนแทร็คต่อหนึ่งนิ้ว (Track per inch: TPI) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 กล่าวอย่างง่ายคือ การลดขนาดของบิตข้อมูลให้เล็กลงที่สุดเท่าที่จะสามารถบันทึกข้อมูลได้โดยต้องรักษาได้นานเกิน 5-10 ปี ปัจจุบันการพัฒนาความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเพิ่มขึ้นได้เพียง 10-20% ต่อปี เป็นอัตราที่ยังไม่สอดคล้องกับความต้องการในการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเก็บข้อมูลดิจิทัลที่กล่าวมา [5] ดังนั้นจึงเป็นปัญหาที่ภาคอุตสาหกรรมและนักวิจัยที่จะต้องพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สอดคล้องกับความต้องการที่เกิดขึ้น

Bit

บิต คือ หน่วยที่เล็กที่สุดของการบันทึกข้อมูล ซึ่งบันทึกในลักษณะเลขฐาน 2

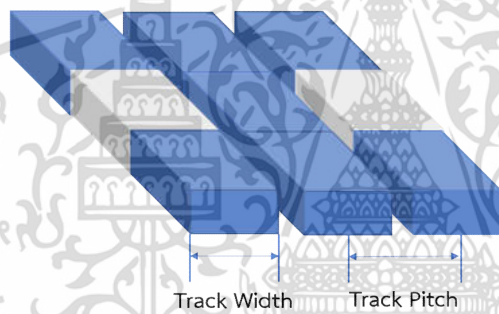


Bit Length คือระยะระหว่างบิตที่น้อยที่สุด

Bit Density คือจำนวนบิตต่อหนึ่งนิ้ว หรือ Linear Density มีหน่วยเป็นบิตต่อนิ้ว (Bit per inch, BPI)

Track

แทร็ค คือ แถวหรือแนวบันทึกของข้อมูลบนแผ่นเก็บข้อมูล (media)



Track Width คือความกว้างของแทร็ค

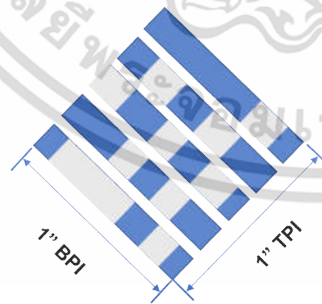
Track Pitch คือระยะระหว่างแทร็ค

Track Density คือจำนวนแทร็คในหนึ่งนิ้ว มีหน่วยเป็นแทร็คต่อนิ้ว (Track per inch, TPI)

Track Spacing คือระยะความกว้างของแทร็ค รวมกับความกว้างของแนวลบข้อมูล (Erase Band)

Areal Density

ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ คือ จำนวนบิตข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยตารางนิ้ว



คำนวณได้โดย

$$ADC = BPI \times TPI$$

มีหน่วยเป็นบิตต่อตารางนิ้ว (Bit per square inch, b/in²)

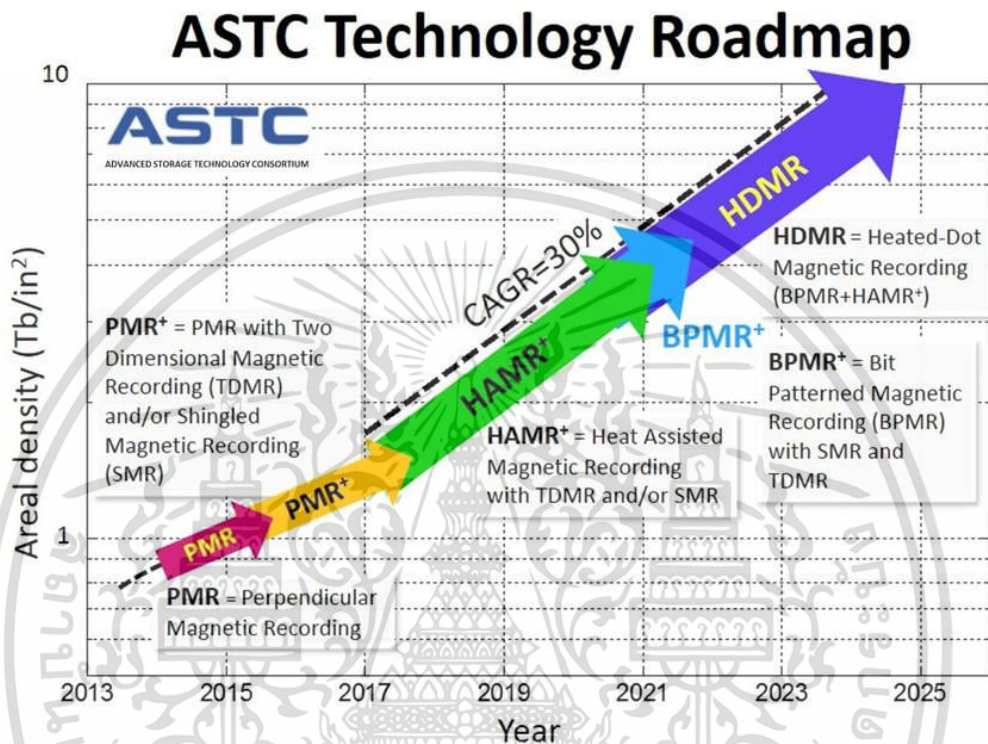
ดังนั้นการเพิ่มขนาดความจุของการบันทึกข้อมูลจึงสามารถทำได้โดยการเพิ่ม BPI หรือ TPI

รูปที่ 1.1 คำจำกัดความพื้นฐานในการบันทึกแม่เหล็ก [6]

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน มีความพยายามที่จะพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [7] เมื่อปี ค.ศ. 2005 ได้มีการเปลี่ยนเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวนอน (longitudinal magnetic recording: LMR) มาเป็นการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(perpendicular magnetic recording: PMR) ช่วยทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาทางทฤษฎี [8] คาดว่าขนาดสูงสุดของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ที่ใช้การบันทึกแม่เหล็กแบบ PMR จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 1 เทระบิต ต่อตารางนิ้ว (Tb/in^2) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 [9] เนื่องจากผลของปรากฏการณ์แม่เหล็กพาราอิมยวด (superparamagnetic) [10]



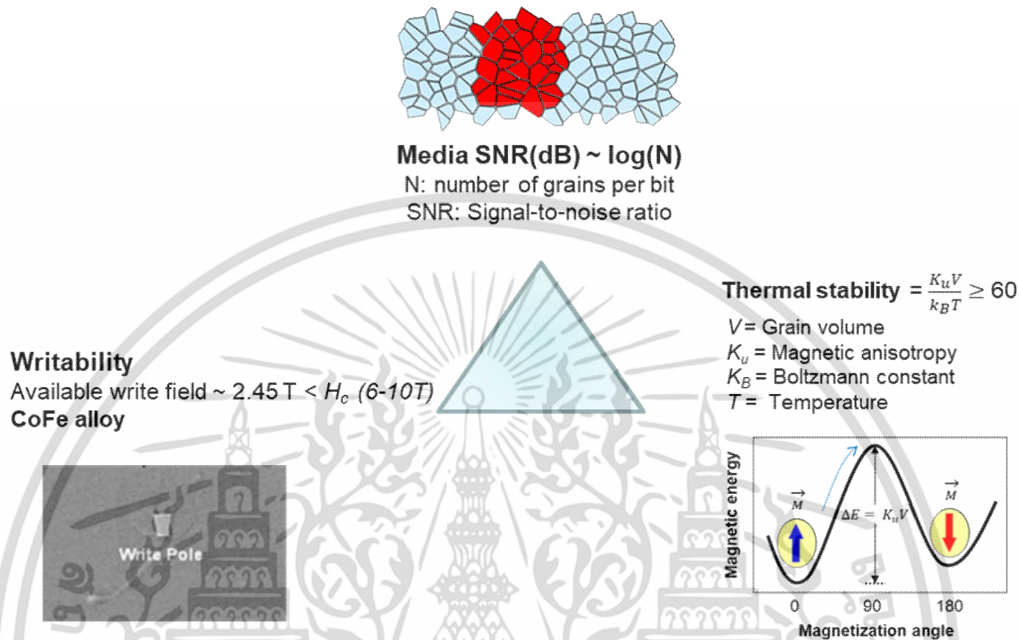
รูปที่ 1.2 แนวโน้มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [9]

ปรากฏการณ์แม่เหล็กพาราอิมยวด กล่าวคือ เมื่อลดขนาดเกรน (grain) ในแผ่นบันทึกแม่เหล็กต่ำกว่าขนาดวิกฤติ จะทำให้แผ่นบันทึกแม่เหล็กไม่สามารถรักษาทิศทางแมกนิไทเซชัน (magnetization: M) ที่จัดเก็บข้อมูลไว้ได้ และค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำลง (signal to noise ratio: SNR) ซึ่งเป็นอุปสรรคในการออกแบบการบันทึกแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง จึงต้องมีการชดเชยด้วยการใช้วัสดุแม่เหล็กของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก (magnetic anisotropy: K_u) ที่สูงกว่าเดิม อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแม่เหล็กสูงจะทำให้ค่าสนามลบล้างความเป็นแม่เหล็ก (coercivity) สูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนปกติไม่สามารถบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กได้ ดังรูปที่ 1.3

ความท้าทายสำหรับการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้มีขนาดสูงกว่า $1 \text{ Tb}/\text{in}^2$ กำลังเป็นที่สนใจของภาคอุตสาหกรรมและนักวิจัย [11] มีงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สูงกว่า $1 \text{ Tb}/\text{in}^2$ ได้ถูกนำเสนอ อาทิเช่น shingle magnetic recording [12,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13, 14] bit patterned media [15,16] microwave assisted magnetic recording [17] และ heat assisted magnetic recording [18-20] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีที่นำเสนอ ล้วนมีพื้นฐานจากการบันทึกแม่เหล็กในปัจจุบัน โดยเพิ่มเติมเทคนิคพิเศษช่วยในการบันทึกข้อมูลที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 1.3 ขีดจำกัดการพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูลจากปรากฏการณ์แม่เหล็กพารายิ่งยวด [21]

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่สาธิตและประสบความสำเร็จ ในการบันทึกแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงด้วยการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย (Heat Assisted Magnetic Recording: HAMR) งานวิจัยเหล่านั้นชี้ให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวมีโอกาสที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อุปกรณ์บันทึกแม่เหล็กในอนาคต ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาและพัฒนาในส่วนของ Near Field Transducer (NFT) ที่จะช่วยลดอุณหภูมิของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแม่เหล็กสูงให้เข้าใกล้อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) เพื่อเปลี่ยนสถานะแม่เหล็กของแผ่นบันทึกแม่เหล็กจากสถานะแม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism) กลายเป็นสถานะแม่เหล็กพารา (Paramagnetism) ชั่วคราว ทำให้สนามแม่เหล็กจากหัวบันทึกสามารถบันทึกลงแผ่นบันทึกแม่เหล็กได้

จากงานวิจัยจาก Alexander Q. Wu [22] ได้สาธิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยของ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี พบว่าการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย มีแนวโน้มความเป็นไปได้ที่จะนำมาพัฒนาใช้งานได้จริง ซึ่งผลิตภัณฑ์ต้นแบบได้ถูกทดสอบและนำเสนอ พบว่าสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้ถึง 1.007 Tb/in² โดยได้ความหนาแน่นบิตต่อนิ้ว 1975 kBPI และความหนาแน่นแทร็คต่อนิ้ว 510 kTPI ซึ่งเอาชนะขีดจำกัดของปรากฏการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กพารายิ่งยวดได้จริง ด้วยเหตุนี้การบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยจึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ที่ใช้ในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สูงกว่า 1 Tb/in^2

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยสามารถเอาชนะขีดจำกัดของปรากฏการณ์แม่เหล็กพารายิ่งยวดได้ แต่การพัฒนาเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้น จำเป็นต้องศึกษาเข้าใจคุณลักษณะของกระบวนการเขียนและอ่านข้อมูลอย่างลึกซึ้ง เพื่อใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพของการบันทึกข้อมูลไปพร้อมกับการรักษาความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล ที่สามารถเก็บข้อมูลที่มีค่าของผู้ใช้งานได้นานเกินกว่าห้าถึงสิบปี นอกจากนี้ยังมีหลายส่วนที่เปลี่ยนแปลงจากการบันทึกด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันที่จำเป็นต้องศึกษาเช่นกัน เช่น ระยะระหว่างหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็ก (head media to spacing: HMS) [23] ที่เปลี่ยนไปจากการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก ในแง่ของขนาดของเกรนที่ต้องลดขนาดและคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ซึ่งช่วยในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนต่างๆ เป็นต้น

การศึกษางานวิจัยของ C. Rea และคณะ [24] ได้รายงานผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยและการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก ด้วยเครื่องมือทดลองสปินสแตนดาร์ด (spin-stand tester) [25] พบว่า (1) ระดับสัญญาณอ่านกลับของเทคโนโลยี HAMR มีขนาดระดับที่ต่ำกว่า PMR ถึง 25% เนื่องจากผลของคุณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก HAMR ที่มีชั้นระบายความร้อนเพิ่มเข้ามา นอกจากนี้ (2) เมื่อเขียนบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย จุดความร้อน (heat spot) ที่มีรูปร่างลักษณะวงรีทำให้เกิดความโค้งรอยต่อระหว่างบิต (transition curvature) ส่งผลให้ความยาวบิตที่สูงกว่า PMR ประมาณ 4 นาโนเมตร จะเห็นว่าตัวอย่างปัจจัยเหล่านี้เอง HAMR จึงเผชิญขีดจำกัดในการเพิ่มความหนาแน่นบิต

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทดลองวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ซึ่งนอกเหนือจากปัจจัยต่างๆที่งานวิจัยที่ผ่านมาได้ค้นพบ กระบวนการทดลองจะอาศัยชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้นแบบและเครื่องมือทดลองสปินสแตนดาร์ดทดลองจำลองรูปแบบการบันทึกหลายรูปแบบ เช่น รูปแบบการบันทึกข้อมูลใช้งานจริง เป็นต้น โดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น bit error rate (BER) [26] signal to noise ratio (SNR) [27] และ dibit extraction [28] เป็นต้น เพื่อทำให้เข้าใจและสามารถวิเคราะห์ปัจจัยผลกระทบต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่และประสิทธิภาพของการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย ในส่วนสุดท้ายจะทดลองวิเคราะห์และแนะนำวิธีลดผลกระทบดังกล่าว เช่น การศึกษาความหนาของชั้นระบายความร้อนของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก และการศึกษารูปแบบการบันทึกข้อมูล เป็นต้น ผลที่ได้เพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้คือ การออกแบบกระบวนการทดสอบแบบใหม่ ซึ่งผลการวัดจะเป็นประโยชน์ช่วยให้วิศวกรและนักวิจัยนำไปพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย ที่ใช้ในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สูงกว่า 1 Tb/in^2

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่และประสิทธิภาพของการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการลดผลกระทบจากปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย

1.3 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย ซึ่งจะประกอบด้วย (1) ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ (2) กระบวนการเขียนที่มีแหล่งจ่ายความร้อนช่วยเขียน (3) กระบวนการอ่านข้อมูล (4) กระบวนการประมวลสัญญาณ และ (5) กระบวนการควบคุม เป็นต้น นอกจากนี้จะศึกษาทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อที่จะสามารถอธิบายกระบวนการทำงานของการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยด้วยหลักฟิสิกส์และวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี โดยแหล่งวรรณกรรมที่จะศึกษาใช้ข้อมูลจากสำนักพิมพ์บทความวิจัยของ IEEE transactions on magnetics เป็นหลัก ซึ่งเทคโนโลยีนี้ได้มีการเผยแพร่ที่สำนักพิมพ์นี้เป็นหลัก

1.3.2 ออกแบบการทดลองวัดและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ที่ใช้เทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยและเทคโนโลยีปัจจุบัน โดยมีรายละเอียดดังนี้วัดด้วยเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์ รุ่น RWA 4008 model ที่พัฒนาโดยบริษัทซีเกท เทคโนโลยี จำกัด ร่วมกับบริษัท Guzik จำกัด ซึ่งมีจุดเด่น คือ (1) Digital Read Channel 20 GSPS sampling rate (2) 6.5GHz analog bandwidth (GSA-6044) (3) Fast digital frequency domain (spectral) measurements up to 4 GHz

1.3.3 การทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่

Signal to noise ratio (SNR) [26] เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้ทราบถึงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนซึ่งส่งผลโดยตรงต่อ ADC ในหน่วยของ dB

Bit error rate (BER) [27] ทำให้ทราบถึงคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ เมื่อทำการเขียนข้อมูลด้วยสัญญาณ Pseudo random bit sequence (PRBS) ซึ่งเป็นการจำลองกระบวนการเขียนข้อมูลให้เหมือนกับผู้ใช้จริง จากนั้นทำการอ่านข้อมูลที่เขียนและเปรียบเทียบสิ่งที่เขียนและอ่าน ในแง่ของข้อมูลที่เขียนและอ่านผิดพลาดต่อข้อมูลที่ต้องการบันทึกในสเกล log ในหน่วยของ decade

Dibit extraction [28] คือการวิเคราะห์ไตบิตที่มีลักษณะเป็นคลื่นสัญญาณหนึ่งลูก เกิดจากการประมวลสัญญาณอ่านกลับเทียบกับชุดข้อมูลที่ทราบผ่านกระบวนการ cross-correlation จุดเด่นการไตบิตคือสามารถช่วยวิเคราะห์ความผิดพลาดระหว่างการเขียนและอ่านรูปแบบหนึ่ง

1.3.4 เจือปนในการทดลองจะกำหนดให้ฮาร์ดดิสก์แต่ละเทคโนโลยีบันทึกเขียนข้อมูลทีละระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 2 นาโนเมตร และอ่านทีละระยะ 2 นาโนเมตร ซึ่งอ้างอิงจากบทความของ [23] เพื่อทราบความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูงสุดของแต่ละเทคโนโลยี

1.3.5 ทดลองด้วยเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นสาเหตุให้เทคโนโลยีไม่สามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่เกินขีดจำกัดของเทคโนโลยีปัจจุบันได้ เช่น ปัจจัยจากชั้นระบายความร้อนของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก ผลกระทบจากความร้อนขณะเขียนบันทึก รวมถึงสัญญาณรบกวนขณะอ่านข้อมูล เป็นต้น โดยมีพื้นฐานและประยุกต์เทคนิคการวัดที่ใช้ปัจจุบัน เช่น BER และ SNR เป็นต้น

1.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะรายงานประสิทธิภาพผลการวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กล่าวข้างต้นและปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ซึ่งจะสามารถสรุปผลงานวิจัยทั้งหมดในงานนี้

1.3.7 เขียนบทความวิจัยในบทความวารสารวิชาการระดับนานาชาติ หรือ วารสารวิชาการระดับชาติ ที่ สกว. ยอมรับจำนวน 2 บทความ และวิทยานิพนธ์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 หากงานวิจัยสัมฤทธิ์ผลดังกล่าว องค์กรความรู้ที่ได้จากงานวิจัยจะมีส่วนช่วยวิศวกรและนักวิจัยในการออกแบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่บันทึกแม่เหล็กแบบความหนาแน่นช่วย ในการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สูงกว่า 1 Tb/in²

1.4.2 บทความวารสารวิชาการระดับนานาชาติ หรือ วารสารวิชาการระดับชาติ ที่ สกว. ยอมรับจำนวน 2 บทความ

1.5 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหาวัตถุประสงค์ของโครงการขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการรวมถึงวิธีการดำเนินงานและแผนการดำเนินโครงการตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบการทดลองและเครื่องมือการทดลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าและทดลองวิจัยทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ตลอดจนข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่สองกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย ส่วนแรกกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์อาศัยเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กในการเขียนและอ่านข้อมูล ต่อมาจะกล่าวถึงชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการพัฒนาความจุข้อมูลรวมถึงข้อจำกัดของเทคโนโลยีปัจจุบัน จึงส่งผลให้ต้องมีการศึกษาวิจัยหาทางเทคนิคทางเลือกใหม่ ดังนั้นการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยจึงถูกนำเสนอและกล่าวถึงในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เขียนอธิบายพื้นฐานของเทคนิคการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย กล่าวถึงกระบวนการขั้นตอนที่เกี่ยวข้องรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

2.1 ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เริ่มต้นเมื่อประมาณ 50 ปีที่ผ่านมา ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวแรกคือ Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC) โดยบริษัท IBM มีน้ำหนัก 2,140 ปอนด์ (pound) [29] สามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งหมด 5 เมกะไบต์ (Megabyte: MB) รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักภายในเป็นแผ่นบันทึกแม่เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว (inch) ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเก็บข้อมูลได้มากกว่า 500 จิกะไบต์ (Gigabyte: GB) ในกล่องขนาด 3.5 นิ้ว และมีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง เช่น การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ความเร็วของการเขียนอ่านข้อมูล และขนาดไดรฟ์ที่เล็กลง เป็นต้น [3]

แผ่นบันทึกแม่เหล็กที่อยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ผลิตจากแผ่นอลูมิเนียมหรือแก้ว ข้อมูลสารสนเทศจะถูกเก็บไว้บนแผ่นนี้ในชั้นของสารแม่เหล็ก ขนาดที่แตกต่างกันของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 1 นิ้ว และ 1.8 นิ้ว ใช้สำหรับอุปกรณ์ขนาดเล็ก อาทิ เครื่องเล่นเพลงดิจิตอล และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว ใช้สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ ส่วนขนาด 2.5 นิ้ว ใช้สำหรับคอมพิวเตอร์พกพา เป็นต้น [3]

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลโดยอาศัยหลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสามารถเก็บได้อย่างถาวร เมื่อเปิดคอมพิวเตอร์ข้อมูลก็จะไม่สูญหาย จากคุณสมบัตินี้ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกใช้เป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลหลักในการจัดเก็บข้อมูลต่างๆ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

2.1.1 สไลเดอร์ (slider) ประกอบไปด้วย หัวบันทึกมีส่วนเขียนและอ่าน ทำหน้าที่เขียนและอ่านข้อมูลบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก โดยจะบินเหนือแผ่นบันทึกแม่เหล็กในระดับนาโนเมตร (nm)

2.1.2 แผ่นบันทึกแม่เหล็กหรือแผ่นเก็บข้อมูล เป็นแผ่นสำหรับจัดเก็บข้อมูล โดยทำมาจากวัสดุแม่เหล็กชนิดแข็ง (hard magnetic material) มีหลายขนาดตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เช่น 2.5 และ 3.5 นิ้ว ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

2.1.3 Head Gimbal Assembly (HGA) ประกอบด้วย 3 คือ สไลเดอร์ ชัสเพนชัน (suspension) และสายนำสัญญาณ (interconnection) ทำหน้าที่นำพาสไลเดอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก

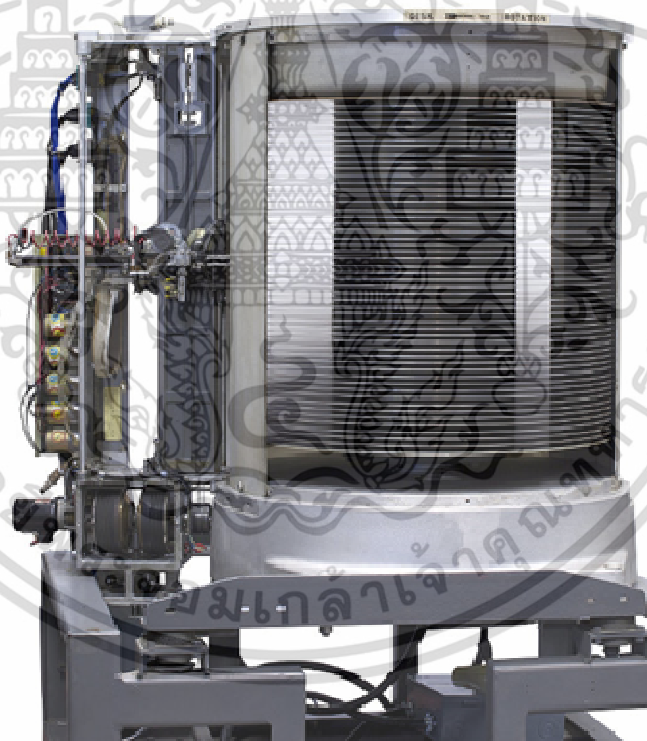
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 Head Stack Assembly (HSA หรือ E-block) คือการนำ HGA ซ้อนกันเป็นชั้นเพื่อประกอบเข้าไปในกล่องฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.1.5 วอยซ์คอยล์มอเตอร์ (voice coil motor) อาศัยหลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมการเคลื่อนที่ของ HSA

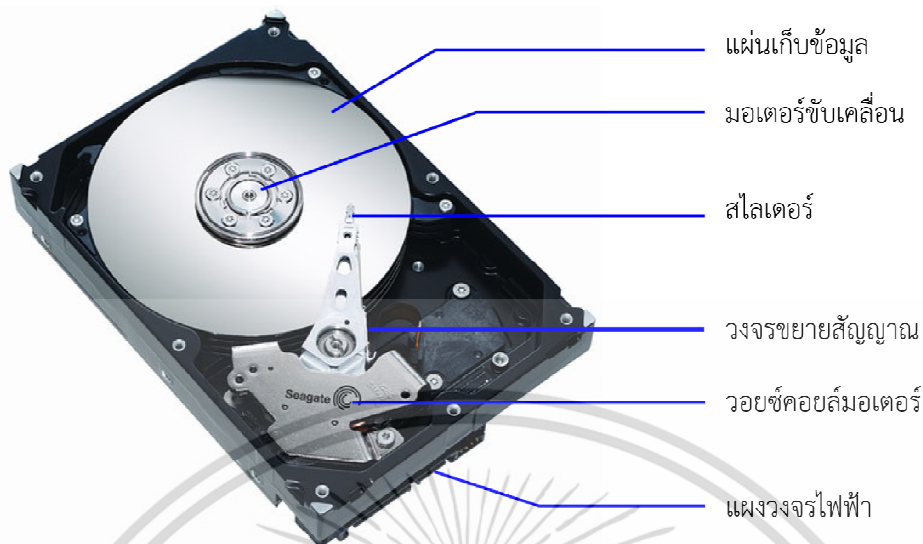
2.1.6 สปินเดิลมอเตอร์ (spindle motor) ที่มีหน้าที่หมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีข้อมูลอยู่ภายใน เพื่อให้หัวบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อทำหน้าที่อ่านข้อมูล หรือเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก

สำหรับความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้น นักวิจัยจะต้องออกแบบปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการจัดเก็บข้อมูล ได้แก่ หัวบันทึกแม่เหล็กต้องมีขนาดเล็กลง เพื่อที่จะเขียนข้อมูลให้ได้มากขึ้น ในขณะที่พื้นที่ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กมีขนาดเท่าเดิม นอกจากนี้ออกแบบให้แผ่นบันทึกแม่เหล็กมีความเร็วการหมุนที่สูงขึ้น เพื่อความเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งข้อมูล อย่างไรก็ตามต้องแลกกับการเขียนบันทึกแม่เหล็กที่มีข้อผิดพลาดสูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง



รูปที่ 2.1 Random Access Method of Accounting and Control (RAMAC) [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [6]

สำหรับความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้น นักวิจัยจะต้องออกแบบปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการจัดเก็บข้อมูล ได้แก่ หัวบันทึกข้อมูลแม่เหล็กต้องมีขนาดที่เล็กลง เพื่อที่จะเขียนข้อมูลให้ได้มากขึ้น ในขณะที่พื้นที่ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กมีขนาดเท่าเดิม นอกจากนี้ออกแบบให้แผ่นบันทึกแม่เหล็กมีความเร็วการหมุนที่สูงขึ้น เพื่อความเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งข้อมูล อย่างไรก็ตามต้องแลกกับการเขียนบันทึกแม่เหล็กที่มีข้อผิดพลาดสูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึง

2.2 การบันทึกข้อมูลแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย

จากผลของปรากฏการณ์แม่เหล็กพาราแมกเนติก แผ่นบันทึกแม่เหล็กเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุแม่เหล็กที่มีค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก (magnetic anisotropy: K_u) สูงจะทำให้ค่าสนามลบล้างความเป็นแม่เหล็ก (coercivity: H_c) สูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนปกติไม่สามารถบันทึกข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กได้ ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงศึกษาและนำเสนอการบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่ใช้ความร้อน (Heat assisted magnetic recording: HAMR) [30] ที่จะช่วยหัวเขียนปัจจุบันให้สามารถเขียนข้อมูลบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กของ HAMR ได้

เทคโนโลยี HAMR อาศัยการใช้เลเซอร์ (laser) ในการให้ความร้อนแก่แผ่นบันทึกข้อมูลที่มีค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก เพื่อเพิ่มความสามารถในการเขียนข้อมูลและความหนาแน่นข้อมูล ความร้อนจากเลเซอร์ที่โฟกัสลงบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กจะทำให้ค่า H_c ลดลงชั่วคราวและต้องลดลงต่ำกว่าสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน จะทำให้สามารถบันทึกข้อมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หลังจากบันทึกข้อมูลแล้ว แผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว แมกนีไทเซชัน (magnetisation) ที่ถูกบันทึกจะรักษาทิศทางเดิมและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง เวลาในกระบวนการทำให้ร้อนและทำให้เย็นควรจะเท่ากับการบันทึกข้อมูลในปัจจุบัน

ความสัมพันธ์ของเกรเดียนต์สนามแม่เหล็ก (field gradient) สนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field: H_k) ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเกรเดียนต์อุณหภูมิ (thermal gradient) สามารถถูกอธิบายอย่างง่ายโดยสมการที่ (2.1) ด้านซ้ายของสมการคือเกรเดียนต์สนามการเขียนประสิทธิภาพทิศทางตามแตรีก เทอมแรกของด้านขวามือคือ H_k ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเทอมที่สองคือเกรเดียนต์อุณหภูมิ จากความสัมพันธ์นี้เกรเดียนต์สนามแม่เหล็กของ HAMR สามารถถูกปรับให้คมขึ้นโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็กหรือคุณลักษณะของหัวเขียนแต่อย่างใด อุณหภูมิสำคัญมากในกระบวนการเขียนของ HAMR ความกว้างในแนวขวางแตรีกและการลบแตรีกที่ถูกบันทึกข้างเคียงนั้นจะถูกกำหนดโดยความร้อน

วิธีที่จะทำให้ได้รอยต่อระหว่างบิตที่คมขึ้นและบิตที่เล็กลงในแนวตามแตรีก จะมุ่งไปที่การปรับปรุงเกรเดียนต์อุณหภูมิ แมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetisation) ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กควรจะถูกทำให้อิ่มตัวมากที่สุดด้วยสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน ซึ่งจะต้องเข้มเพียงพอที่จะเขียนแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่น ค่าแอนไอโซโทรปีแม่เหล็กและสนามลบล้างแม่เหล็ก (demagnetization field) เป็นต้น

เนื่องจากความผันผวนทางอุณหภูมิในกระบวนการเขียนของ HAMR อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเขียนข้อมูลคืออุณหภูมิที่ทำให้ H_k ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กต่ำกว่าสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน แต่ต้องไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) เมื่อ $T > T_c$ โมเมนต์แม่เหล็กในอนุภาคแม่เหล็กจะเป็นแบบสุ่มนั่นคือผลรวมจะเป็น 0 จะไม่สามารถบันทึกข้อมูลได้ ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กจะมีความเข้มมากพอก็ตาม นี่ก็คือคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic) ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจะสามารถทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพหรือคุณสมบัติแม่เหล็กบางอย่างเปลี่ยนแปลง ยกตัวอย่างเช่น หัวบันทึก แผ่นบันทึกแม่เหล็ก และ Near Field Transducer (NFT) เป็นต้น การพัฒนาให้ความผิดพลาดในการเขียน (written-in error) ลดลง อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR) สูงและการกระจายอุณหภูมิควรจะสัมพันธ์กับสนามที่ใช้ในการเขียนข้อมูล

$$\frac{d\bar{H}_{eff}}{dx} = \frac{d\bar{H}_k}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} + \frac{d\bar{H}_w}{dx} \quad (2.1)$$

ซึ่ง \bar{H}_{eff} คือ สนามแม่เหล็กประสิทธิภาพ

\bar{H}_w คือ สนามแม่เหล็กจากหัวเขียน

x คือ ระยะทางตามแตรีก

T คือ อุณหภูมิ

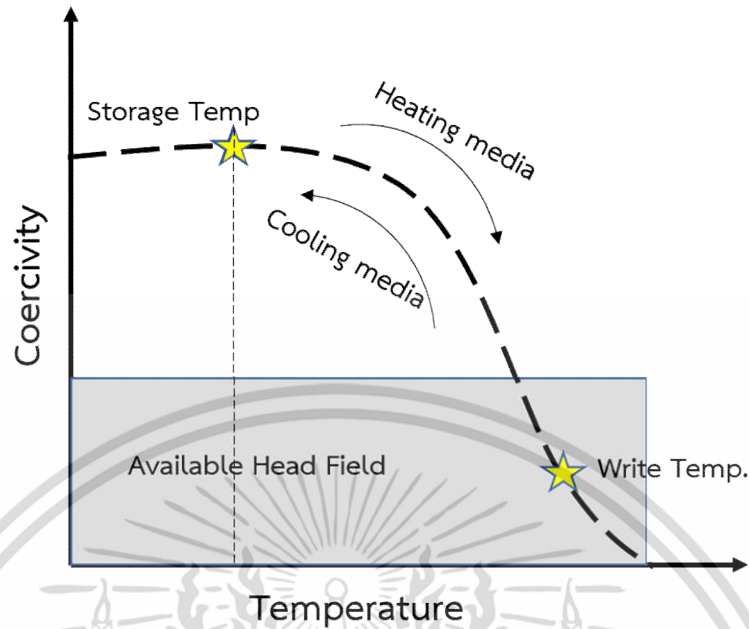
$\frac{d\bar{H}_{eff}}{dx}$ คือ เกรเดียนต์สนามแม่เหล็กประสิทธิภาพ

$\frac{d\bar{H}_w}{dx}$ คือ เกรเดียนต์สนามแม่เหล็กจากหัวเขียน

$\frac{dT}{dx}$ คือ เกรเดียนต์อุณหภูมิ

$\frac{d\bar{H}_k}{dT}$ คือ เกรเดียนต์ H_k ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการบันทึกแม่เหล็กเทคโนโลยี HAMR [30]

โดยทั่วไปโครงสร้างของแผ่นบันทึกแม่เหล็กของเทคโนโลยี HAMR จะแตกต่างจากแผ่นบันทึกแม่เหล็กปัจจุบัน โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ยังเหมือนเดิม จะเพิ่มในส่วนชั้นระบายความร้อนที่มีบทบาทสำคัญสำหรับเทคโนโลยี HAMR เพราะปัญหาของความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นต้น

2.3 กระบวนการเขียนและอ่าน

2.3.1 กระบวนการเขียนบันทึก

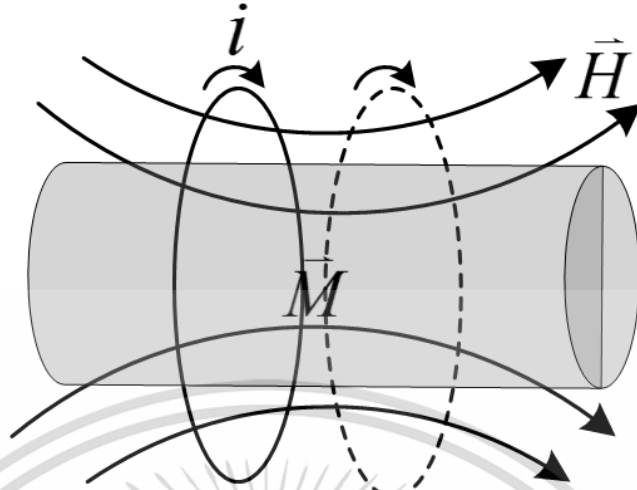
การเขียนข้อมูลจะอาศัยหัวเขียน [31-32] มีขดลวดเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กทำหน้าที่แปลงพัลส์กระแสไฟฟ้าจากแผงวงจรเป็นสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ เพื่อเขียนข้อมูลลงบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก ดังนั้น จำเป็นต้องทราบพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่ออธิบายปรากฏการณ์

เป็นที่ทราบกันดีว่าสถานะแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก จะมีแมกนิไทเซชันของตัวเอง (\vec{M}) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ซึ่งเกิดจากผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็ก (magnetic moment: \vec{m}) ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (V) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร (A/m²) ดังสมการที่ (2.2)

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum \vec{m} \quad (2.2)$$

เมื่อพิจารณาขดลวดเหนี่ยวนำจากภาพที่ 2.4 ขนาดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (flux density: \vec{B}) สุทธิสามารถคำนวณได้จาก ผลรวมของสนามแม่เหล็กจากภายนอกและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแมกนิไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเทสลา (T) อธิบายได้จากสมการที่ (2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กในแท่งแม่เหล็กพันด้วยขดลวด [31]

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.3)$$

เมื่อ \vec{H} คือสนามแม่เหล็กแม่เหล็กภายนอก มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) μ_0 คือความสามารถซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กในอวกาศว่าง ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

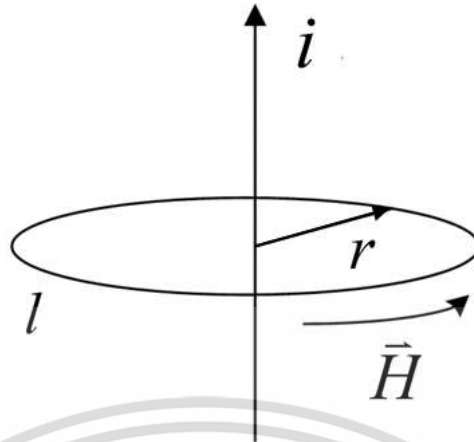
ในวัสดุแม่เหล็กบางวัสดุจะไม่มีแมกนิไทเซชัน ในสภาวะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก หากสนามแม่เหล็กเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้แมกนิไทเซชันเพิ่มขึ้นตามอย่างเป็นเชิงเส้น อธิบายได้โดยสมการที่ (2.4)

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2.4)$$

เมื่อ χ คือค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) ของสารใดๆ ถ้าสารใดมีค่า $\chi > 0$ นั้นจะถูกเรียกว่า “สภาวะแม่เหล็กพารา (paramagnetism)” ถ้าสารใดมีค่า $\chi < 0$ เรียกว่า “สภาวะแม่เหล็กไดอา (diamagnetism)” พึงระวังด้วยว่าสมการที่ (2.4) เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น จึงไม่สามารถที่จะใช้อธิบายสารที่มีสภาวะแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) ได้

หากนำแท่งวัสดุแม่เหล็กออก พบว่าไม่มีแมกนิไทเซชัน ดังนั้นเมื่อคำนวณขนาดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (\vec{B}) จะเท่ากับสมการที่ (2.5)

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.5 การไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก [31]

จากกฎของแอมแปร์ (Ampere's law) [31] กล่าวว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นทางปิดใดๆ (l) จะเกิดสนามแม่เหล็กวนรอบเส้นทางปิดนั้นๆ เมื่อ i คือกระแสมีหน่วยแอมแปร์ (A) ดังรูปที่ 2.5 อธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\bar{H} \oint dl = \bar{H} 2\pi r = Ni \quad (2.6)$$

$$\bar{H} = \frac{Ni}{2\pi r} \quad (2.7)$$

เมื่อ r คือรัศมีวงกลมมีหน่วยเมตร (m) และ N คือจำนวนรอบของขดลวด ให้ $l = 2\pi r$ จะได้ $n = N/l$ คือจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาวของขดลวด ดังนั้น

$$\bar{H} = ni \quad (2.8)$$

จึงสามารถคำนวณขนาดเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับสมการที่ (2.9)

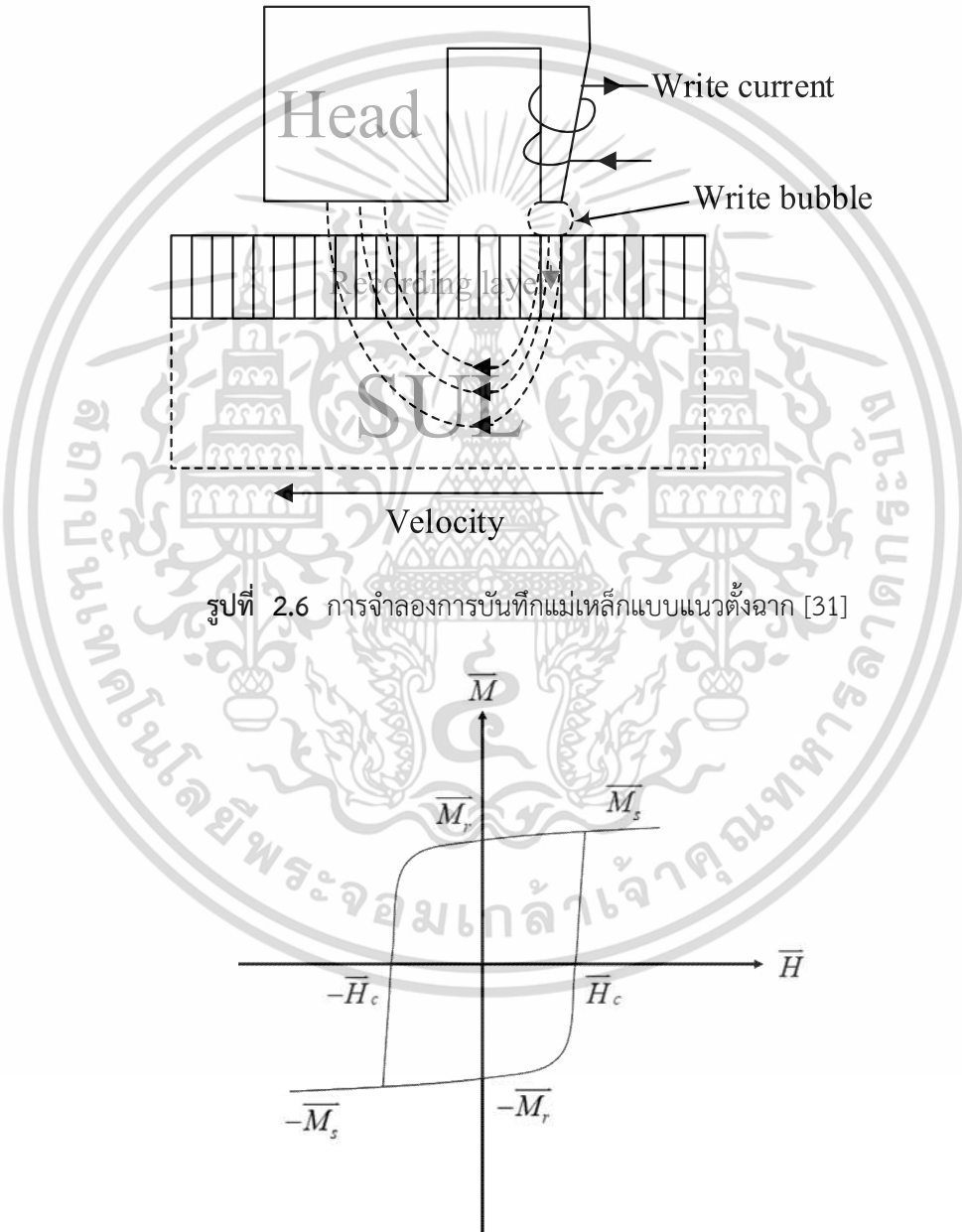
$$\bar{B} = \mu_0 ni \quad (2.9)$$

จะเห็นว่าขนาดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้า รวมถึงจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาวของขดลวด

จากรูปที่ 2.6 เมื่อนำหลักการข้างต้นประยุกต์ใช้ในการเขียนข้อมูลเชิงแม่เหล็กนั้น การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งฉาก ส่วนประกอบหลักจะประกอบด้วย หัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็ก [31] โดยสนามแม่เหล็กที่เขียนข้อมูลจะออกจากส่วนของหัวเขียน บริเวณหัวแม่เหล็กหลักจะพุ่งผ่านแผ่นบันทึกแม่เหล็ก เพื่อบังคับทิศของแมกนีไทเซชันบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก ให้มีทิศทางเป็นไปตามทิศทางของกระแสที่จ่ายเข้าไป ทำให้แต่ละตำแหน่งบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กถูกเขียนข้อมูลลงไปมี

ทิศของแมกนีไทเซชันเกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแมกนีไทเซชันที่แตกต่างกัน เปรียบเสมือนสถานะบิต “หนึ่ง” และ “ศูนย์” ในระบบไบนารี (binary system)

เมื่อสนามแม่เหล็กผ่านชั้น Soft Under Layer (SUL) จะเห็นว่าชั้น SUL ทำหน้าที่เหมือนเป็นกระจกสะท้อนแม่เหล็กให้ผ่านไปยังขั้วแม่เหล็กย้อนกลับ (return pole) ทำให้ประสิทธิภาพของสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนดีขึ้นกว่าการเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแวนอนอน ยิ่งไปกว่านั้นช่วยเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้ โดยที่เสถียรภาพทางความร้อนยังคงรักษาได้ดี



รูปที่ 2.7 ลูป M-H ฮิสเทอรีซิส [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 กระบวนการอ่านกลับ

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงกระบวนการอ่านกลับ (read back process) [31] คือกระบวนการที่ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแม่เหล็กมาเป็นสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้า จะใช้หลักการเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือค่าความต้านทานของวัสดุหัวอ่านจะเปลี่ยนแปลงเมื่อแมกนีไทเซชันของวัสดุเปลี่ยนไป โดยในภาพที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของหัวอ่านชนิด Giant magnetoresistance (GMR) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง 4 ชั้น และมีแม่เหล็กไบอัสแบบแข็ง (hard bias) ณ ตำแหน่งด้านข้าง สำหรับชั้นพิน (pinned layer: PL) จะมีแมกนีไทเซชันที่ถูกกำหนดทิศทางลงด้วยการแลกเปลี่ยนพลังงานไบอัส กับชั้นแม่เหล็กแอนติเฟอร์โร (antiferromagnetic layer: AFM) คือ \vec{M}_{PL} ชั้นต่อมาคือชั้นอ้างอิง (reference layer: RL) ทำจากวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร มีทิศทางแมกนีไทเซชันตรงข้ามกับ \vec{M}_{PL} ต่อมาคือชั้นอิสระ (free layer: FL) ทิศทางแมกนีไทเซชันของชั้นดังกล่าว \vec{M}_{FL} จะวางตัวในแนวขนานกับระนาบผิวของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก เนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างชั้นแม่เหล็กไบอัสแบบแข็ง

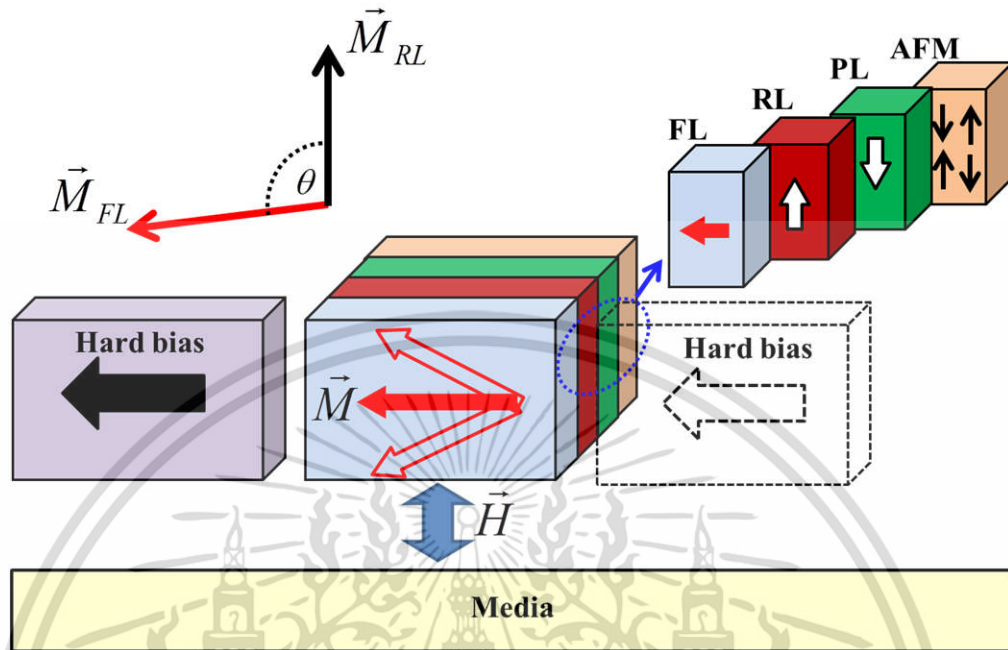
เมื่อชั้น FL รับสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกแม่เหล็ก จะทำให้ \vec{M}_{FL} วางทิศทางเปลี่ยนไปจากเดิมเป็นมุม θ ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานหัวอ่านที่เปลี่ยนไปได้โดยสมการที่ (2.10)

$$R = R_p + \frac{\Delta R}{2}(1 - \cos \theta) \quad (2.10)$$

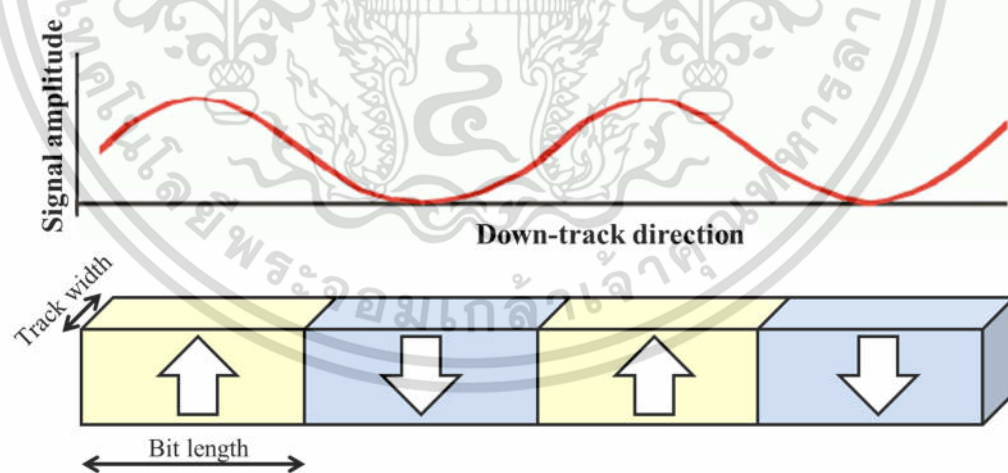
เมื่อ R_p คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสำหรับอ้างอิง มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) โดย

$$\Delta R = R_{op} - R_p \quad (2.11)$$

เมื่อ R_p คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ขณะที่ \vec{M}_{FL} มีทิศทางเดียวกับ \vec{M}_{RL} และ R_{op} คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ขณะที่ \vec{M}_{FL} มีทิศทางตรงข้ามกับ \vec{M}_{RL} [33, 34] เมื่อพิจารณาสัญญาณอ่านกลับจะแสดงดังตัวอย่างภาพที่ 2.9



รูปที่ 2.8 การจำลองโครงสร้างหัวอ่าน [33]



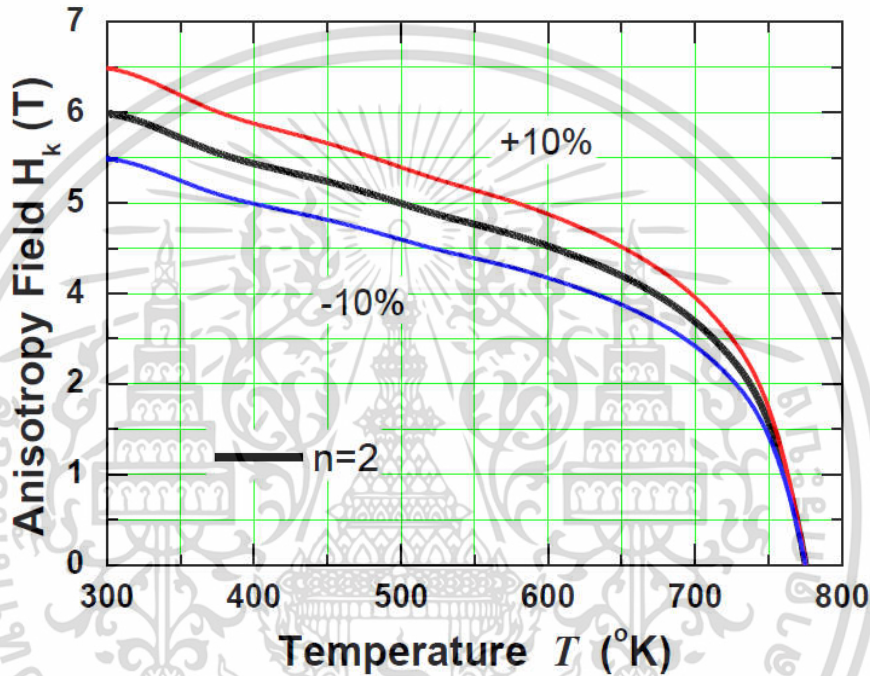
รูปที่ 2.9 การจำลองสัญญาณอ่านกลับ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การผันแปรของ H_k (H_k variation) [35]

การกระจายแบบ Gaussian จะถูกใช้เพื่อจำลองการผันแปรของ H_k ของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก โดย H_k ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.10 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น H_k จะลดลงและจะมีค่าเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิคูรี เมื่อมีการผันแปรของ H_k จะทำให้ลักษณะของกราฟเปลี่ยนแปลงดังรูป จะเห็นได้ว่าการผันแปรของ H_k จะมีความสำคัญมากที่อุณหภูมิต่ำ



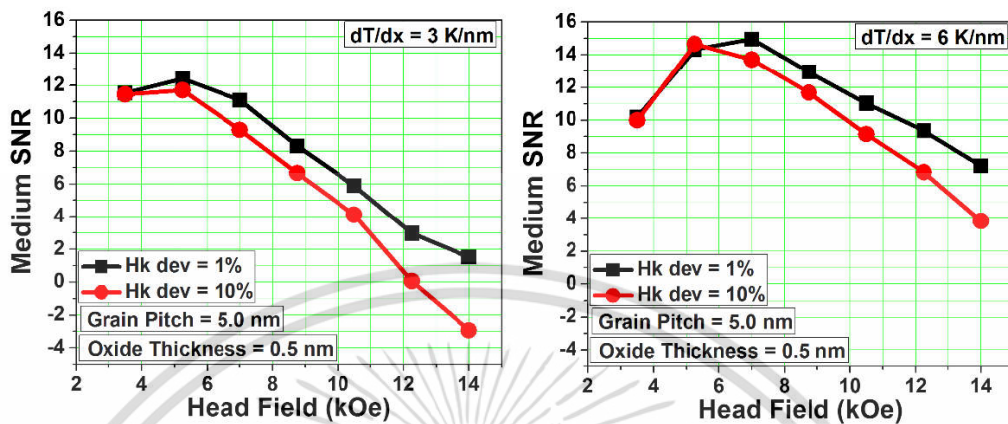
รูปที่ 2.10 H_k ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีการกระจายแบบ Gaussian ที่ทุกอุณหภูมิ [35]

เมื่อเพิ่มการจำลองการผันแปรของ H_k สองค่า คือ 1% และ 10% ซึ่งถูกเปรียบเทียบที่เกรเดียนท์อุณหภูมิสองค่า ได้แก่ 3 K/nm (ซ้าย) และ 6 K/nm (ขวา) เพื่อให้ได้ SNR ที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในกรณีที่ขนาดเกรนเฉลี่ยเป็น 5 nm ขอบเกรนเฉลี่ยเป็น 0.5 nm และแผ่นบันทึกแม่เหล็กหนา 10 nm เนื่องจากเกรเดียนท์สนามแม่เหล็กประสิทธิภาพของ HAMR จะเป็นผลคูณของเกรเดียนท์อุณหภูมิและความชันของกราฟ H_k กับอุณหภูมิ ซึ่งควรจะมีค่าสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิคูรี ดังนั้นถึงแม้ว่าการกระจายของ H_k จะเปลี่ยนแปลง แต่การเปลี่ยนแปลงนี้อาจจะถูกหักล้างได้หากเกรเดียนท์สนามแม่เหล็กประสิทธิภาพสูง

แนวโน้มของค่า SNR สำหรับการผันแปรของ H_k ทั้งสองค่าคล้ายคลึงกัน โดยทั้งสองกราฟแสดงค่าสนามแม่เหล็กที่ทำให้ได้ SNR สูงที่สุด ถึงแม้ว่ากรณี H_k เป็น 10% จะมี SNR ต่ำกว่าเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งจะเห็นว่า SNR จะลดลงอย่างมากเมื่อสนามแม่เหล็กสูงขึ้น บ่งบอกว่าการผันแปรของ H_k ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนการลบหลังจากการเขียน นอกจากนี้กรณีที่เกรเดียนท์อุณหภูมิสูงจะได้รับ

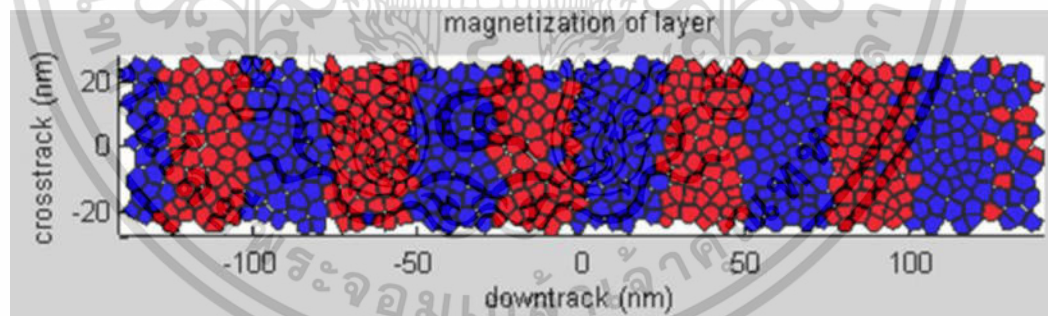
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบน้อยจากการผันแปรของ H_k ซึ่งทำให้ตระหนักได้ว่าการใช้สนามแม่เหล็กที่ไม่เหมาะสมนั้น จะส่งผลกระทบต่อ SNR มากกว่าผลกระทบจากการผันแปรของ H_k (ค่ากลางๆ ไม่สูงมาก)



รูปที่ 2.11 SNR กับสนามแม่เหล็กสำหรับ H_k ที่แตกต่างกัน ภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิ 3 K/nm และ 6 K/nm ขนาดเกรน 5 nm [35]

รูปที่ 2.12 คือแมกนิไทเซชันที่มีการผันแปรของ H_k เป็น 20% และจำลองภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิเป็น 15 K/nm ถึงแม้ว่าเกรเดียนท์อุณหภูมิจะสูงกว่าค่าปัจจุบันที่ใช้ แผ่นบันทึกแม่เหล็กยังคงแสดงการกลับทิศทางของเกรนแม่เหล็กเป็นแบบสุ่ม ซึ่งมันแสดงถึงสัญญาณรบกวนการลบหลังจากการเขียน และยังเป็นเหตุผลของการลดลงของ SNR ที่สนามแม่เหล็กสูงในรูปที่ 2.11 ด้วย



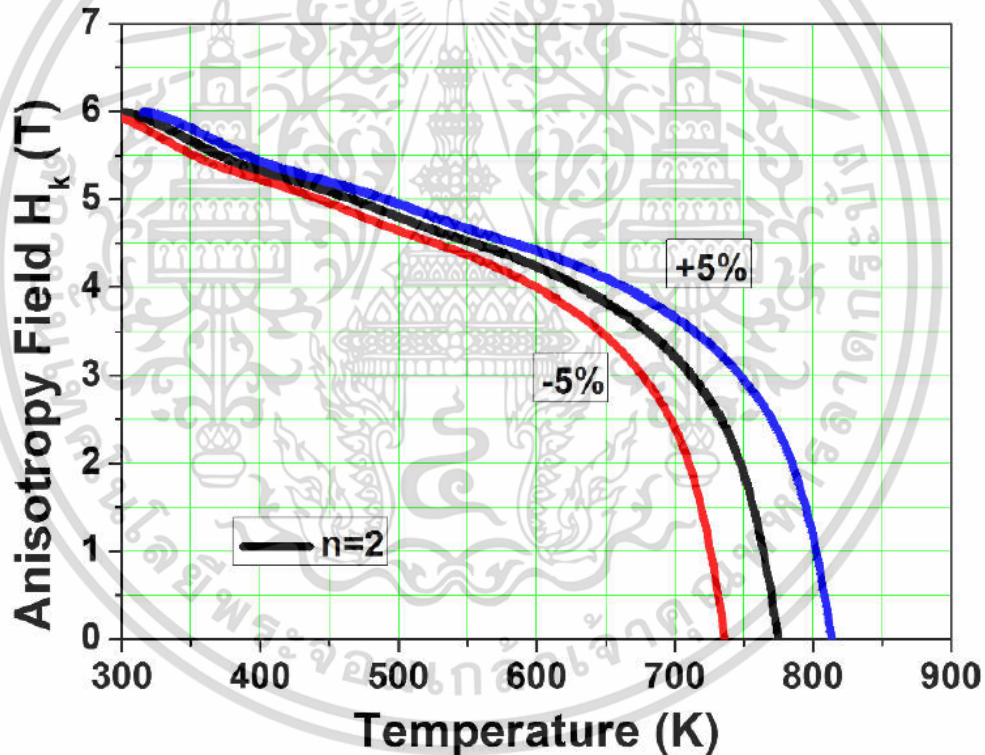
รูปที่ 2.12 แมกนิไทเซชันที่มีการผันแปร H_k 20% ภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิ 15 K/nm [35]

การผันแปรของ H_k จะนำไปสู่การลบหลังจากการเขียนที่สนามแม่เหล็กสูงๆ แต่มันสามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้สนามแม่เหล็กที่เหมาะสม เนื่องจากผลกระทบของการกระจาย H_k สามารถที่จะละทิ้งได้ด้วย ในขณะที่การใช้แผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีการผันแปรของ H_k สูงกว่าค่ากลางๆ ภายใต้เกรเดียนท์อุณหภูมิสูง และความเร็วดีสก์สูง อาจจะช่วยป้องกันการลบหลังจากการเขียนเนื่องจากการกระจายของ H_k ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การผันแปรของอุณหภูมิคูรีบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก (T_c variation) [35]

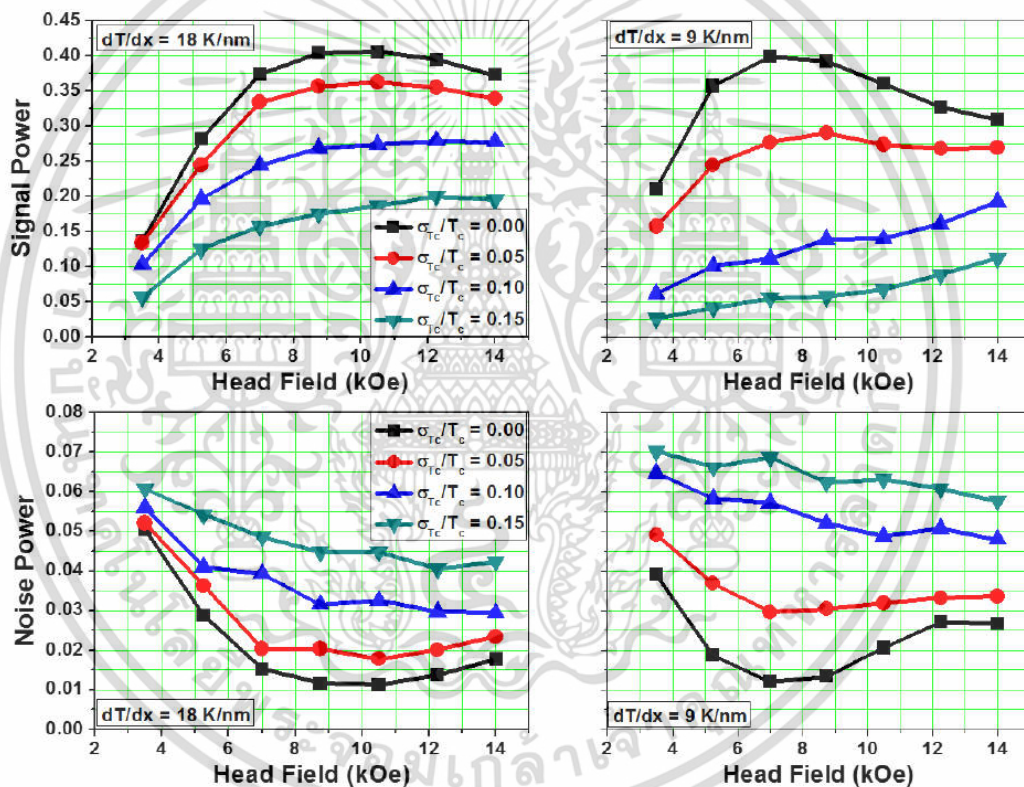
รูปที่ 2.13 แสดงกราฟระหว่าง H_k กับอุณหภูมิที่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรี ซึ่งจะเห็นว่าผลของการผันแปรของอุณหภูมิจะมีผลมากเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิคูรี หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าการผันแปรของอุณหภูมิคูรีและเกรเดียนท์อุณหภูมิดังรูปที่ 2.14 พบว่าหากการผันแปรของอุณหภูมิคูรีเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังของสัญญาณลดลงและกำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น ระบบที่มีเกรเดียนท์อุณหภูมิที่สูงกว่าก็จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบค่าสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมสำหรับบางกรณีด้วย เมื่อการผันแปรของอุณหภูมิคูรีมีค่าสูงมากๆ นั่นคือ 10% และ 15% สนามแม่เหล็กจะมีผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพของระบบ และยังพบอีกว่าหากระบบมีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีเพียงแค่ 5% ก็สามารถทำให้กำลังสัญญาณลดลง และกำลังสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากผลการจำลองของทั้งสองส่วนที่ผ่านมานั้นพบว่า การกระจายคุณสมบัติของเกรนมีผลต่อการลดลงของ SNR อย่างมาก



รูปที่ 2.13 แผนภาพ H_k กับอุณหภูมิที่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรี เป็น -5% +5% และไม่มี การผันแปรของอุณหภูมิคูรี [35]

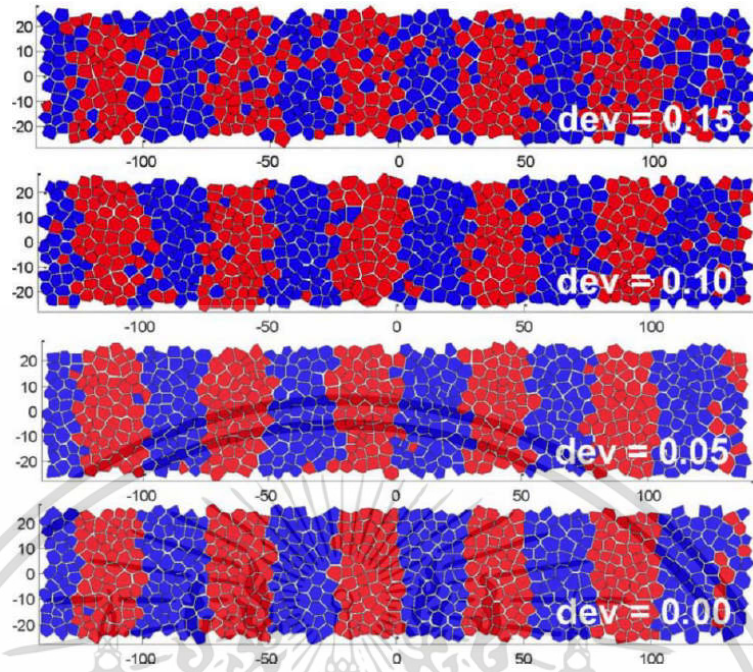
โดเมนแม่เหล็กของแต่ละค่าการผันแปรของอุณหภูมิคูรีแสดงดังรูปที่ 2.15 จากด้านบนลงด้านล่างคือ 15% 10% 5% และ 0% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการมีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีมากกว่าจะทำให้มีบางเกรนที่ถูกกลับทิศทางมากกว่า การที่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีจะเห็นยวน่า

ให้เกิดสัญญาณรบกวนตั้งแต่เริ่มการเขียน โดยเกรนที่ถูกทำให้กลับทิศทางส่วนหลักๆ จะอยู่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างบิตที่ตรงข้ามกัน นอกจากนี้หากการผันแปรของอุณหภูมิคูรีมีค่าสูงมากๆ จะทำให้บริเวณตรงกลางบิตมีบางเกรนที่ถูกกลับทิศทาง ซึ่งจะทำให้สัญญาณรบกวนนั้นรุนแรงมากขึ้น ทำให้ทราบว่าสัญญาณรบกวนหลักๆ ที่เกิดจากการมีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีนั้นจะเป็นสัญญาณรบกวนบริเวณรอยต่อ ในส่วนถัดไปจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณรบกวนบริเวณรอยต่อของการผันแปรของอุณหภูมิคูรีและการผันแปรของ H_k เมื่อความหนาแน่นบิตสูง รอยต่อของบิตข้อมูลจะอยู่ใกล้กันมากขึ้นและสัญญาณรบกวนที่บริเวณรอยต่อจะมีบทบาทหลัก ดังนั้นการผันแปรของอุณหภูมิคูรีจะทำให้ประสิทธิภาพในการบันทึกลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาแน่นของข้อมูลเพิ่มขึ้น การผันแปรของอุณหภูมิคูรีจึงควรที่จะลดลงให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้



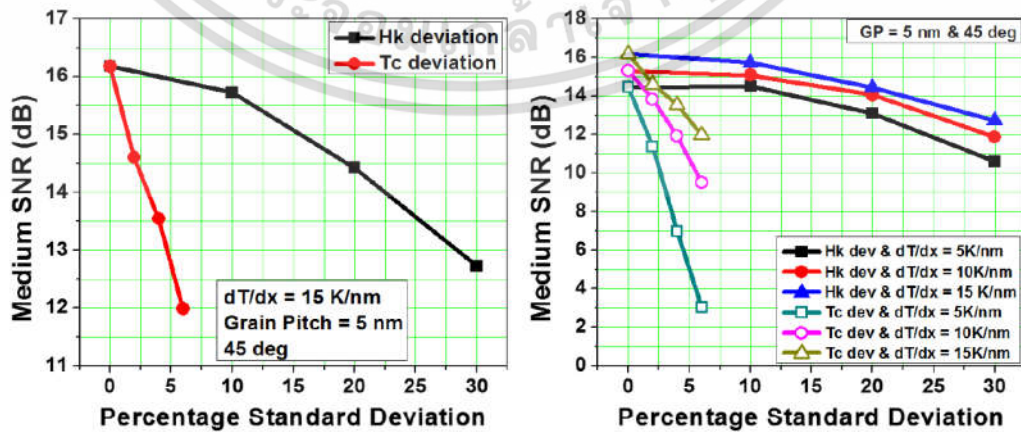
รูปที่ 2.14 กำลังสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีเป็น 0% 5% 10% และ 15% ภายใต้เกรเดียนต์อุณหภูมิ 9 K/nm และ 18 K/nm [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



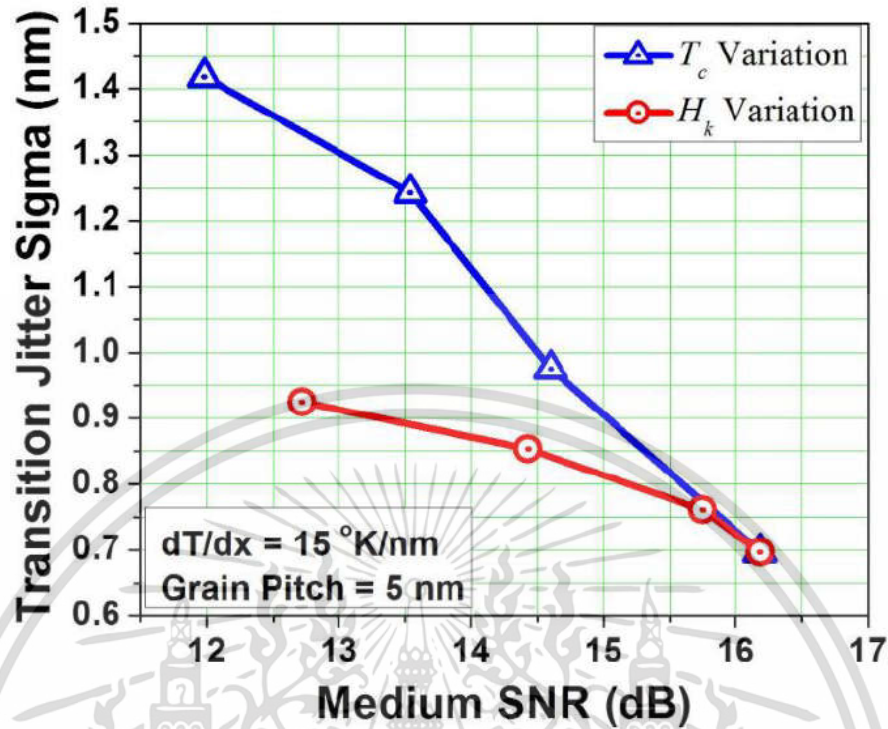
รูปที่ 2.15 โดเมนแม่เหล็กของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีเป็น 0% 5% 10% และ 15% ตามลำดับ [35]

เมื่อนำค่า SNR ที่ได้จากกรณีที่ใช้สนามแม่เหล็กที่เหมาะสมจะได้ผลดังรูปที่ 2.16 จากรูปด้านซ้ายจะพบว่ากรณีที่ระบบมีผลกระทบจากการผันแปรของอุณหภูมิคูรีจะส่งผลให้ SNR ลดลงอย่างมากและรวดเร็ว และมากกว่าการมีการผันแปรของ H_k จากรูปด้านขวาพบว่าผลกระทบนี้จะลดลงอย่างมากหากเกรเดียนต์อุณหภูมิมีค่าสูง ซึ่งทั้งสองกรณีนั้นให้ผลที่สอดคล้องกัน ดังที่กล่าวในส่วนที่แล้วว่าการมีการผันแปรของอุณหภูมิคูรีจะทำให้เกิดการกลับทิศทางของบางเกรนบริเวณรอยต่อระหว่างบิต ซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนบริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.17 เมื่อพิจารณาที่ค่า SNR เท่ากันพบว่า การเลื่อนตำแหน่งของรอยต่อระหว่างบิตจะมีค่าสูงมาก หากมีผลของการผันแปรของอุณหภูมิคูรี



รูปที่ 2.16 SNR กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



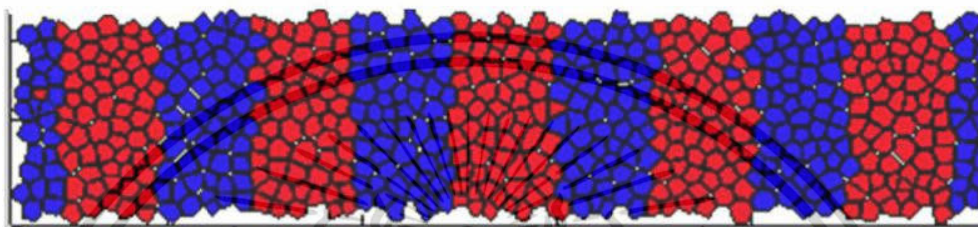
รูปที่ 2.17 สัญญาณรบกวนบริเวณรอยต่อระหว่างบิตกับ SNR ที่มีสัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิคูรี และ H_k [35]

2.4.3 ความแปรปรวนของอุณหภูมิจากหัวเขียน (temperature variation)

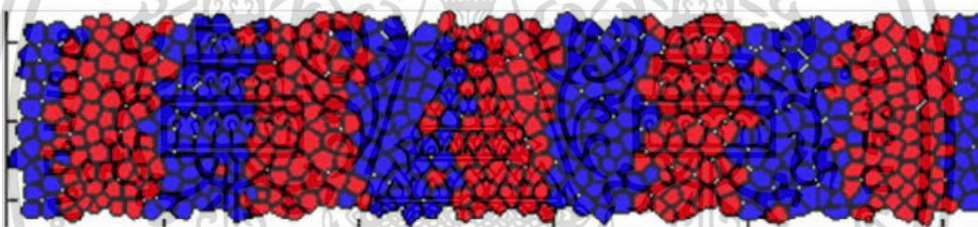
ปัญหาเนื่องจากความร้อนที่สำคัญมากอีกหนึ่งของ HAMR คือแต่ละเกรนได้รับความร้อนจากแหล่งที่ให้ความร้อนไม่เท่ากัน รูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกรนได้รับความร้อน ความร้อนจะกระจายออกจากเกรนไปสู่บริเวณรอบข้าง ซึ่งการกระจายความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน เช่น การแผ่ความร้อนจาก NFT ปริมาตรของเกรน การกระจายความร้อนผ่านขอบเกรน และการกระจายความร้อนผ่านชั้น underlayer เป็นต้น จากรูปที่ 2.19 พบว่าเมื่อมีผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 6% จะทำให้ SNR ลดลงประมาณ 5 dB เมื่อเปรียบเทียบตรงสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด (สนามแม่เหล็กที่ทำให้ SNR สูงที่สุด) อีกอย่างหนึ่งที่ได้ชัดเจนคือเมื่อมีผลจากการเปลี่ยนแปลงความร้อน สนามแม่เหล็กจะเริ่มมีผลน้อยลงต่อ SNR ของระบบ

เมื่อพิจารณาโดเมนแม่เหล็กในรูปที่ 2.20 ระหว่างกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน และมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 6% พบว่าโดเมนแม่เหล็กของกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนบาง เกรนจะถูกกลับทิศทางบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะส่งผลให้รอยต่อระหว่างบิตกว้างขึ้น และสัญญาณรบกวน บริเวณรอยต่อสูงขึ้น จากการวิเคราะห์ กรณี 0% รอยต่อระหว่างบิตจะกว้างประมาณ 0.8 nm และ 6% จะกว้างประมาณ 2.4 nm

T dev = 0%



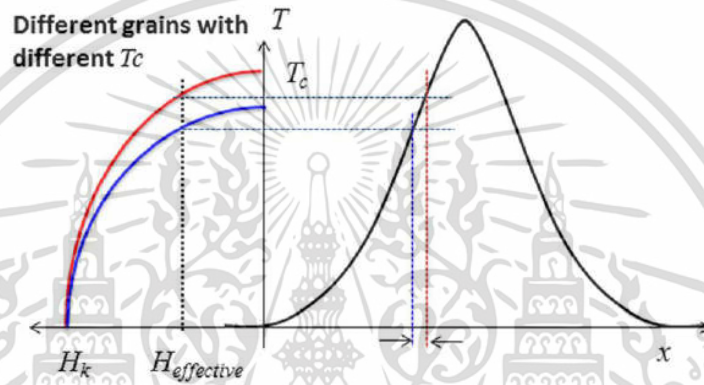
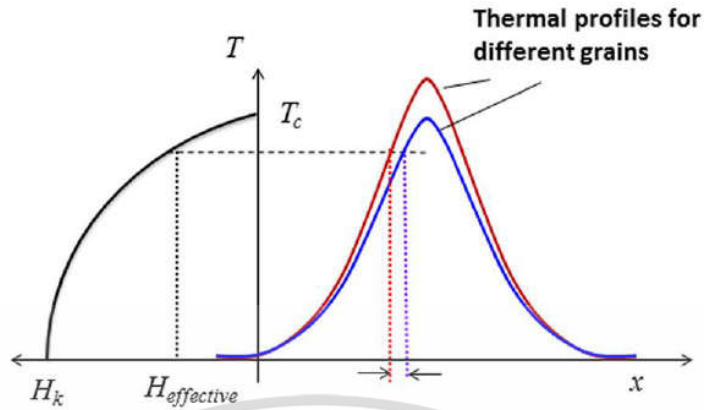
T dev = 6%



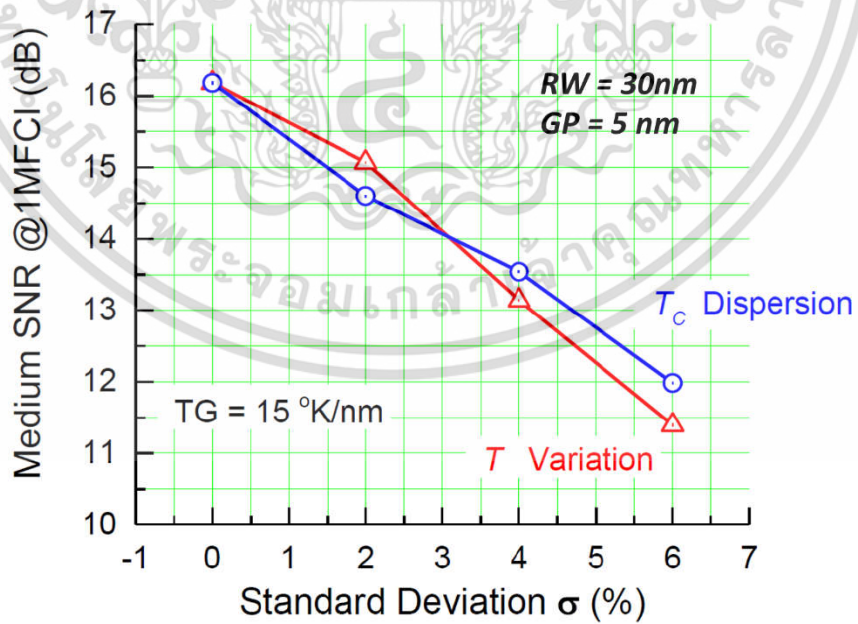
รูปที่ 2.20 โดเมนแม่เหล็กจากการบันทึกด้วยเกรเดียนท์อุณหภูมิเป็น 15 K/nm และขนาดเกรน 5 nm ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะให้ความร้อน และมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 6% [35]

เห็นได้ชัดว่าผลของการเปลี่ยนแปลงความร้อนนั้นส่งผลอย่างมากต่อ SNR ดังนั้นมันจึง น่าสนใจที่จะนำผลของการผันแปรอุณหภูมิคูรีจากส่วนที่แล้มาเปรียบเทียบกัน รูปที่ 2.21 คือ แผนภาพเพื่อให้เข้าใจเงื่อนไขที่แตกต่างของทั้งสองกรณีได้ชัดเจนขึ้น รูปด้านบนคือกรณีที่มีการผันแปรความร้อนของเกรนแม่เหล็ก แสดงด้วยโปรไฟล์ความร้อนที่ต่างกันโดยความสัมพันธ์ระหว่าง H_k กับอุณหภูมิของแผ่นบันทึกแม่เหล็กคงที่ รูปด้านล่างคือกรณีที่มีการผันแปรอุณหภูมิคูรีโดยอยู่ภายใต้ โปรไฟล์ความร้อนเดียวกัน และทั้งสองกรณีใช้สนามแม่เหล็กประสิทธิผลเดียวกัน จะเห็นได้ชัดว่าทั้งสองกรณีมีโอกาสที่จะเกิดสัญญาณรบกวนบริเวณรอยต่อเนื่องจากความแตกต่างทางความร้อน และ ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 2.22 พบว่าทั้งสองกรณีมีผลใกล้เคียงกันมาก คือเมื่อมีการเบี่ยงเบนทาง อุณหภูมิจะลด SNR ลงอย่างมากจาก 16 dB ไปที่ 12 dB ดังนั้นแหล่งของสัญญาณรบกวนทั้งสอง ชนิดนี้มีกระทบอย่างมากต่อ SNR ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แผนภาพผลกระทบของการบันทึกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเมื่อมีการผันแปรอุณหภูมิคูรี [35]



รูปที่ 2.22 ค่า SNR ที่เหมาะสมที่ 1 MFCI กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิคูรีและอุณหภูมิในการบันทึก [35]

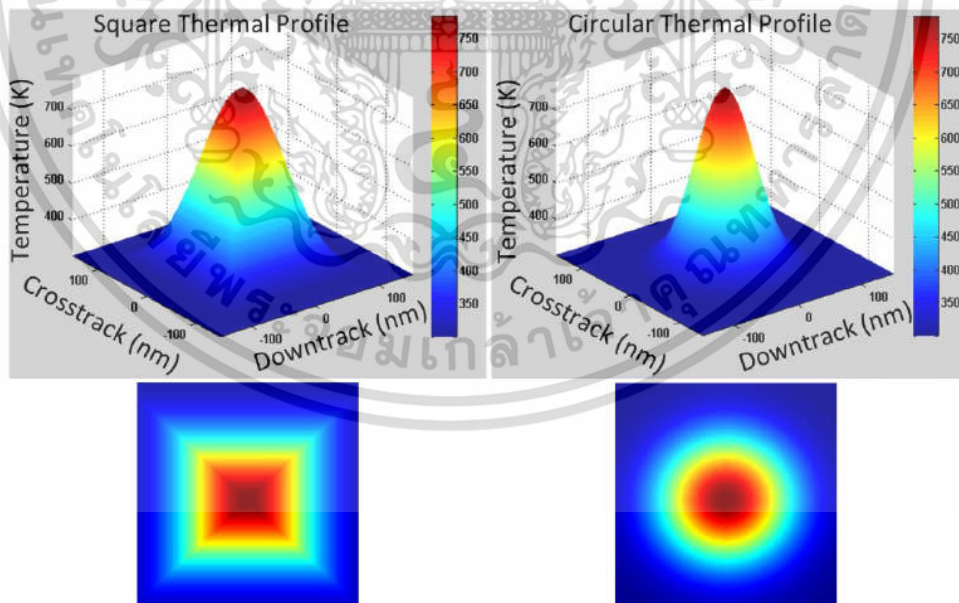
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ความโค้งงอของรอยต่อระหว่างบิต (transition curvature)

เนื่องจากรูปร่างของโปรไฟล์ความร้อนบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กโดยปกติแล้วจะกลม จึงทำให้บิตข้อมูลจากการบันทึกที่บริเวณรอยต่อระหว่างบิตจะโค้งงอ จึงเป็นปัญหาสำคัญที่ความหนาแน่นของข้อมูลถูกจำกัด ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการเสนอผลกระทบของรอยต่อระหว่างบิตที่โค้ง และการปรับปรุงปัญหา ซึ่งพบว่า การปรับปรุงให้รอยต่อระหว่างบิตตรงขึ้นนั้นจะสามารถทำให้ความหนาแน่นของข้อมูลเพิ่มขึ้นได้ประมาณ 50% ด้วย SNR เท่าเดิม

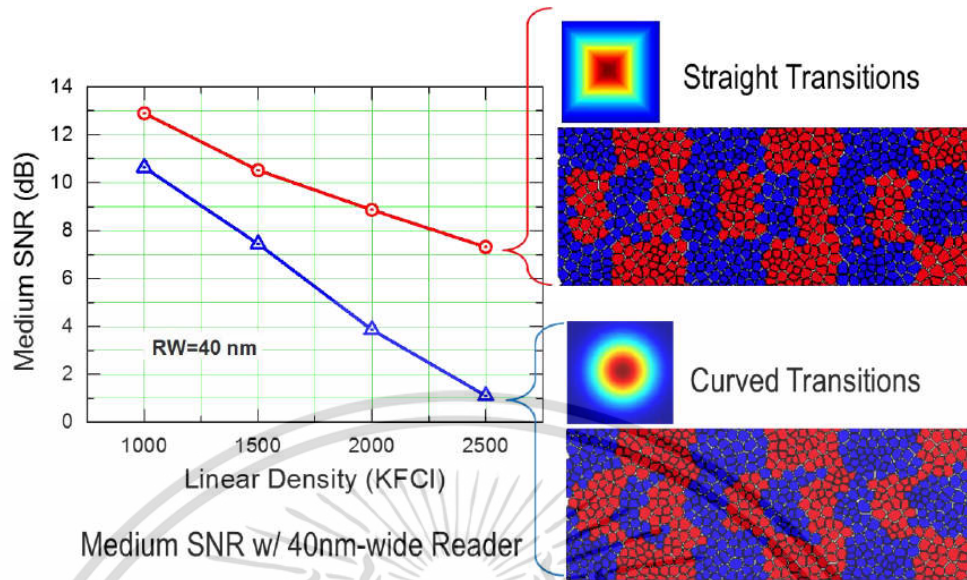
ผลกระทบจากความโค้งงอ (curvature impact) เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบความโค้งงอของรอยต่อระหว่างบิต ดังนั้นโปรไฟล์ความร้อนสองแบบดังแสดงในรูปที่ 2.23 จะถูกนำมาศึกษา นั่นคือโปรไฟล์ความร้อนแบบสี่เหลี่ยมและกลมมีการกระจายแบบ Gaussian เกรเดียนท์อุณหภูมิบริเวณใกล้ๆ อุณหภูมิที่ใช้ในการบันทึกเป็น 6 K/nm อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้คือ 785 Kelvin รูปแบบการบันทึกที่ 500 kilo flux change per inch (kFCI) แบบจำลองของหัวอ่านจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาวในแนวขวางแทร็ค (crosstalk) เป็น 40 nm และความยาวในแนวตามแทร็ค (downtrack) เป็น 0.1 nm

SNR ที่ได้จากโปรไฟล์ความร้อนทั้งสองแบบเป็นดังรูปที่ 2.24 ภายใต้สนามแม่เหล็กค่า 10.5 kOe เห็นได้ชัดเจนว่า SNR ของโปรไฟล์ความร้อนสี่เหลี่ยมสูงกว่าและที่ความหนาแน่นข้อมูลสูงสุดที่ SNR มีค่าอย่างต่ำเป็น 7 dB เนื่องจากรอยต่อระหว่างบิตที่ตรงของโปรไฟล์ความร้อนแบบสี่เหลี่ยมจึงทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลได้สูงกว่าถึง 65%



รูปที่ 2.23 โปรไฟล์ความร้อนสี่เหลี่ยมและกลม มีเกรเดียนท์อุณหภูมิเป็น 6 K/nm [35]

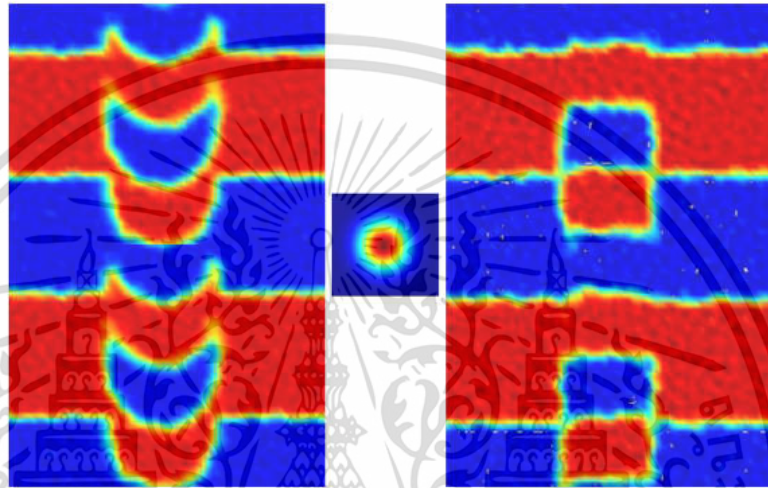
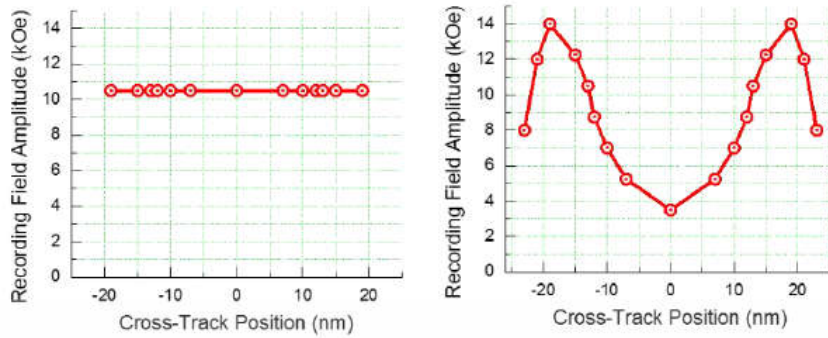
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



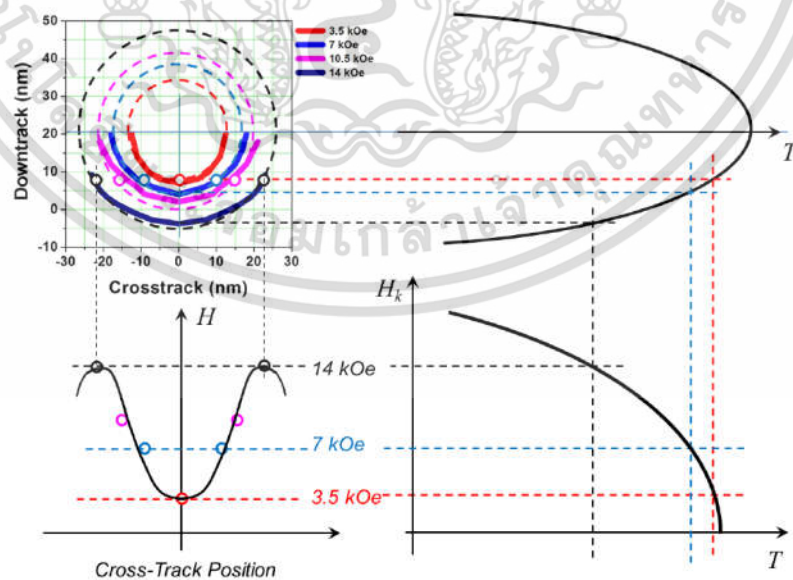
รูปที่ 2.24 SNR กับความหนาแน่นเชิงเส้นที่ความกว้างหัวอ่านเท่ากับกับความกว้างในการเขียนของสัญญาณที่ได้จากการให้ความร้อนด้วยโปรไฟล์สี่เหลี่ยมและกลม [35]

วิธีการแก้ความโค้ง (curvature solution) วิธีการแก้ปัญหาแรกก็คือวิธีที่ได้แสดงผลในส่วนที่แล้ว คือการใช้โปรไฟล์ความร้อนแบบสี่เหลี่ยมซึ่งจะทำให้ได้รอยต่อระหว่างบิตที่ตรงไม่โค้ง จึงทำให้เป็นอีกหนึ่งหัวข้อที่จะต้องพัฒนา แต่ในส่วนนี้จะเสนอการแก้ปัญหารอยต่อระหว่างบิตที่โค้งอีกหนึ่งอย่างคือ การมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน และจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีนี้ด้วย ข้อมูลจากส่วนที่แล้วพบว่าสัญญาณที่อ่านกลับจากการบันทึกนั้นไม่ได้มีเพียงแต่ผลกระทบจากการเขียนเพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลจากการอ่านด้วยดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเขียนเพียงอย่างเดียว ในการวิธีผลบางส่วนหัวเขียนจึงถูกเปลี่ยนโมเดลเป็น $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ เป็นหัวเขียนที่สมบูรณ์แบบ แต่ผลบางส่วนที่ยังให้โมเดลเดิมเพื่อสะท้อนถึงระบบจริง

บนพื้นฐานของโปรไฟล์ความร้อนกลมเดียวกัน แสดงในรูปที่ 2.25 ซ้ายบน แสดงขนาดของสนามแม่เหล็กในแนวขวางแทร์คที่มีค่าคงที่ 10.5 kOe ตลอดแนว ซึ่งเมื่อเขียนข้อมูลรอยการบันทึกจะเป็นดังรูปซ้ายล่างจะเห็นว่าบิตมีรูปร่างโค้ง แต่เมื่อเปลี่ยนรูปแบบขนาดของสนามแม่เหล็กในแนวขวางแทร์คเป็นดังรูปด้านขวาบน จะเห็นว่าขนาดของสนามแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนแปลงตลอดแนว ซึ่งขนาดของสนามแม่เหล็กนี้ถูกออกแบบตามโปรไฟล์ความร้อนกลมดังรูปที่ 2.26 เพื่อให้เกรนแม่เหล็กบริเวณขอบแทร์คมีโอกาสที่จะกลับทิศทางเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนบริเวณขอบแทร์คจะได้รับอิทธิพลของความร้อนต่ำกว่าตรงกลางแทร์คข้อมูล จากการออกแบบนี้ จะเห็นว่าบิตข้อมูลที่ได้มีรอยต่อระหว่างบิตที่ตรงไม่โค้ง



รูปที่ 2.25 (ซ้าย) ขนาดสนามแม่เหล็กคงที่ในแนวขวางแทร็ค (ขวา) ขนาดสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงในแนวขวางแทร็ค บันทึกด้วยโปรไฟล์ความร้อนวงกลมจะทำให้ได้รูปร่างบิดที่แตกต่างกัน [35]



รูปที่ 2.26 แผนภาพที่ใช้ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามแม่เหล็กในแนวขวางแทร็ค [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เครื่องมือวิจัยและกระบวนการทดลอง

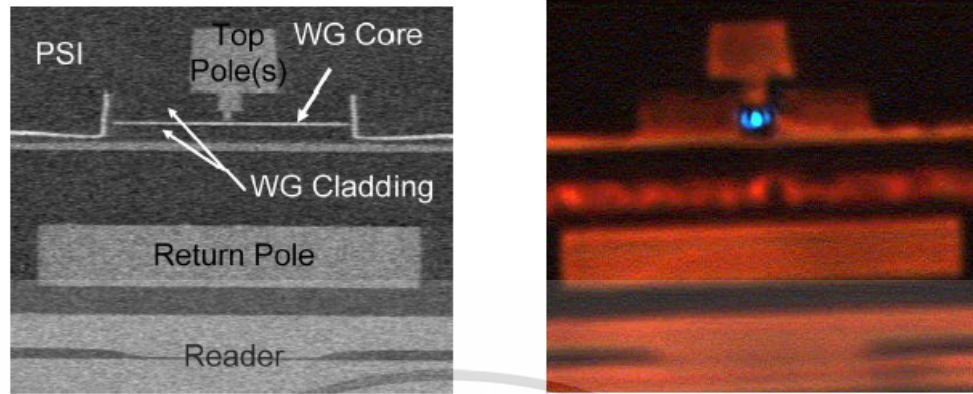
บทที่ 3 กล่าวถึงเครื่องมือวิจัยและการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจที่มาของผลการทดลองในบทถัดไป หัวข้อแรกจะแสดงชิ้นส่วนหัวบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยและแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลอง โดยคุณลักษณะการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยจะถูกวัดโดยเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.2 เครื่องมือนี้จะมีกระบวนการบันทึกหลายรูปแบบที่น่าสนใจ เช่น รูปแบบการลบข้อมูล รูปแบบข้อมูลความถี่เดียว และรูปแบบข้อมูลแบบเสมือนจริง เป็นต้น อธิบายในหัวข้อ 3.3 นอกจากนี้หัวข้อที่ 3.4 จะอธิบายถึงกระบวนการวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน อัตราความผิดพลาดบิต และการออกแบบแพ็คเกจที่จะช่วยเผยถึงสาเหตุที่ส่งผลต่อการพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่

3.1 หัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กของเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองโดยที่ใช้อุปกรณ์การทดลองต้นแบบจริงที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท ซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งประสิทธิภาพที่ได้เปิดเผยในบทความของ Alexander Q. Wu [22] มีความหนาแน่นเชิงพื้นที่โดยประมาณเท่ากับ 1200 Gbps ความกว้างแพ็คเกจประมาณ 40 nm

ตัวอย่างหัวบันทึกของเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วยที่นำมาทดลองมีจำนวน 5 ชั้น ลักษณะโครงสร้างของหัวบันทึกมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ หัวบันทึกแม่เหล็ก และหัวอ่านแม่เหล็ก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เมื่อก้าวถึงส่วนที่สำคัญได้แก่แหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งมีขนาดเหล็ก ดังนั้นจะต้องมี wave guide (WG) และ NFT ที่ช่วยลดความยาวคลื่นแสงจาก 800 nm สู่ขนาดต่ำกว่า 50 nm เมื่อหัวเขียนทำงานแสดงให้เห็นคล้ายในรูปตัวอย่างที่ 3.2 (ขวา)

ในส่วนของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก งานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย (1) ชั้น overcoat layer (2) ชั้นบันทึก (recording layer) (3) ชั้นอินเทอร์เลเยอร์ (interlayer) (4) ชั้นระบายความร้อน (heat sink layer) (5) ชั้น Soft Under Layer (SUL) และ (6) ชั้น substrate เป็นต้น ชั้นโครงสร้างที่สำคัญในเทคโนโลยีนี้ ได้แก่ ชั้นระบายความร้อน ที่มีคุณสมบัติช่วยระบายความร้อนเพื่อเก็บกักรักษาข้อมูลแม่เหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 3.1 [30] อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าศึกษาถึงผลกระทบที่ตามมาจากฉันทดังกล่าว ต่อประสิทธิภาพการบันทึกแม่เหล็กซึ่งจะถูกเปิดเผยในการศึกษานี้ ดังนั้นจึงทดลองกับแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันสามชนิดคือ (1) แบบปกติ (2) แบบชั้นระบายความร้อนความหนาที่แตกต่างกัน (3) แบบชั้นอินเทอร์เลเยอร์ที่แตกต่างกัน เป็นต้น



รูปที่ 3.1 ภาพถ่าย SEM และถ่ายด้วยกล้องของตัวอย่างหัวบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย [30]



| |
|--------------------|
| Lubricant/Overcoat |
| Recording layer |
| Interlayer |
| Heat sink |
| SUL |
| Substrate |

รูปที่ 3.2 แผ่นบันทึกแม่เหล็ก (ซ้าย) โครงสร้างแผ่นบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย (ขวา) [25]

ตารางที่ 3.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของแผ่นบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย [36]

| ชั้นแผ่นบันทึกแม่เหล็ก | ความหนา (nm) | Thermal conductivity (W/mK) | Specific heat (J/m ³ -K) |
|------------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Overcoat layer | 2.5 | N/A | N/A |
| Recording layer | 10 | 50 | 3x10 ⁶ |
| Interlayer | 15 | 3 | 2x10 ⁶ |
| Heat sink layer & SUL | 80 | 200 | 3x10 ⁶ |
| Glass substrate | Infinite | 1 | 2x10 ⁶ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือทดสอบสปินสแตนด

เครื่องมือทดสอบสปินสแตนด (spin-stand tester) [25] คือเครื่องมือทดสอบกระบวนการเขียนและอ่านของอุปกรณ์ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งสามารถช่วยวิเคราะห์คุณภาพของสิ่งผลิตได้เป็นอย่างดี ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถคัดเลือกชิ้นงานที่มีคุณภาพไปสู่ผู้บริโภค จุดเด่นคือสามารถทดสอบชิ้นส่วนหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กโดยไม่ต้องประกอบเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เลย ซึ่งลดขั้นตอนและของเสียในการผลิตได้ เครื่องมือทดสอบสปินสแตนดมีส่วนประกอบสำคัญประกอบด้วย 4 ส่วนดังต่อไปนี้

ชุดเครื่องมือกลของเครื่องมือทดสอบสปินสแตนด ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.3 จากบริษัท Guzik มีการใช้งานภาคอุตสาหกรรมประกอบ ด้วยแท่นสำหรับหมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็กและชุดเคลื่อนที่หัวบันทึก ซึ่งจะควบคุมการเคลื่อนที่สองลักษณะ คือ แบบหยาบสำหรับการเคลื่อนที่ตำแหน่ง X-Y และแบบละเอียดสำหรับการปรับตำแหน่งหัวบันทึกเข้าสู่แนวแทร็คที่ต้องการทดสอบ สามารถควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว และกำหนดระยะเวลาความสูงระหว่างหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กด้วยความละเอียดสูง (active fly clearance)

ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีหน้าที่ในการส่งคำสั่งเขียนและอ่าน ไปยังหัวบันทึกหรือแม่แต่วิเคราะห์สัญญาณ บางครั้งอาจเรียกส่วนนี้ว่า “ชุดประมวลผลการเขียนอ่าน (read write analyzer: RWA)” ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการทดสอบ

ชุดโปรแกรมควบคุม มีหน้าที่สั่งการควบคุมเครื่องผ่านการป้อนคำสั่งต่างๆ ซึ่งจะควบคุมทั้งส่วนของชุดเครื่องมือกลและชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์

คอมพิวเตอร์ มีหน้าที่แสดงผลการทดสอบ รับและส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานและเครื่องมือทดสอบ นอกจากนี้ช่วยในการจัดการข้อมูลเพื่อง่ายในการวิเคราะห์ภายหลัง โดยเชื่อมต่อกับโปรแกรมวิเคราะห์เพิ่มเติม เป็นต้น

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องมือทดสอบนี้ เริ่มต้นด้วยวางหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กในเครื่อง คอมพิวเตอร์จะส่งคำสั่งผ่านโปรแกรมควบคุม ชุดคำสั่งจะถูกเขียนโดยผู้ใช้งานตามขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ท้ายไปเมื่อเริ่มกระบวนการทดสอบ หัวบันทึกจะถูกวัดความต้านทานทางไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบว่าสามารถใช้งานได้ปกติ ต่อมาแผ่นบันทึกแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วที่ตั้งค่าไว้ จากนั้นหัวบันทึกจะเคลื่อนที่มายังรัศมีที่ต้องการทดลอง เมื่อมายังตำแหน่งที่ต้องการเรียบร้อยแล้วกระบวนการถัดมาคือการวัดระยะห่างระหว่างหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็ก จากนั้นปรับระยะบันทึกและเริ่มกระบวนการทดสอบตามลำดับ เพื่อที่จะวิเคราะห์ผลการทดสอบคอมพิวเตอร์และเครื่องมือวัดสัญญาณทางเวลาความละเอียดสูงจะเชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบสปินสแตนดเพื่อประมวลสัญญาณอ่านกลับเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

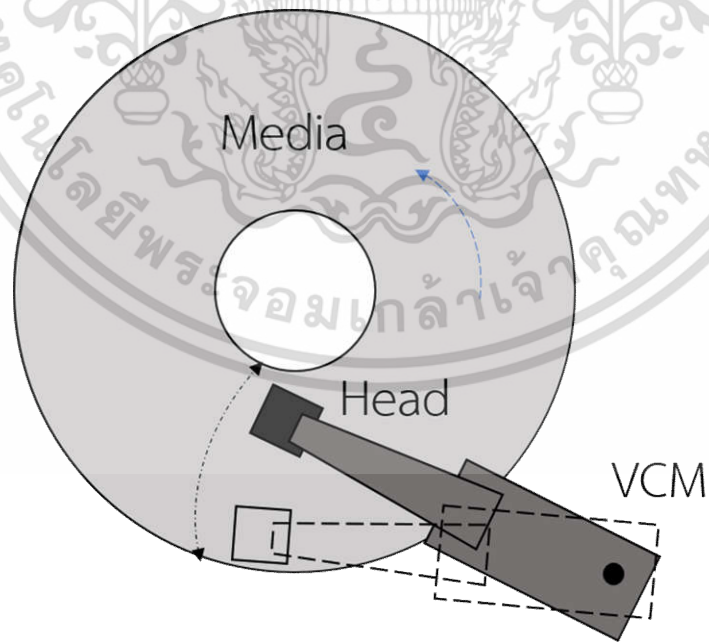
ในการทดสอบผู้วิจัยได้เลือกตัวหมุนชิ้นส่วนหัวบันทึกแบบความร้อนช่วยจำนวน 5 ชิ้น บันทึกลงยังแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีค่าคงที่แอนไอโซโทรปีแม่เหล็ก (magnetic anisotropy: K_u) สูง เงื่อนไขการทดสอบที่สำคัญ คือ (1) ความเร็วการหมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 5400 รอบต่อวินาที (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 2 นาโนเมตร (3) องศาการเอียงหัวเขียนต่อแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 1.34 องศา (4) รัศมี 0.860 นิ้ว เป็นต้น

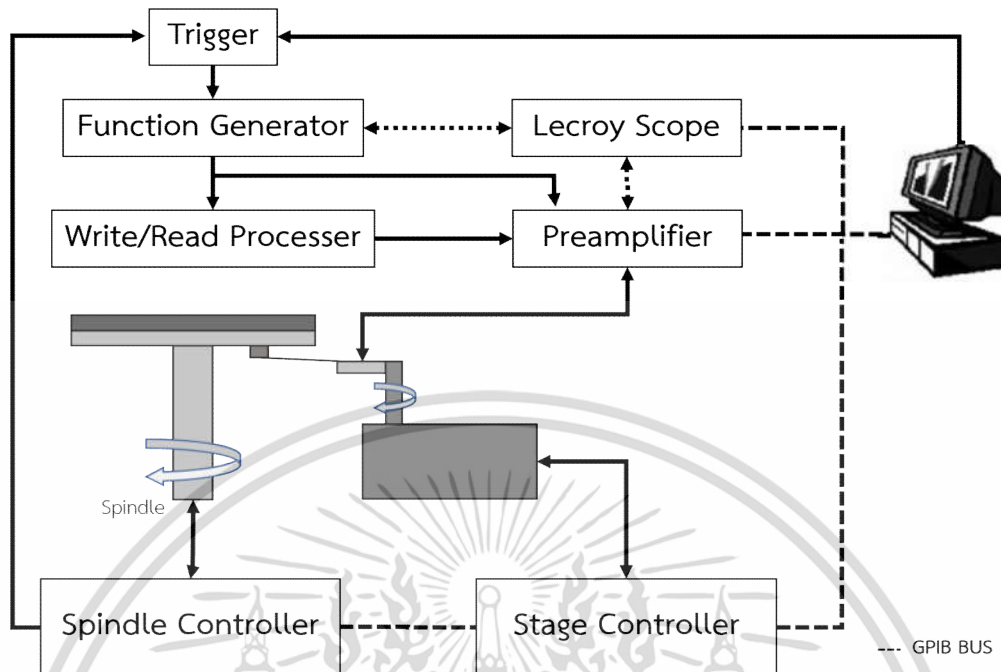


รูปที่ 3.3 เครื่องมือทดลองสปินสเตอร์ [25]



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเคลื่อนที่หัวบันทึกขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กระบวนการทำงานเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์

3.3 รูปแบบการบันทึกข้อมูล

หากกล่าวถึงจุดเริ่มต้นการกระบวนการทดสอบของเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กนั้นคือการบันทึกข้อมูล ซึ่งกระบวนการบันทึกแม่เหล็กมีรูปแบบข้อมูลหลัก อยู่ 2 แบบ คือ (1) รูปแบบข้อมูลความถี่เดียว (single tone frequency pattern) และ (2) รูปแบบข้อมูลแบบสุ่ม (pseudo random bit sequence pattern) ซึ่งมีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกันซึ่งจะกล่าวในส่วนถัดไป ดังต่อไปนี้

3.3.1 รูปแบบข้อมูลความถี่เดียว (single tone frequency pattern)

การทดสอบชิ้นส่วนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลทางแม่เหล็กโดยทั่วไป ข้อมูลที่ถูกเขียนสามารถสร้างโดยตัวสร้างสัญญาณ (signal generator) ซึ่งกำเนิดคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าให้แก่หัวบันทึกผ่านตัวขยายสัญญาณ (preamplifier) แปลงเป็นสนามแม่เหล็กเขียนไปยังแผ่นบันทึกแม่เหล็ก จะเห็นว่ากระบวนการเขียนจะไม่ซับซ้อน จำเป็นเพียงกำหนดความถี่ (f) และขนาดของสัญญาณที่ต้องการ รูปแบบการบันทึกลักษณะนี้จะเรียกว่า “รูปแบบข้อมูลความถี่เดียว” ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 3.6

ตัวอย่างการคำนวณหาขนาดบิต ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้บันทึกด้วยความถี่ 114.34 MHz บนตำแหน่งรัศมี 0.564 นิ้ว อัตราการหมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก 5400 รอบต่อวินาที (rpm) ดังนั้นอัตราข้อมูล (data rate) จะเท่ากับสองเท่าความถี่คือ 228.68 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) โดยทั่วไปสามารถคำนวณหาความหนาแน่นบิตได้จากสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$\text{Bit density (kbp)} = \text{Datarate (Mbps)} / \text{Linear velocity (ips)} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

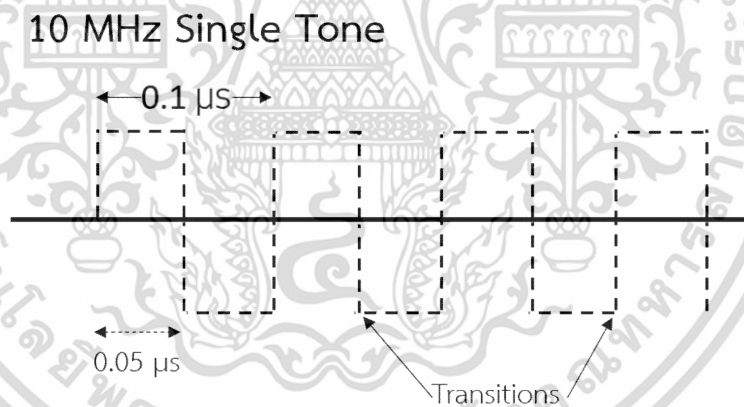
$$\text{Bit density} = (2 \times f) / (2 \times \pi \times r \times \text{RPM} / (60 \text{ sec/min})) \quad (3.2)$$

$$\text{Bit density} = (2 \times 114.34 \times 1000) / (2 \times \pi \times 0.564 \times 5400 / 60) \quad (3.3)$$

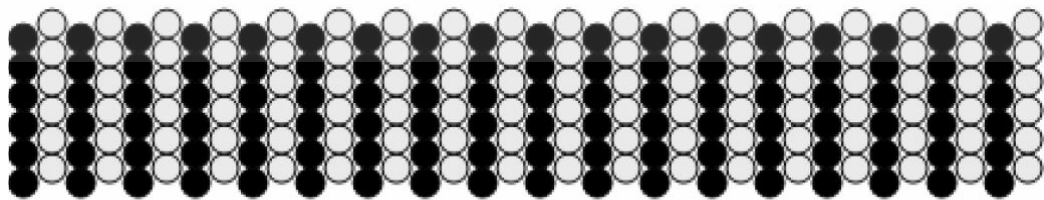
$$\text{Bit density} = \text{Datarate (Mbps)} / \text{Linear velocity (ips)} \quad (3.4)$$

$$\text{Bit density} = 717 \text{ kBPI} \quad (3.5)$$

การใช้งานหลักและจุดเด่น คือการลบข้อมูลซึ่งกระทำโดยกำหนดให้ใช้ความถี่สูง ส่งผลให้หัวบันทึกสร้างสนามแม่เหล็กสลับบิตหนึ่งคู่อย่างรวดเร็วต่อเนื่อง ส่งผลให้ท้ายสุดจะทำให้แมกนีไทเซชันเท่ากับคู่ย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 นอกจากนี้สามารถรองสัญญาณข้อมูลจากสัญญาณอ่านกลับได้ง่าย เพียงทราบความถี่ของข้อมูลที่บันทึก ตัวประมวลสัญญาณสามารถรองสัญญาณข้อมูลที่ต้องการออกมาจากสัญญาณอ่านกลับ ช่วยทำให้วิเคราะห์คุณภาพการบันทึกได้ชัดเจนขึ้น ข้อเสียของรูปแบบการบันทึกนี้คือ ไม่สามารถสะท้อนการใช้งานจริงของผู้บริโภคได้ทั้งหมด เนื่องจากการใช้งานจริงจะประกอบไปด้วยหลายความถี่มีบิตสั้นและบิตยาว กล่าวคือการสุ่มข้อมูลนั่นเอง



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างคลื่นสัญญาณข้อมูลความถี่เดียว แบบความถี่ 10 MHz



รูปที่ 3.7 ภาพจำลองบิตข้อมูลที่เขียนด้วยรูปแบบความถี่เดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 รูปแบบข้อมูลแบบสุ่ม (pseudo random bit sequence pattern)

รูปแบบกระบวนการเขียนถัดมาคือ ข้อมูลแบบสุ่ม (pseudo random bit sequence pattern: PRBS) [37] ลักษณะการจำลองข้อมูลเสมือนการใช้งานของผู้บริโภค จะประกอบไปด้วยบิตข้อมูลสุ่มรูปแบบที่ต่อเนื่องกัน บิตติดกันสั้นและยาวผสมกันไป ในการสร้างสัญญาณภาคแหล่งกำเนิดสัญญาณจะแม้ว่าจะมีลักษณะสุ่มแต่การทดสอบสามารถทราบได้ว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร เนื่องจากรูปข้อมูลแบบเสมือนจริงจะสร้างโดยตัวพหุนาม (polynomial) ดังสมการที่ (3.6)

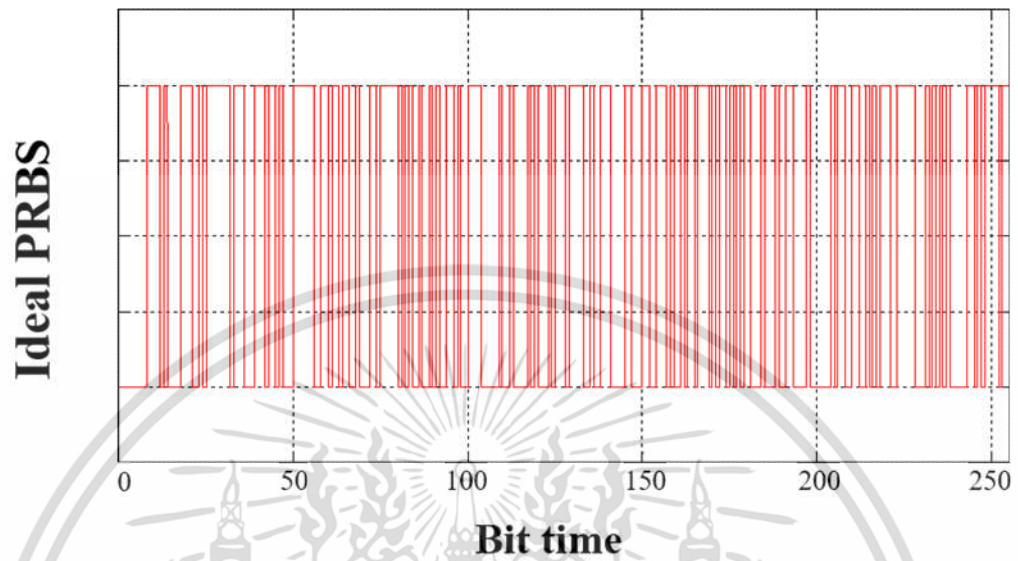
$$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (3.6)$$

ซึ่งจะให้ชุดข้อมูลแบบเสมือนจริงจำนวนบิต 255 บิต ดังต่อไปนี้

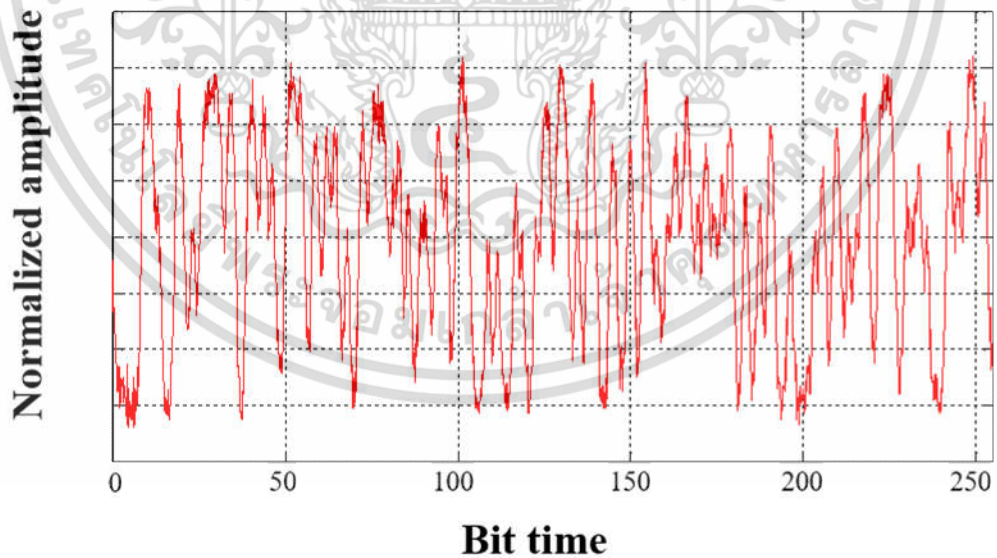
| | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| 11111111 | 00001011 | 11000110 | 10000000 |
| 10001110 | 00100101 | 11000000 | 11001001 |
| 00110111 | 00100000 | 10101101 | 10101100 |
| 10110000 | 11111011 | 01111010 | 11101000 |
| 10000110 | 11000111 | 10011100 | 11000101 |
| 10100100 | 01010010 | 10100111 | 01110110 |
| 01111011 | 11110100 | 11001101 | 01000110 |
| 00001110 | 10101011 | 11100101 | 0000100 |

รูปที่ 3.8 ชุดบิตข้อมูลแบบเสมือนจริง

การประโยชน์คือสามารถแสดงผลกระทบระหว่างบิตติดกันได้ ซึ่งไม่สามารถเห็นผลกระทบจากรูปแบบความถี่เดียว เนื่องมาจากช่วงบิตยาวติดกันจะส่งผลให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในระบบขณะเขียนข้อมูลบิตถัดไป ผลการทดลองจะเห็นชัดเจนเมื่อวิเคราะห์ด้วยอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ผลกระทบดังกล่าวจะเรียกว่า การเลื่อนรอยต่อระหว่างบิตที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear transition shift) เป็นต้น [38] นอกจากนี้รูปแบบข้อมูลชนิดนี้ถูกใช้ในการทดสอบมากมาย เช่น การหาอัตราข้อผิดพลาดบิต (bit error rate: BER) เป็นต้น



รูปที่ 3.9 สัญญาณอุดมคติชุดบิตข้อมูลแบบเสมือนจริง



รูปที่ 3.10 สัญญาณอ่านกลับชุดบิตข้อมูลแบบเสมือนจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

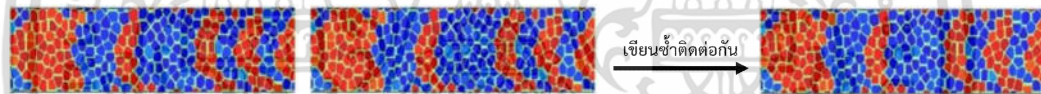
3.4 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio: SNR)

สัญญาณในระบบการบันทึกแม่เหล็กมีส่วนประกอบของสัญญาณข้อมูลและสัญญาณรบกวน สิ่งไม่พึงประสงค์ในระบบ ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณรบกวนหัวอ่าน สัญญาณรบกวนจากแผ่นบันทึกแม่เหล็ก และสัญญาณรอยต่อระหว่างบิต เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการทดสอบจึงต้องมีวิธีการวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เทคนิคดังกล่าวเรียกว่า “การจำแนกคลื่นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (ensemble of waveform signal to noise ratio) [27]” ซึ่งมีรายละเอียดและกระบวนการดังต่อไปนี้

3.4.1 การจำแนกคลื่นอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

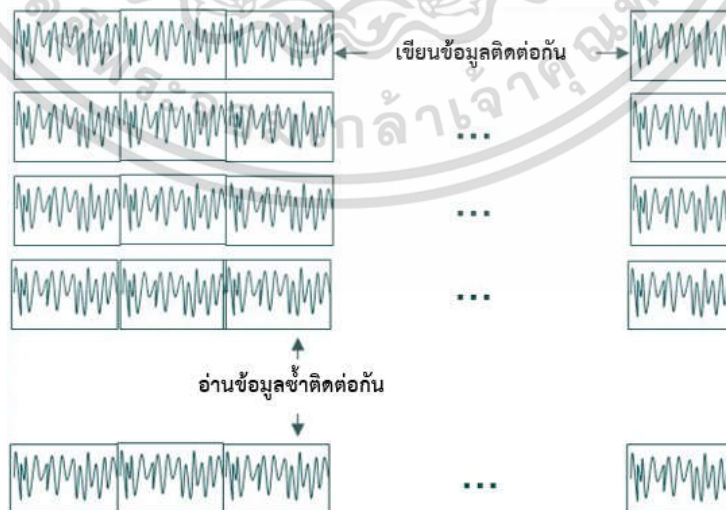
กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณต่อการรบกวน วิธีการนี้เผยแพร่โดย Stephanie Hernandez และคณะ [27] เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการประมวลสัญญาณอ่านกลับเพื่อแยกสัญญาณรบกวนหลากหลายชนิดออกมาจากระบบ ประโยชน์คือทำให้เข้าใจถึงสาเหตุที่ทำให้คุณภาพการบันทึกข้อมูลดีหรือไม่ดีช่วยแก้ไขปัญหาคือได้ตรงจุด เงื่อนไขวิธีนี้คือรูปแบบที่ใช้ต้องเป็นรูปแบบข้อมูลแบบสุ่มเท่านั้น ซึ่งกระบวนการขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

- 1) เขียนข้อมูล PRBS จำนวน 50 ช่วงต่อเนื่องกัน เพื่อสามารถวัดความแตกต่างของสัญญาณบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กได้เพราะเขียนด้วยข้อมูลแบบเดียวกัน หากบันทึกได้ต่างกันแสดงว่าเป็นผลจากแผ่นบันทึกแม่เหล็ก



รูปที่ 3.11 ภาพจำลองแมกนีโทเซนซ์ที่บันทึกข้อมูลรูปแบบ PRBS ต่อเนื่อง 50 ชุด

- 2) อ่านสัญญาณข้อมูลบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก PRBS วนซ้ำเป็นจำนวน 50 รอบ เพื่อนำมาแยกผลกระทบการรบกวนจากหัวอ่าน อิเล็กทรอนิกส์เมื่อเฉลี่ยคลื่นสัญญาณทั้งหมด



รูปที่ 3.12 สัญญาณอ่านกลับของข้อมูล รูปแบบ PRBS ต่อเนื่อง 50 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เฉลี่ยคลื่นสัญญาณที่อ่านถูกรอบทำให้ได้สัญญาณข้อมูลที่ปราศจากการสัญญาณรบกวนทางเวลา หากต้องการทราบสัญญาณรบกวนดังกล่าวสามารถคำนวณด้วยการนำสัญญาณอ่านกลับลบด้วยสัญญาณที่ปราศจากการสัญญาณรบกวนทางเวลาดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 สัญญาณข้อมูลที่ปราศจากการสัญญาณรบกวนทางเวลา



รูปที่ 3.14 สัญญาณรบกวนทางเวลา

- 4) ประมวลผลสัญญาณที่ปราศจากการรบกวนเชิงพื้นที่ด้วยการเฉลี่ยสัญญาณที่เขียน PRBS ทุกรอบ สุดท้ายจะได้สัญญาณที่แทบไม่มีสัญญาณรบกวนเหลืออยู่



รูปที่ 3.15 สัญญาณข้อมูลที่ไม่มีกรรบกวนและสัญญาณรบกวนเชิงพื้นที่

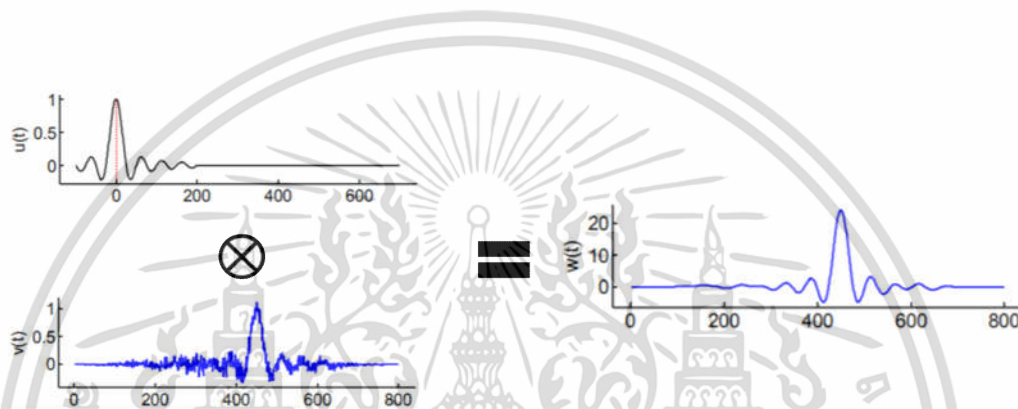
3.4.2 การวิเคราะห์ไตบิต (dibit extraction)

ในการบันทึกแม่เหล็ก หากต้องการทราบลักษณะของบิตหนึ่งบิตที่ถูกบันทึกบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการประมวลผลสัญญาณอ่านกลับเทียบกับชุดข้อมูลที่ทราบ ผ่านกระบวนการ cross-correlation ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเรียกว่า “ไตบิต” [28, 37] มีลักษณะเป็นคลื่นสัญญาณหนึ่งลูก ที่มีขนาดความกว้าง ณ ช่วงครึ่งหนึ่งจากขนาดสัญญาณสูงสุด เท่ากับความกว้างบิต จุดเด่นการไตบิตคือสามารถช่วยวิเคราะห์ความผิดพลาดระหว่างการเขียนและอ่านรูปแบบหนึ่ง มีขั้นตอนโดยละเอียดคือ

- 1) บันทึกข้อมูลด้วยสัญญาณรูปแบบ PRBS 256 บิต ซึ่งทราบค่าที่บิตบันทึก ($u(t)$)
- 2) อ่านสัญญาณอ่านกลับ ($v(t)$)
- 3) ประมวลผลสัญญาณด้วย cross-correlation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง cross-correlation เป็นแนวคิดที่สำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า สื่อสาร cross-correlation คือ การวัดสัญญาณ 2 ตัว ว่ามีความเหมือนกันเพียงใด ถ้าค่า cross-correlation ที่วัดได้มีค่ามาก ค่าเป็นบวกและตำแหน่งค่าสูงสุดใกล้ศูนย์บิต ก็แสดงว่าสัญญาณทั้งสองตัวมีความเหมือนกันมาก และการเปลี่ยนแปลงของขนาดเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในกรณีที่มีค่าน้อย แสดงว่า สัญญาณทั้ง 2 ตัว ไม่มีความเหมือนกัน และถ้าค่า cross-correlation ที่วัดได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่าสัญญาณทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน และมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กระบวนการ cross-correlation ระหว่างสัญญาณต้นแบบและสัญญาณอ่านกลับ

3.5 การวัดความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density)

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้สำหรับการวัดประสิทธิภาพการบันทึกข้อมูลคือ การคำนวณความหนาแน่นของข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ [22] ประกอบด้วยพื้นฐานกระบวนการดังนี้

- 1) กำหนดอัตราบิตผิดพลาด (BER) ที่ยอมรับได้ โดยคำนวณอัตราบิตผิดพลาดจากการเขียนและอ่านกลับ ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นเดคเคด (decade: dec) ในงานวิจัยนี้จะกำหนด -2.3 dec สำหรับการปรับ BPI และ -2.3 dec สำหรับ TPI
- 2) ความหนาแน่นของบิตต่อนิ้ว (Bit Per Inch, BPI) คือวัดความหนาแน่นของบิตข้อมูลต่อความยาว 1 นิ้วในแนวตามแทร็ก ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นกิโลบิตต่อนิ้ว (kilo Bit Per Inch: kBPI)
- 3) ความหนาแน่นของแทร็กต่อนิ้ว (Track Per Inch, TPI) คือเพื่อวัดความหนาแน่นของแทร็กข้อมูลต่อความกว้าง 1 นิ้วในแนวตัดขวางกับแทร็ก ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นกิโลแทร็กต่อนิ้ว (kilo Track Per Inch: kTPI)
- 4) ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (Areal Density: ADC) คือการวัดความหนาแน่นของข้อมูลเชิงพื้นที่ต่อหน่วย 1 ตารางนิ้ว ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นกิกะบิตต่อตารางนิ้ว (Giga Bit Per Square Inch: Gbit/in²)

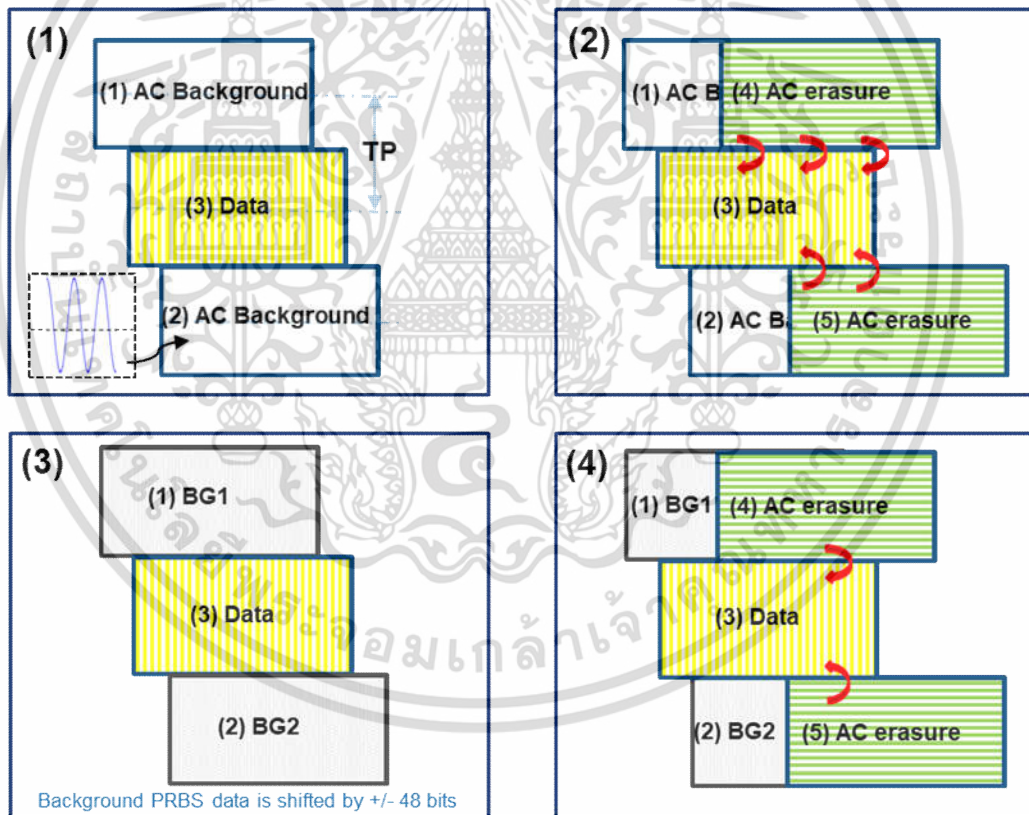
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบแทร็ก (Track layout)

เมื่อกล่าวถึงรูปแบบการบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลัง งานวิจัยนี้ได้ออกแบบไว้ 4 รูปแบบ คือ

- 1) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง
- 2) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง
- 3) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลังเดิม
- 4) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง

ซึ่งก่อนการทดสอบจะทำกระบวนการเตรียมแนวบันทึกข้อมูลด้วยการลบข้างด้วยความถี่สูง (1333 กิโลบิตต่อวินาที) เมื่อบันทึกเรียบร้อยแล้วจึงจะทำการวัดสัญญาณข้อมูล เพื่อประมวลผลอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน นอกจากนี้กระบวนการ dibit extraction จะนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่าประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเทียบระหว่างสัญญาณที่อ่านและสัญญาณอุดมคติ



รูปที่ 3.17 รูปแบบแนวบันทึกที่ใช้ทดสอบ (1) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (2) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง (3) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ (4) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

บทนี้นำเสนอผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่เป็นอุปสรรคในการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย นอกเหนือจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึง ไม่ว่าจะเป็นความแปรปรวนของอุณหภูมิในระบบการบันทึกและความโค้งงอของรอยต่อระหว่างบิต เป็นต้น โดยกระบวนการทดลองจะจำลองรูปแบบการบันทึกข้อมูลเสมือนจริงและรูปแบบต่างๆ เพื่อวิเคราะห์สัญญาณอ่านกลับทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังศึกษาวิธีการลดผลกระทบจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกกล่าวถึงด้วย เพื่อชี้แนะวิธีการลดผลกระทบของปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะช่วยให้เป็นแนวทางในการออกแบบพัฒนาอุปกรณ์บันทึกข้อมูลความจุสูงขึ้นในอนาคตได้

4.1 ผลกระทบของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background interference: BGI)

ในการบันทึกแม่เหล็กข้อมูลผู้ใช้งานจะถูกบันทึกบนแผ่นบันทึกแม่เหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยบิตข้อมูลจำนวนมาก เช่นเดียวกับจำนวนแตรึมมากมายเรียงติดกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแตรึมมีขนาดเล็กส่งอาจส่งผลกระทบต่อสัญญาณอ่านกลับได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนจากแตรึมข้างเคียงหรือสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

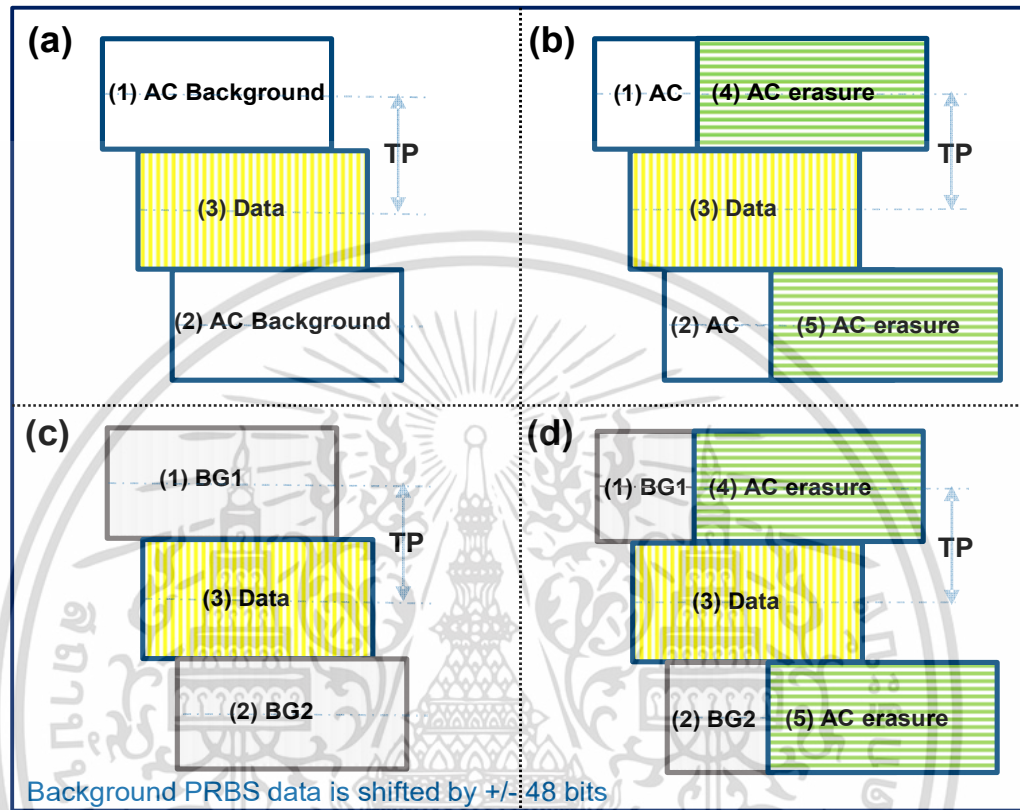
กระบวนการทดสอบจะจำลองเขียนและอ่านข้อมูลรูปแบบการบันทึกของผู้ใช้งานจริง ที่บันทึกข้อมูลแบบ PRBS บันทึกทับข้อมูลพื้นหลัง จากนั้นจะวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่เป็นตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของสัญญาณที่บันทึก และใช้เทคนิค dibit extraction เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย เช่น ปัจจัยจากชั้นระบายความร้อนของแผ่นบันทึกแม่เหล็ก เป็นต้น โดยอาศัยฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้นแบบและเครื่องมือทดลองสปินสแตนด์

4.1.1 กระบวนการทดลอง

ในการทดสอบผู้วิจัยได้เลือกตัวแทนชิ้นส่วนหัวบันทึกแบบความร้อนช่วยเขียนจำนวน 5 ชิ้น บันทึกลงยังแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีค่า K_u สูง เงื่อนไขการทดสอบที่สำคัญ คือ (1) ความเร็วการหมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 10500 รอบต่อนาที (2) ระยะห่างหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 2 nm (3) องศาการเอียงหัวเขียนต่อแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ และ (4) ความถี่การเขียนที่ 1400 กิโลบิตต่อวินาที เป็นต้น

เมื่อกล่าวถึงรูปแบบการบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลัง จะถูกออกแบบไว้ 4 รูปแบบ คือ (1) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (2) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแตรึมข้างเคียงทั้งสองข้าง (3) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ (4) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง โดยทุกรูปแบบก่อนการทดสอบจะทำกระบวนการเตรียมแตรึมบันทึกข้อมูลด้วยการลบล้างด้วยความถี่สูง (1333 กิโลบิตต่อวินาที) ดังแสดงในรูปที่ 4.1(a) เมื่อบันทึกเรียบร้อยแล้วจึงจะทำการวัดสัญญาณข้อมูล เพื่อประมวลผลอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ

รบกวน นอกจากนี้กระบวนการ dibit extraction จะนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาค่าประกอบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเทียบระหว่างสัญญาณที่อ่านและสัญญาณอุดมคติ



รูปที่ 4.1 รูปแบบการบันทึกที่ใช้ทดสอบ (a) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (b) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแตร็คเคียงทั้งสองข้าง (c) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ (d) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง

4.1.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์

การทดลองแรกเพื่อศึกษาผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลัง โดยวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจากข้อมูลแบบ PRBS ที่ได้บันทึก โดยมีรูปแบบแตร็คดังรูปที่ 4.1(a) และ 4.1(b) นอกจากนี้จะวิเคราะห์ผลของระยะห่างระหว่างแตร็ค (track pitch: TP) ประกอบด้วย 40, 50, 75, 100 และ 125 เพอร์เซ็นต์ของความกว้างแตร็ค

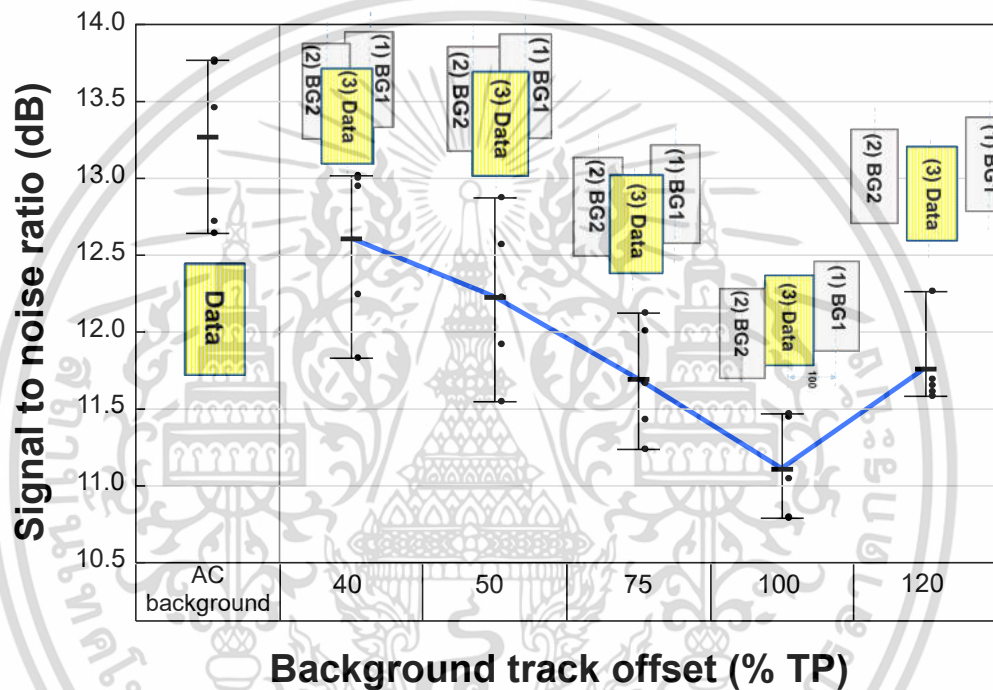
จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลังบนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน พบว่าในกรณีที่ไม่มีกรบันทึกสัญญาณพื้นหลังจะทำให้มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีที่สุด ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.27 dB ต่อมาในกรณีจำลองรูปแบบของผู้ใช้งานจริงคือบันทึกข้อมูลโดยมีสัญญาณพื้นหลัง พบว่าที่ระยะห่างระหว่างแตร็คที่ 100 เพอร์เซ็นต์ของความกว้างแตร็ค จะได้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแย่มากที่สุด โดยต่ำกว่ากรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ไม่มีสัญญาณพื้นหลังเท่ากับ 2.17 dB จะเห็นว่าสัญญาณพื้นหลังส่งผลต่อการบันทึกข้อมูลมีความผิดพลาดได้

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแทร็คให้กว้างขึ้น เช่น ระยะ 120 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากขณะอ่านข้อมูลจะมีการแทรกสอดของสัญญาณพื้นหลังที่ลดลงจากการที่แทร็คดังกล่าวอยู่ห่างจากหัวบันทึก

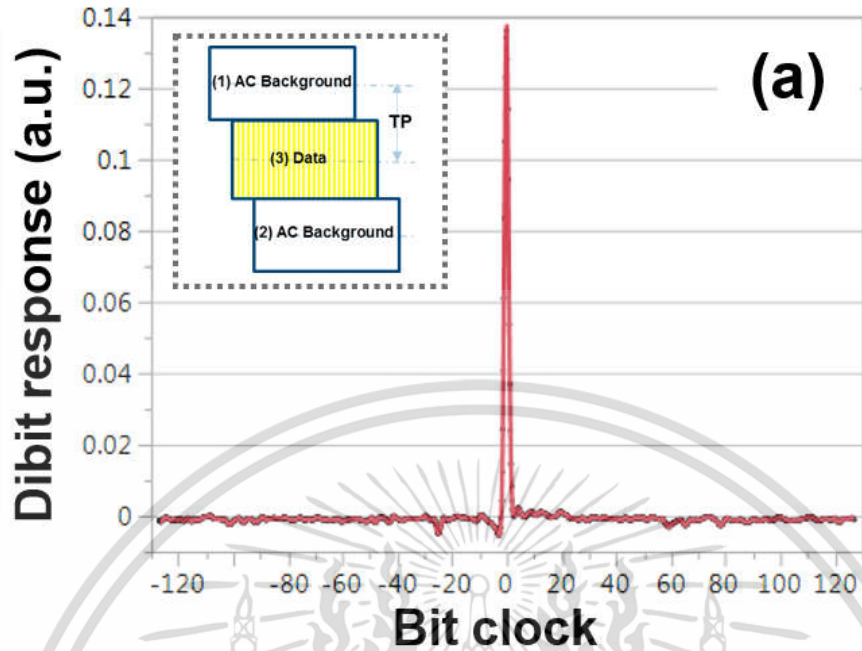
อีกกรณีหนึ่งเมื่อบันทึกข้อมูลโดยกำหนดระยะห่างระหว่างแทร็คบันทึกใกล้กันรวมถึงการเขียนซ้อนทับกัน จะทำให้สนามแม่เหล็กขณะบันทึกกลบล้างข้อมูลของแทร็คข้างเคียงส่งผลให้สัญญาณพื้นหลังมีขนาดแอมป์ไทเซชันลดลง เมื่ออ่านข้อมูลกลับจะเกิดการรบกวนจากพื้นหลังลดลง



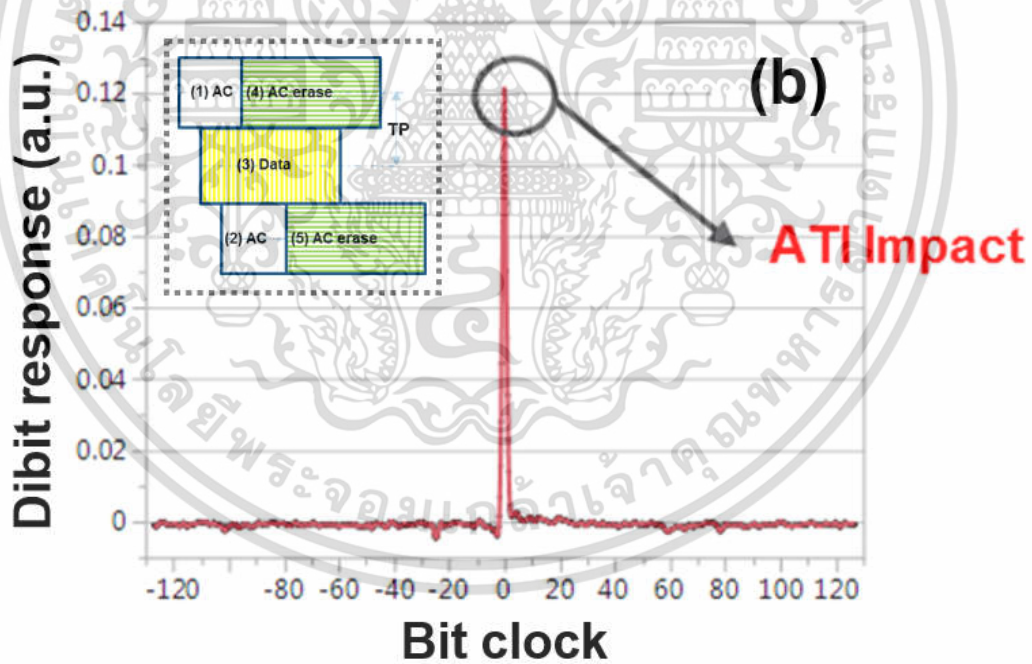
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลังบนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ระยะห่างระหว่างแทร็คต่างๆ ในการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย

ในรูปที่ 4.3 – 4.6 แสดงถึงการประมวลผลสัญญาณด้วยเทคนิค dibit extraction เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้ระยะห่างระหว่างแทร็คที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างแทร็คมีระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนแย่มากที่สุด ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน เบื้องต้นพบว่าการทดลองบันทึกข้อมูล PRBS 256 บิต เมื่อไม่มีข้อมูลพื้นหลัง ผลการประมวลผลสัญญาณอ่านกลับจะไม่มี ความเพี้ยนเกิดขึ้น สอดคล้องกับผลการวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.3

ต่อมาเมื่อกระทำการลบแทร็คข้างเคียงด้วยสนามแม่เหล็กความถี่สูง เพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนบันทึกต่อสัญญาณข้อมูล (Adjacent-Track Interference: ATI) พบว่ากระบวนการเขียนส่งผลต่อระดับสัญญาณข้างเคียงลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง



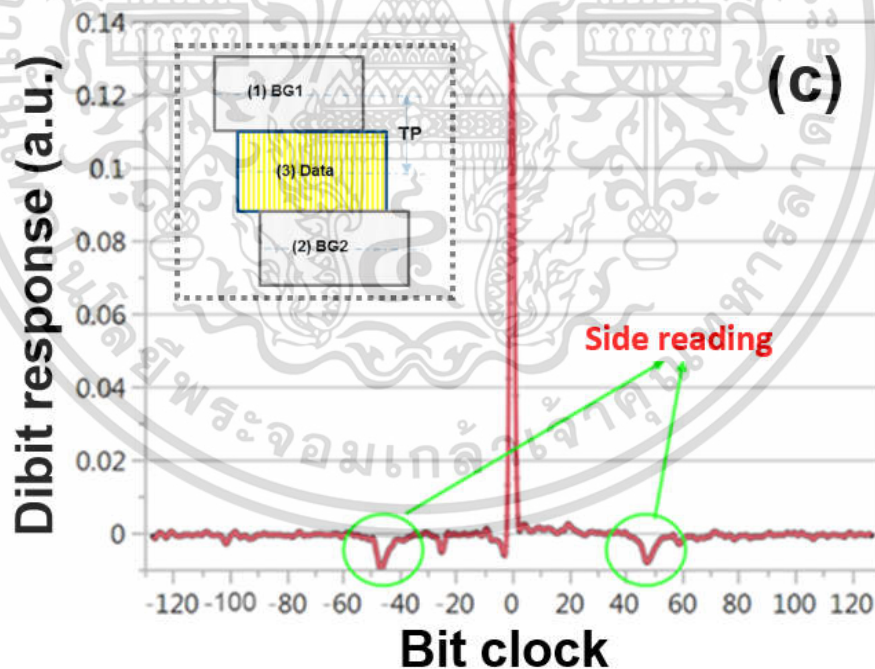
รูปที่ 4.4 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

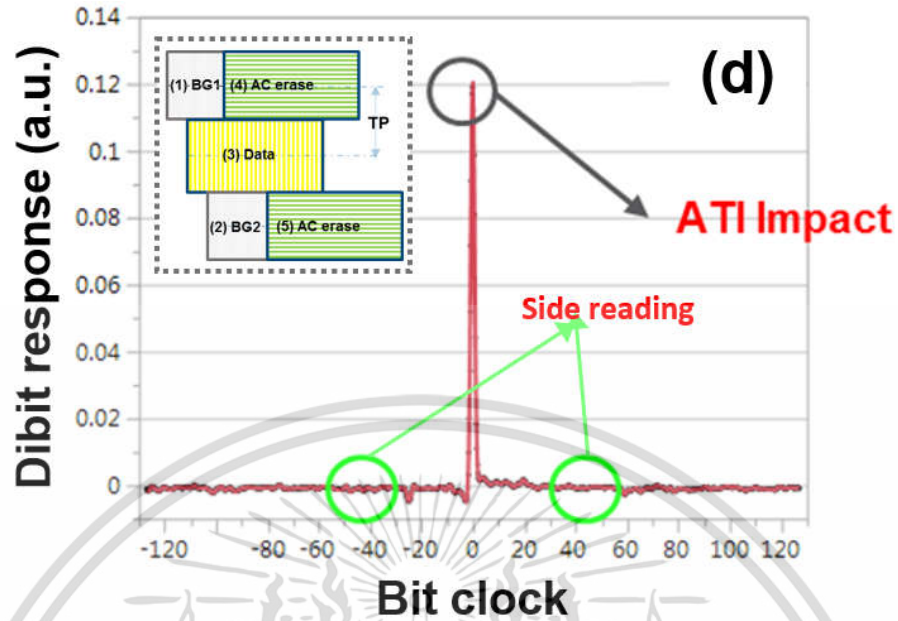
เมื่อบันทึกข้อมูลที่ประกอบด้วยสัญญาณพื้นหลังข้างเคียงที่บันทึกด้วย PRBS เช่นเดียวกับแทร็คกลาง แต่กำหนดให้มีความแตกต่างของเฟสข้อมูลเลื่อนไป ± 48 บิต เพื่อแยกแหล่งที่มาของสัญญาณ ได้แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ผลการทดสอบมีลูกคลื่นแทรกซ้อนที่ตำแหน่ง ± 48 บิต โดยมีเฟสตรงข้าม ซึ่งให้เห็นว่ามีการอ่านสัญญาณแทรกสอดจากแทร็คข้างเคียง สอดคล้องกับผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลังบนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน สมมติฐานของสัญญาณแทรกสอดที่มีเฟสตรงข้าม เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กจากชั้น Soft Under Layer (SUL) ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กเหนี่ยวนำหัวอ่านโดยตรง

จากนั้นทำการลบแทร็คข้างเคียงด้วยสนามแม่เหล็กความถี่สูง ส่งผลทำให้ระดับความเข้มของสัญญาณลดต่ำลงและสัญญาณแทรกสอดถูกลบล้าง ดังแสดงในรูป 4.6 ซึ่งให้เห็นว่ากรณีบันทึกข้อมูลที่มีแทร็คข้างเคียงที่ระยะ 100 เพอร์เซ็นต์ จะส่งผลต่อการกระบวนการอ่านกลับ เกิดการแทรกสอดรบกวนจากข้อมูลพื้นหลังอย่างชัดเจน

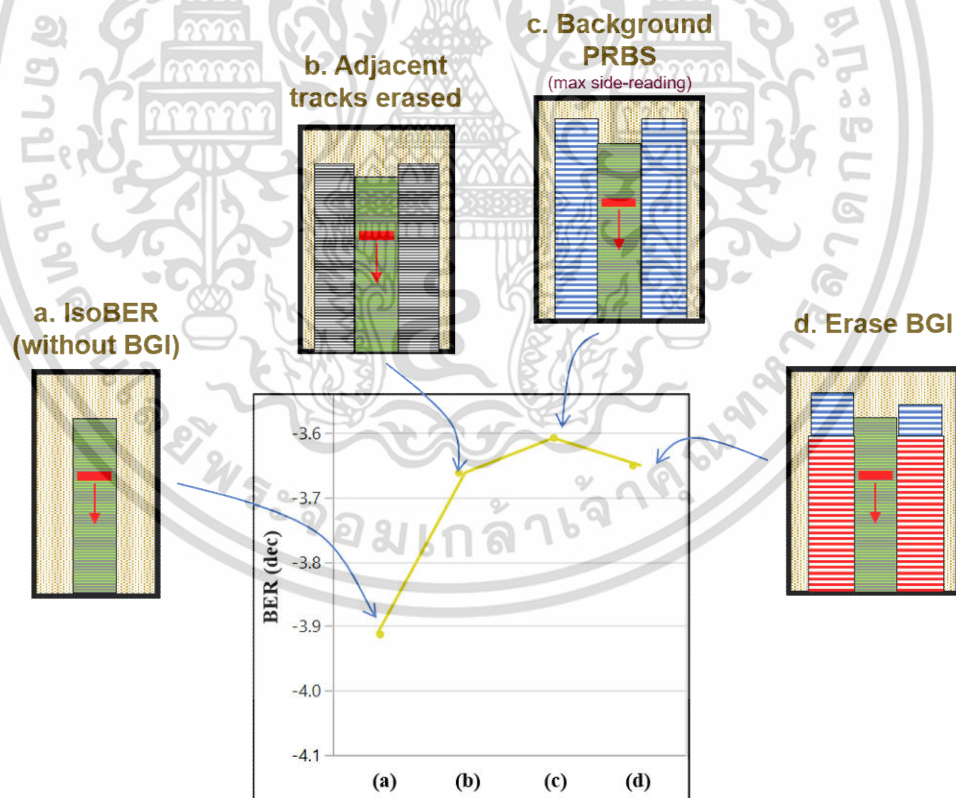
นอกจากนี้กระบวนการทดสอบวัด BER ได้ชี้ให้เห็นตรงกันว่า การมีอยู่ของข้อมูลพื้นหลังส่งผลต่อสัญญาณอ่านกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อบันทึกข้อมูลในกรณีที่ไม่มีข้อมูลพื้นหลังจะทำให้ได้ BER ดีที่สุด ต่อมาเมื่อบันทึกข้อมูล ณ แทร็คข้างเคียงจะส่งผลให้สัญญาณอ่านกลับแทร็คกลางมีคุณภาพลดต่ำลง ผลจาก ATI อย่างไรก็ตามเมื่อบันทึกข้อมูลโดยมีข้อมูลพื้นหลังจะทำให้ BER มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากขณะอ่านสัญญาณกลับมีการรบกวนจากข้อมูลดังกล่าว หากแทร็คข้างเคียงถูกเขียนลบไปจะทำให้ได้ BER สูงขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลการประมวลสัญญาณ dabit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง



รูปที่ 4.6 ผลการประมวลสัญญาณ dibit extraction กรณีการบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง

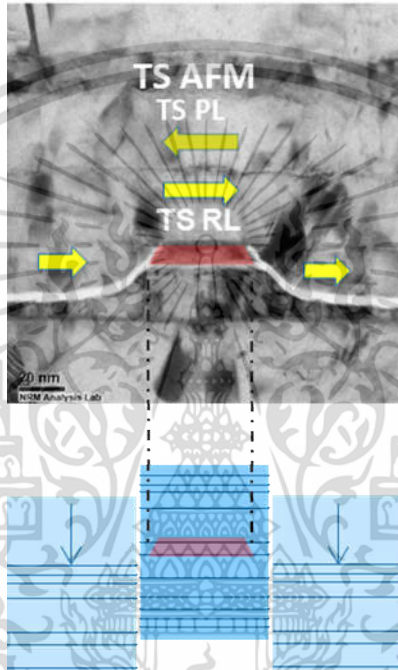


รูปที่ 4.7 การวัดค่า BER เมื่อบันทึกรูปแบบทั้ง 4 แบบ 1) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง 2) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบแนวข้างเคียงทั้งสองข้าง 3) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง และ 4) การบันทึกข้อมูลโดยมีการลบสัญญาณพื้นหลัง

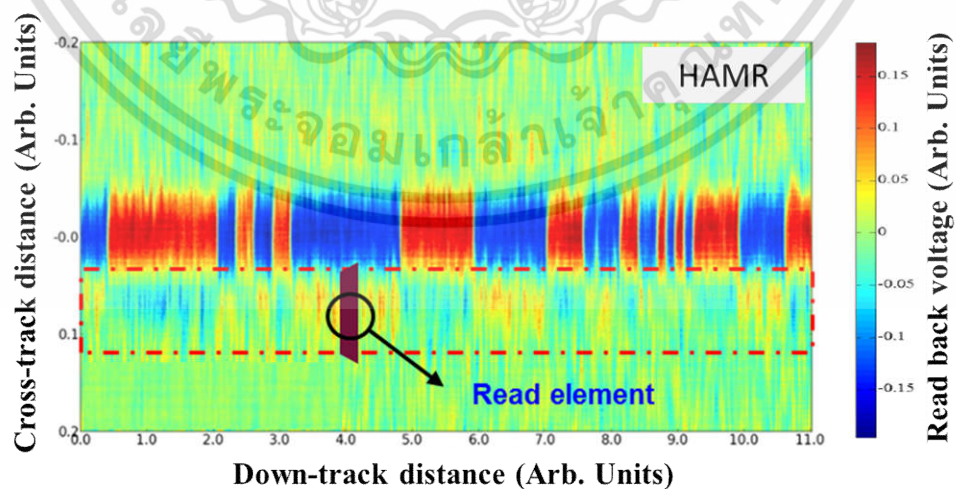
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สรุปผลทดลองศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยอาศัยการตัวชี้วัดที่สำคัญคือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนรวมถึงการใช้เทคนิค dibit extraction และ BER ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อบันทึกข้อมูลโดยมีแทร็คพื้นหลังที่ระยะห่างระหว่างแทร็ค 100 เพอร์เซ็นต์ จะทำให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำลง 2.17 dB เมื่อเทียบกับกรณีไม่มีสัญญาณพื้นหลัง เนื่องจากมีสัญญาณพื้นหลังแทรกสอดรบกวนหัวอ่านดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทำให้สัญญาณอ่านกลับถูกแทรกข้อมูลแทร็คข้างเคียง ดังแสดงในรูป 4.9



รูปที่ 4.8 การจำลองโครงสร้างหัวอ่านขณะอ่านข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

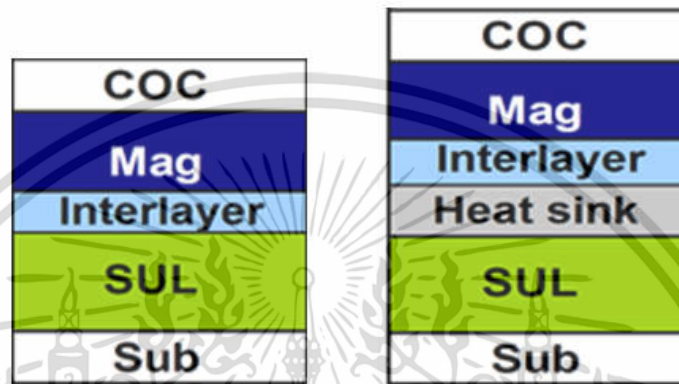


รูปที่ 4.9 ภาพสองมิติจากการประมวลผลสัญญาณอ่านกลับที่มีสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

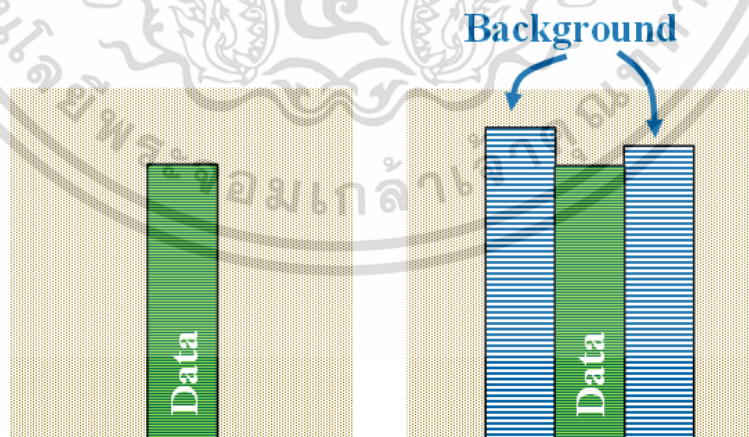
4.2 ผลกระทบความหนาชั้นระบายความร้อนที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง

การทดลองศึกษาแนวทางการลดผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลัง สมมติฐานหนึ่งที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีปัจจุบันและแบบความร้อนช่วยเขียน คือชั้นระบายความร้อนของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งส่งผลต่อมุมมองและระยะห่างระหว่างหัวอ่านและชั้น SUL เปลี่ยนไป ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กจากชั้น SUL เหนี่ยวนำการแทรกสอดของสัญญาณในหัวอ่านสูงขึ้น



รูปที่ 4.10 โครงสร้างแผ่นบันทึกแม่เหล็กแสดงถึงชั้นระบายความร้อน

ดังนั้นหัวข้อนี้จึงศึกษาผลกระทบของความหนาชั้นระบายความร้อนที่มีต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ซึ่งออกแบบรูปแบบการบันทึกเปรียบเทียบกันสองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยจะทดสอบบันทึกกับแผ่นบันทึกแม่เหล็กสามตัวอย่าง ที่มีความหนาชั้นระบายความร้อนแตกต่างกัน คือ แบบหนา แบบปานกลาง และแบบบาง ตามลำดับ

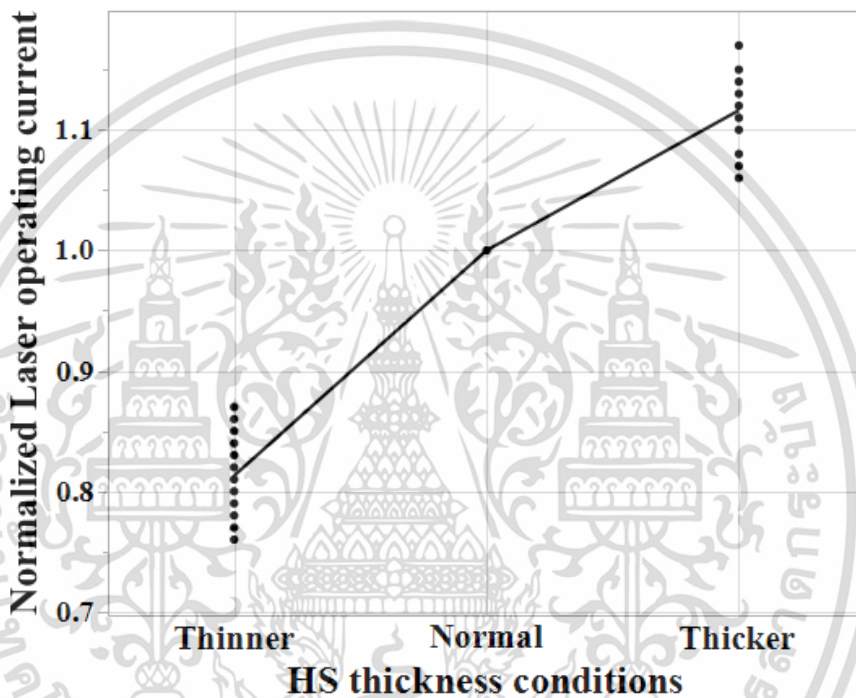


รูปที่ 4.11 ภาพจำลองรูปแบบการบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากความหนาชั้นระบายความร้อน (ซ้าย) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (ขวา) การบันทึกข้อมูลแบบมีสัญญาณพื้นหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบเบื้องต้นชี้ให้เห็นถึงผลของความหนาชั้นระบายความร้อนต่อความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ แสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อแผ่นบันทึกแม่เหล็กมีความหนาชั้นระบายความร้อนสูงจะทำให้ชั้นบันทึกข้อมูลระบายความร้อนได้ดี ส่งผลให้ต้องใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์สูงขึ้น จึงจะเปลี่ยนสถานะแม่เหล็กของชั้นบันทึกข้อมูลได้

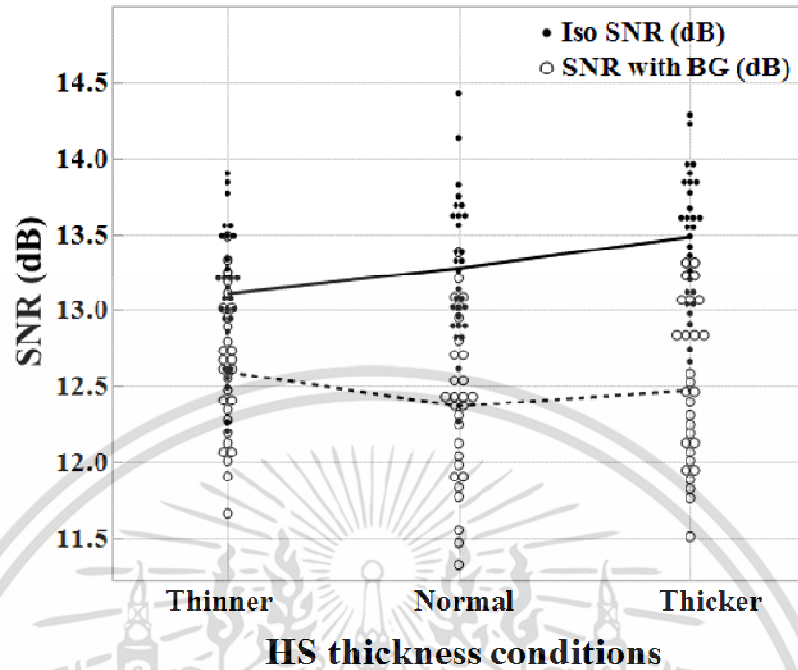
ในทางตรงกันข้ามหากความหนาชั้นระบายความร้อนบางลงจะทำให้ ชั้นบันทึกข้อมูลไม่สามารถระบายความร้อนได้ดี ส่งผลให้อุณหภูมิสูง เพียงใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับเลเซอร์ระดับหนึ่งก็สามารถบันทึกข้อมูลได้



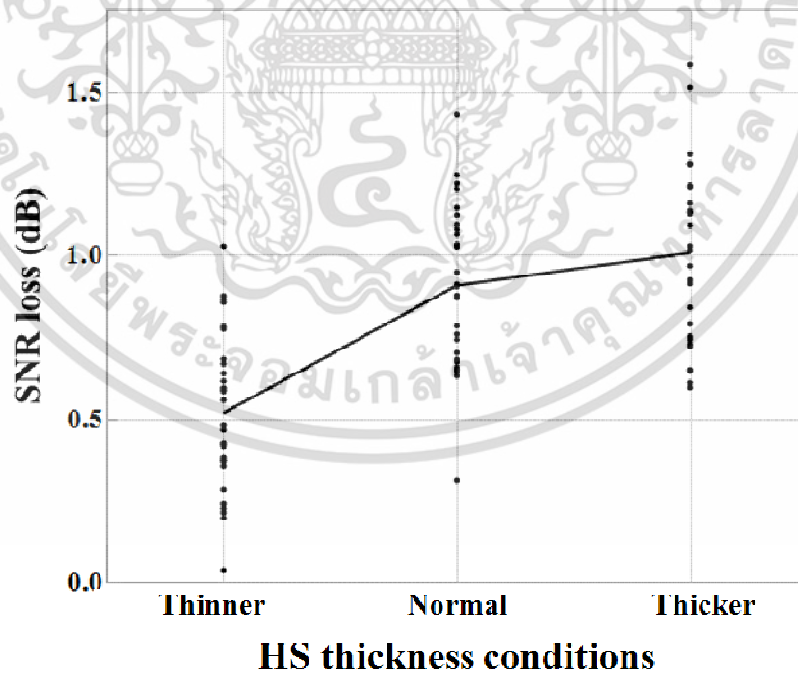
รูปที่ 4.12 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการของเลเซอร์สำหรับแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีความหนาชั้นระบายความร้อนเงื่อนไขต่างๆ

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.13 กรณีที่ไม่มีแทร็คพื้นหลังข้างเคียง พบว่าเมื่อความหนาของชั้นระบายความร้อนบางลงส่งผลต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนต่ำลง 0.25 dB เมื่อเทียบกับชั้นระบายความร้อนแบบหนา เนื่องจากความร้อนชั้นบันทึกสูงและการระบายความร้อนไม่ดี

ประเด็นสำคัญพบว่า กรณีความหนาชั้นระบายความร้อนบางลงสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณพื้นหลังได้ดีที่สุด ค่าเฉลี่ย 0.5 dB ในขณะที่ผลกระทบของการแทรกสอดสัญญาณพื้นหลังพบสูงถึง 1.0 dB เมื่อบันทึกที่ความหนาของชั้นระบายความร้อนแบบหนา เหตุผลเนื่องจากระยะห่างระหว่างชั้นบันทึกข้อมูลและชั้น SUL ห่างไกลกันมากขึ้นส่งผลต่อเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก การทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกความหนาของชั้นระบายความร้อนที่เหมาะสม จะช่วยลดผลกระทบของการแทรกสอดของสัญญาณพื้นหลังได้ อย่างไรก็ตามการระบายความร้อนต้องพิจารณาด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ควรมีการทดลองศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของความหนาชั้นระบายความร้อนต่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.14 ผลต่างของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างไม่มีข้อมูลพื้นหลังและมีข้อมูลพื้นหลังที่ความหนาชั้นระบายความร้อนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

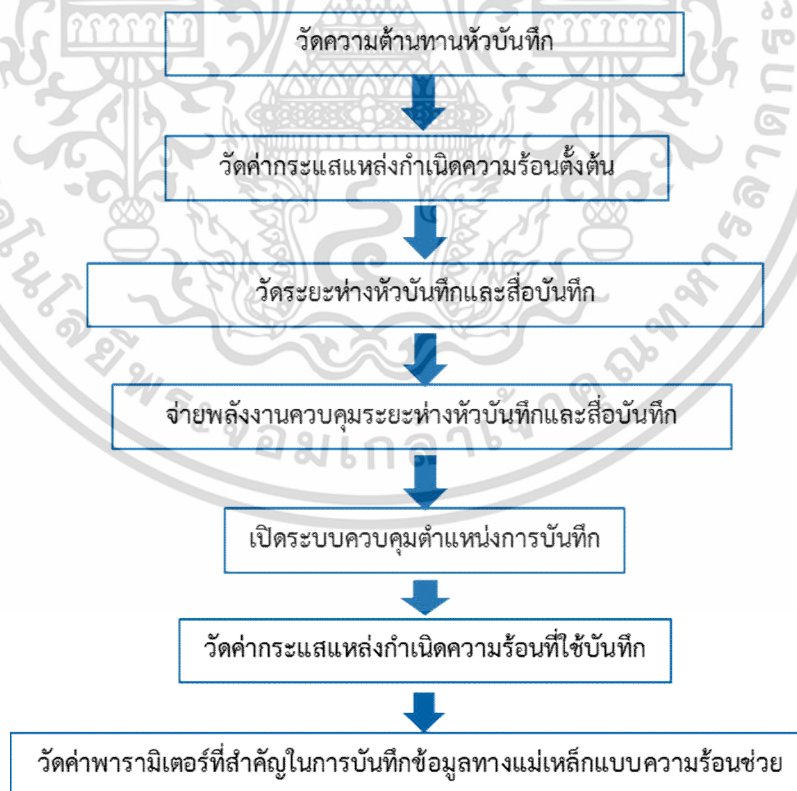
4.3 ผลกระทบความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง

ในแง่ของแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจากเทคโนโลยีเดิมนั้น คือเสริมชั้นระบายความร้อนเพื่อช่วยระบายความร้อนขณะบันทึกข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ที่สำคัญส่งผลต่อชั้นอื่นๆ อย่างเช่นชั้นอินเทอร์เลเยอร์ (interlayer) ที่มีความสำคัญในการสร้างแผ่นบันทึกแม่เหล็กต้องมีขนาดความหนาลดลงเพื่อคงขนาดความหนาโดยรวมของแผ่นบันทึกแม่เหล็กให้มีขนาดใกล้เคียงเดิม ประกอบเข้าเป็นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทั้งนี้ส่วนในแง่ของประสิทธิภาพและการสัญญาณรบกวนนั้น ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเผยแพร่อย่างจริงจัง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาผลกระทบความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง

ในการทดสอบได้บันทึกลงยังแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีค่า K_u สูง เงื่อนไขการทดสอบที่สำคัญคือ (1) ความเร็วการหมุนแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 10500 รอบต่อนาที (2) ระยะห่างหัวบันทึกและแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับ 2 nm (3) องศาการเอียงหัวเขียนต่อแผ่นบันทึกแม่เหล็กเท่ากับศูนย์ และ (4) ความถี่การเขียนที่ 1400 กิโลบิตต่อวินาที เป็นต้น สำหรับแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่นำมาทดลองมี 3 รูปแบบ

1. ชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบหนา
2. ชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบปกติ
3. ชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบบาง

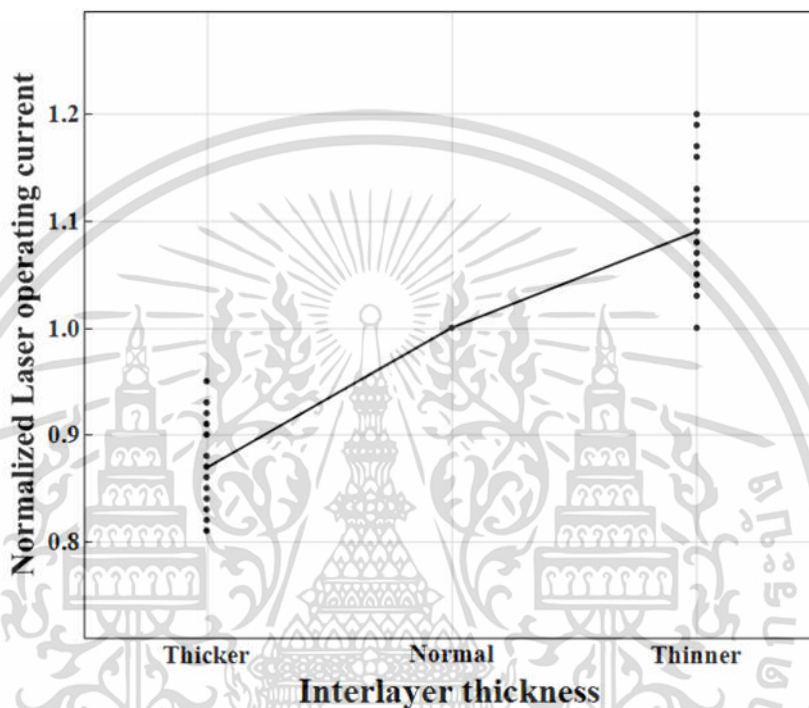
โดยรูปกระบวนการทดลองจะประกอบไปด้วยขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กระบวนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลทดลองการวัดค่ากระแสไฟฟ้าของเลเซอร์ที่ใช้ชั้นบดกบนแผ่นบันทึกที่มีชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบความหนาต่างๆ พบว่าชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบบางต้องการใช้กระแสที่สูงสุดเมื่อเทียบกับชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบหนา สาเหตุเนื่องการระยะห่างระหว่างชั้นบันทึกใกล้กับชั้นระบายความร้อน ทำให้ความร้อนระบายความร้อนได้ดี ส่งผลให้ต้องการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จะช่วยให้อุณหภูมิชั้นบันทึกข้อมูลสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16

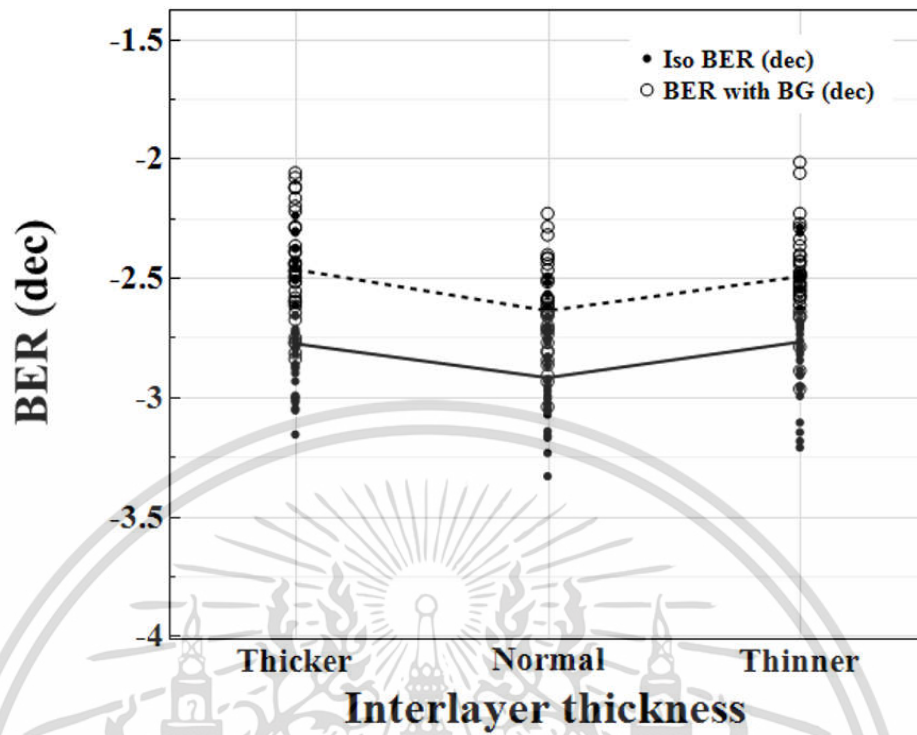


รูปที่ 4.16 ค่ากระแสไฟฟ้าของเลเซอร์สำหรับแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบต่างๆ

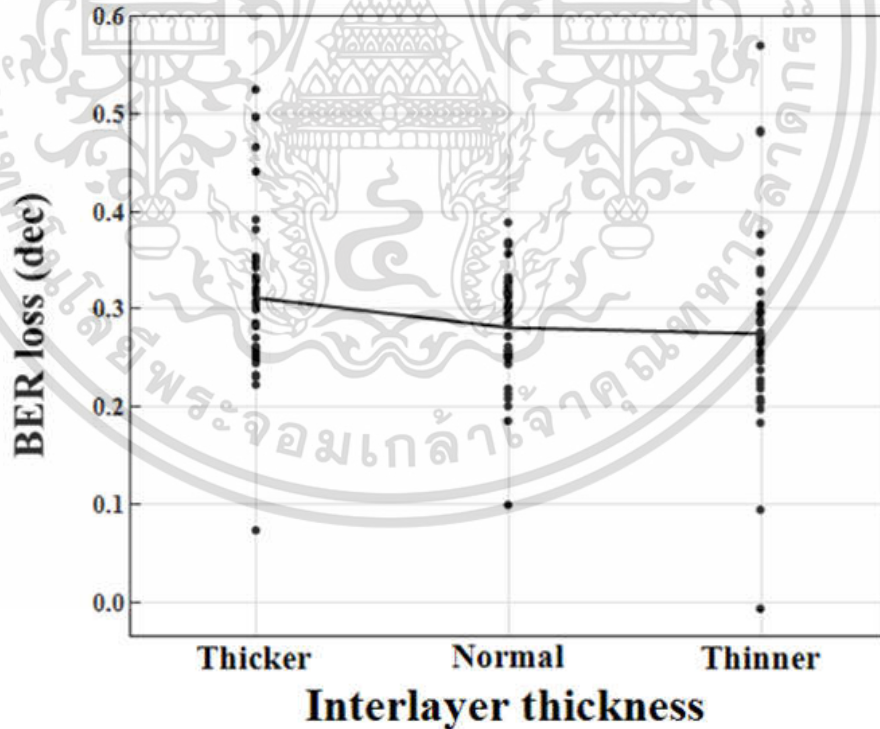
เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบต่างๆ ในแง่ BER พบว่าประสิทธิภาพการบันทึกข้อมูลไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบความหนาแบบต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณพื้นหลังพบว่า BER ในกรณีความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ปกติดีที่สุด ผลต่างเมื่อเทียบกับความหนาอื่นๆ เพียง 0.13 dec ดังแสดงในรูปที่ 4.17

ในรูปที่ 4.18 แสดงผลกระทบต่อ BER เมื่อมีสัญญาณพื้นหลัง พบว่า กรณีที่ความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบบางจะทำให้ผลกระทบกับ BER ดีขึ้น 0.04 dec เมื่อเทียบกับความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบหนา สมมติฐานเนื่องจากชั้นบันทึกข้อมูลใกล้กับชั้น SUL มาขึ้นส่งผลให้เส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็กดีขึ้น

ในหัวข้อนี้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ต่อสัญญาณพื้นหลัง พบว่าแผ่นบันทึกแม่เหล็กที่มีชั้นอินเทอร์เลเยอร์แบบบาง มีแนวโน้มจะมีประสิทธิภาพการบันทึกดีขึ้น แต่ต้องแลกกับอายุการใช้งานของหัวบันทึก เนื่องจากใช้กระแสแหล่งกำเนิดความร้อนสูง ทั้งนี้การศึกษานี้จะเป็นความรู้ที่ช่วยเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์บันทึกข้อมูลความจุสูงในอนาคตได้



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ต่อ BER

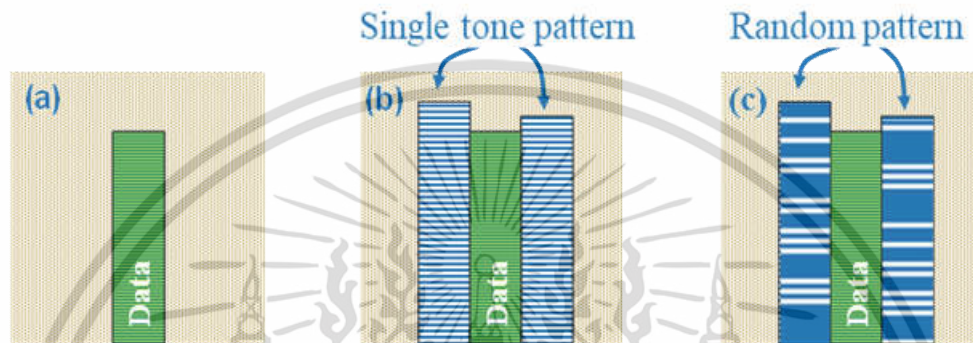


รูปที่ 4.18 ผลต่างของ BER ระหว่างไม่มีสัญญาณข้อมูลพื้นหลังและมีสัญญาณข้อมูลพื้นหลังที่ความหนาชั้นอินเทอร์เลเยอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลกระทบของรูปแบบข้อมูลที่มีผลต่อสัญญาณพื้นหลัง

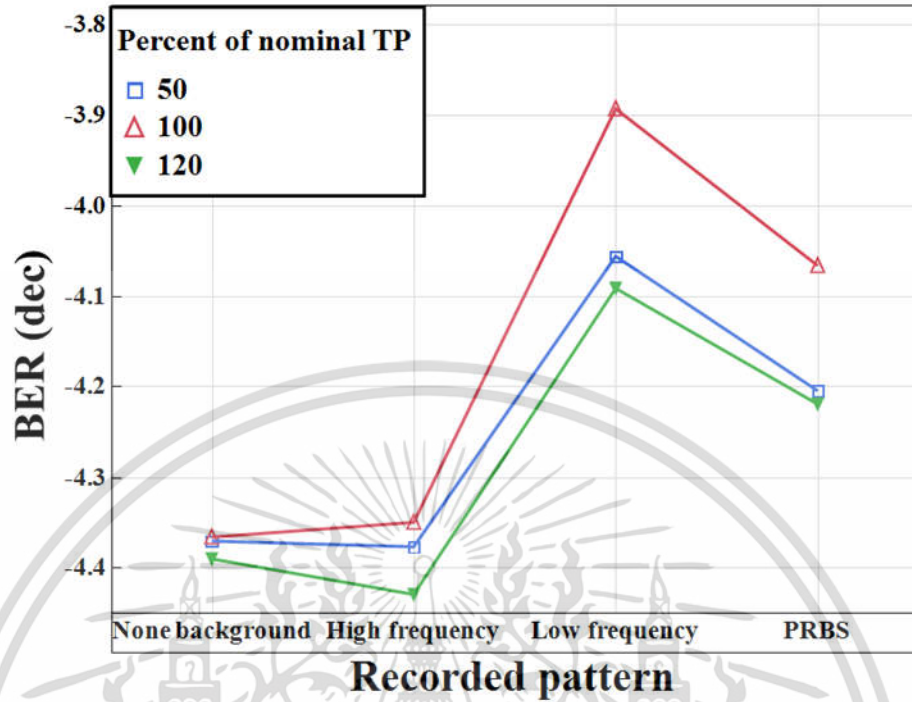
การทดลองนี้ศึกษาผลกระทบของสัญญาณพื้นหลังกับรูปแบบข้อมูลที่บันทึกแบบต่างๆ ประกอบด้วย (1) ไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (2) สัญญาณพื้นหลังแบบความถี่เดียว และ (3) สัญญาณพื้นหลังแบบ PRBS ดังแสดงในรูปที่ 4.19 เพื่อนำเสนอรูปแบบข้อมูลที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบันทึกข้อมูลที่สุด เงื่อนไขการทดลองจะเหมือนกับการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ผลการทดลองจะประกอบด้วย ผลการวัด BER และ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ดังที่จะกล่าวต่อไป



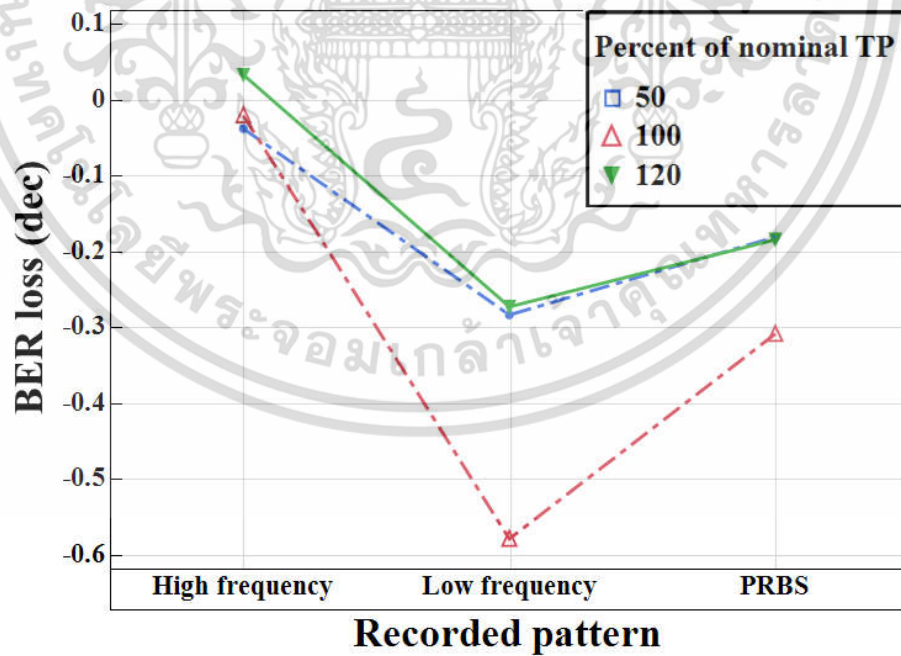
รูปที่ 4.19 รูปแบบการบันทึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากรูปแบบข้อมูล (a) การบันทึกข้อมูลแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลัง (b) สัญญาณพื้นหลังแบบความถี่เดียว (c) สัญญาณพื้นหลังแบบ PRBS

ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การบันทึกข้อมูลแทรกพื้นหลังด้วยความถี่สูงจะช่วยลดผลกระทบสัญญาณพื้นหลังได้ดี ซึ่งทั้งผลการวัด BER และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนให้ผลที่สอดคล้องกัน ที่ระยะห่างระหว่างแทรก 100% พบว่า กรณีบันทึกด้วยความถี่สูงจะให้ส่งผลให้ BER สูงขึ้นกว่า 0.1 dec เมื่อเทียบกับรูปแบบ PRBS ดังนั้นหากปรับปรุง Data rate การบันทึกของ PRBS ให้เร็วขึ้น มีแนวโน้มช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณพื้นหลังได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

ในรูปที่ 4.23 แสดงผลการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ทราบว่ารูปแบบการบันทึกและระยะห่างระหว่างแทรก ไม่ส่งผลต่อสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นส่งผลมาจากกระบวนการบันทึกข้อมูล เมื่ออ่านสัญญาณที่ถูกบันทึกบนแผ่นบันทึกแม่เหล็กพบว่าข้อมูลที่ถูกรบกวนและข้อมูลจากแทรกข้างเคียงจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบันทึก ดังนั้นในการพัฒนาชิ้นส่วนอุปกรณ์กระบวนการบันทึกต้องคำนึงซึ่งกันและกันเพื่อให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด เช่น ความเร็วในการบันทึกและระยะห่างระหว่างแทรก เป็นต้น

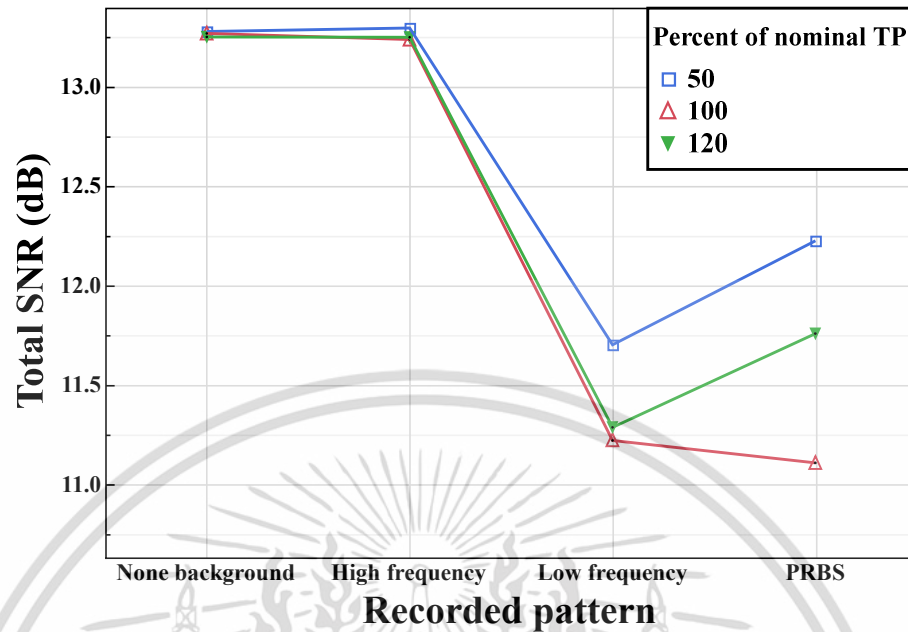


รูปที่ 4.20 ผลการวัด BER ของรูปแบบการบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแตร็คที่แตกต่างกัน

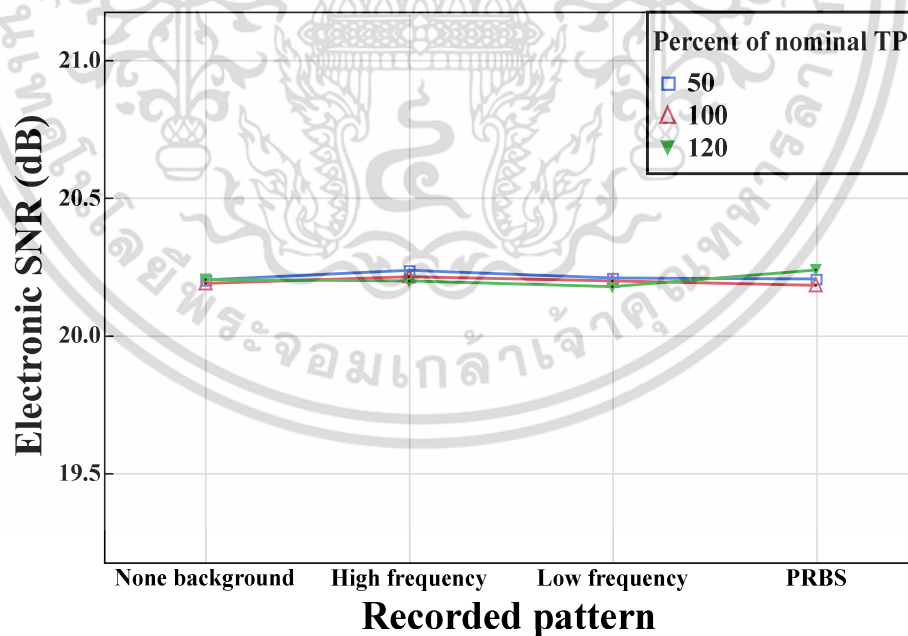


รูปที่ 4.21 ผลต่างของ BER ระหว่างแบบไม่มีสัญญาณพื้นหลังและรูปแบบการบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแตร็คที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเมื่อบันทึกรูปแบบข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแตร็คที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.23 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอิเล็กทรอนิกส์เมื่อบันทึกรูปแบบข้อมูลแบบต่างๆ ที่ระยะห่างระหว่างแตร็คที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุปกรณ์บันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถพัฒนาความหนาแน่นเชิงพื้นที่ให้สูงกว่าขีดจำกัดของเทคโนโลยีปัจจุบัน อาศัยการเปลี่ยนวัสดุแม่เหล็กของแผ่นบันทึกแม่เหล็กและปรับปรุงหัวบันทึกแม่เหล็กร่วมกับแหล่งจ่ายความร้อน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาพบว่ามีความสามารถในการเพิ่มความหนาแน่นแตร็คดี อย่างไรก็ตามความหนาแน่นบิตต่อหนึ่งนิ้วยังไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงมุ่งศึกษาปัญหาและแนวทางการพัฒนาเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการสนับสนุนข้อมูลช่วยในการพัฒนาอุปกรณ์บันทึกแม่เหล็กไม่มากนักน้อย ทั้งนี้ยังมีข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจศึกษาต่ออีกด้วย หากมีข้อผิดพลาดผู้วิจัยขออภัยรับคำแนะนำเพื่อปรับปรุง

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองด้วยเครื่องมือทดสอบสปีดสแตนด์และชิ้นส่วนต้นแบบอุปกรณ์บันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นผลกระทบของสัญญาณอ่านกลับจากสัญญาณรบกวนพื้นหลังมีอัตราส่วนสูงถึง 2.17 dB โดยเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระหว่างกรณี (1) เขียนข้อมูลที่ไม่ใช่ข้อมูลพื้นหลัง และ (2) เขียนข้อมูลโดยมีแตร็คข้างเคียงติดกัน โดยรูปแบบการบันทึกนี้สะท้อนการใช้งานในทางปฏิบัติ ซึ่งผู้วิจัยพบปัญหาดังกล่าวเป็นครั้งแรก

นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าผลกระทบเกิดจากการรบกวนแตร็คสอดของสัญญาณพื้นหลังกระทำต่อหัวอ่าน ผลการวิเคราะห์ได้บ่งชี้ให้เห็นว่าสัญญาณพื้นหลังรบกวนการอ่านสัญญาณข้อมูล โดยมีลักษณะข้อมูลที่บ่งชี้ว่ามาจากแตร็คข้างเคียง ผลการทดลองสันนิษฐานว่าเกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กจากชั้นบันทึกข้อมูลในแผ่นบันทึกแม่เหล็กรบกวนหัวอ่านมากกว่าจะไปยังชั้น SUL เนื่องจากชั้นบันทึกข้อมูลและชั้น SUL มีระยะห่างกันมากกว่าเทคโนโลยี PMR เพราะการมีชั้นระบายความร้อนคั่นอยู่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งสู่ชั้น SUL ไม่สะดวก

จากการทดลองเพื่อศึกษาปัญหาการรบกวนของสัญญาณพื้นหลัง งานวิจัยนี้ได้ศึกษา 3 สมมุติฐานคือ (1) ความหนาแน่นระบายความร้อน (2) ความหนาแน่นอินเทอร์เลเยอร์ และ (3) รูปแบบการบันทึกข้อมูล มีข้อสังเกตพบว่า

- 1) การเขียนข้อมูลที่แตร็คซ้อนทับกันจะทำให้การรบกวนสัญญาณพื้นหลังลดลง
- 2) การเขียนข้อมูลที่ระยะขอบแตร็คห่างกันจะทำให้การรบกวนสัญญาณพื้นหลังลดลง
- 3) การปรับปรุงความหนาแน่นระบายความร้อนบางลงจะทำให้การรบกวนสัญญาณพื้นหลังลดลง
- 4) การเขียนข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลหรือความถี่สูงจะทำให้การรบกวนสัญญาณพื้นหลังลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า การเลือกความหนาชั้นต่างๆของแผ่นบันทึกแม่เหล็กให้เหมาะสมจะช่วยลดผลกระทบของสัญญาณพื้นหลังได้ อย่างไรก็ตามปัจจัยอื่นๆ ต้องพิจารณาด้วยเช่นกัน เช่น การระบายความร้อน อายุการใช้งานหัวเขียน เป็นต้น นอกจากนี้ควรมีการทดลองศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อการปรับปรุงพัฒนาเทคนิคการบันทึกแม่เหล็กแบบความร้อนช่วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ผลการทดลองด้วยเครื่องมือมาตรฐานและอุปกรณ์ชิ้นส่วนต้นแบบจริงนี้จะชี้โอกาสในการแก้ไขปัญหาการรบกวนสัญญาณพื้นหลังด้วยการปรับปรุงแผ่นบันทึกแม่เหล็ก ปรับปรุงความเร็วการเขียนข้อมูล แต่ข้อมูลเชิงฟิสิกส์ยังไม่สามารถเข้าใจได้ละเอียดนัก ด้วยเหตุนี้การศึกษาในแง่การอธิบายปรากฏการณ์และการสร้างโมเดลจำลองทางแม่เหล็กน่าจะมีส่วนช่วยให้ผู้วิจัยพัฒนาเข้าใจในปัญหามากขึ้น รวมถึงสามารถออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็ว ด้วยความสามารถในการจำลองให้ได้ชิ้นส่วนต้นแบบที่เหมาะสมจากนั้นจึงผลิตชิ้นส่วนจริง สิ่งเหล่านี้จะช่วยทั้งลดเวลาและลดของเสียได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2562. รายงานสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. [Online]. Available : <http://www.oie.go.th>
- [2] Wanna Yongpisanphob. 2564. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566. [Online]. Available : <http://ww.krungsri.com/th/research>
- [3] Tom Coughlin. 2020. HDD Market History And Projections. [Online]. Available : <https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2020/05/29/hdd-market-history-and-projections/?sh=6dbc107a6682>
- [4] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2560. อุตสาหกรรม 4.0 (Industry 4.0) แนวทางของอุตสาหกรรมแห่งอนาคต. [Online]. Available : https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/industry-4-0/
- [5] Horizon Editorial. 2020. HDD Remains Dominant Storage Technology. [Online]. Available : <https://www.horizontechnology.com/news/hdd-remains-dominant-storage-technology-1219/>
- [6] Piya Kovintavewat. 2007. Signal Processing for Digital Data Storage Volume I: Basic Read-Write Channels. National Electronics and Computer Technology Center. Bangkok : National Electronics and Computer Technology Center.
- [7] S. N. Piramanayagam, and T. C. Chong, **Developments in data storage materials perspective**, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
- [8] R. Wood, "Future hard disk drive systems," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, pp. 555-561, 2009.
- [9] idema. 2016. **ASTC Technology Roadmap**. [Online]. Available : http://idema.org/?page_id=5868
- [10] M. H. Kryder, "Magnetic recording beyond the superparamagnetic limit," 2000 **IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)**, 2000, pp. 575-575.
- [11] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, and H. Tanaka, "Future options for HDD storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, pp. 3816-3822, 2009.
- [12] S. Granz et al., "Areal Density Comparison Between Conventional, Shingled, and Interlaced Heat-Assisted Magnetic Recording With Multiple Sensor Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 3, pp. 1-3, March 2019, Art no. 3100203.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] G. Xie, K. Luo, S. Wang, P. Lu, W. Cheng and J. Chen, "Rounded Corner Effect on Write Performance for Shingled Magnetic Recording System," **2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC)**, 2018, pp. 1-2.
- [14] Y. Kanai, H. Tamura, K. Yamakawa, K. Yoshida, S. J. Greaves and H. Muraoka, "Model Analysis of Magnetic Write Head for Shingled Thermally Assisted Magnetic Recording," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 3001404.
- [15] S. Wang, A. Ghoreyshi, and R. H. Victora, "Feasibility of bit patterned media for HAMR at 5 Tb/in²," **J. Appl. Phys.**, vol. 117, 17C115, 2015.
- [16] T. R. Albrecht et al., "Bit-Patterned Magnetic Recording: Theory, Media Fabrication, and Recording Performance," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 51, 0800342, 2015.
- [17] J. Zhu, X. Zhu and Y. Tang, "Microwave Assisted Magnetic Recording," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 44, no. 1, pp. 125-131, Jan. 2008.
- [18] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenori, and H. Tanaka, "Future options for HDD storage," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 45, pp. 3816-3822, 2009.
- [10] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, "The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 45, pp. 917-923, 2009.
- [19] G. Ju et al., "High Density Heat-Assisted Magnetic Recording Media and Advanced Characterization—Progress and Challenges," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 51, no. 11, pp. 1-9, Nov. 2015.
- [20] C. Rea et al. "HAMR Performance and Integration Challenges", **IEEE Trans. Magn.**, vol. 50, 2014.
- [21] M. H. Kryder, A. Y. Dobin, O. Heinonen, K. Z. Gao, R. J. M. v. d. Veerdonk, R. T. Lynch et al., "Heat assisted magnetic recording." **Proceeding of IEEE**, vol. 96, pp. 1810-1835, 2008.
- [22] A. Q. Wu et al. "HAMR Areal Density Demonstration of 1+ Tbps on Spinstand", **IEEE Trans. Magn.**, vol. 49, no. 2, FEBRUARY 2013.
- [23] C. Rea et al., "Writer and Reader Head-to-Media Spacing Sensitivity Assessment in HAMR", **IEEE Trans. Magn.**, vol. 52, 2016.
- [24] C. Rea et al., "Heat-Assisted Recording: Advances in Recording Integration," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 53, no. 11, pp. 1-6, Nov. 2017, Art no. 3001506

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] I. Mayergoyz and C. Tse, 2007. **Spin-stand Microscopy of Hard Disk Data**. Oxford : Elsevier.
- [26] Y. Jiao, Y. Wang and R. H. Victora, "A Study of SNR and BER in Heat-Assisted Magnetic Recording," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 3002304
- [27] Hernández S., et al., "Using Ensemble Waveform Analysis to Compare Heat Assisted Magnetic Recording Characteristics of Modeled and Measured Signals," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 53, no. 2, 2017.
- [28] Palmer D, Mong J, Stanek D, Wood R, "Characterization of the read/write process for magnetic recording," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 31, pp. 1071–1076, 1995.
- [29] International Business Machine Corporation. 1957., **305 RAMAC Random Access Method of Accounting and Control**, IBM.
- [30] M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, G. Ju, Y.-T. Hsia, and M. F. Erden, "Heat assisted magnetic recording." **Proceeding of IEEE**, vol. 96, pp. 1810-1835, 2008.
- [31] Cullity B. D., and Graham C. D. 2008. **Introduction to magnetic materials**. 2nd ed. Piscataway NJ : IEEE Press.
- [32] H H. N. Bertram. 1994. **Theory of Magnetic Recording**. England : Cambridge University Press.
- [33] Childress, J.R., and Fontana, R.E. "Magnetic recording read head sensor technology," **Comptes Rendus Physique**, 6, 2005. pp. 997-1012.
- [34] Tsang C., et al. "Head challenges for perpendicular recording at high areal density," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 42, no. 2, 2006. pp. 145-150.
- [35] H. Li. 2016. "Storage physics and noise mechanism in heat assisted magnetic recording," Ph. D. Dissertation, Carnegie Mellon University.
- [36] T. Rausch. 2011. **Standard Media Stack and Figure of Merits for HAMR NFT Modeling**. ASTC Heads Working Group.
- [37] I. Ozgunes and W. R. Eppler, "Synchronization-free dibit response extraction from PRBS waveforms," **IEEE Trans. Magn.**, vol. 39, no. 5, pp. 2225-2227, Sept. 2003
- [38] Z. Wu, H. N. Bertram, P. H. Siegel and J. K. Wolf, "Nonlinear Transition Shift and Write Precompensation in Perpendicular Magnetic Recording," **2008 IEEE International Conference on Communications**, 2008, pp. 1972-1976



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

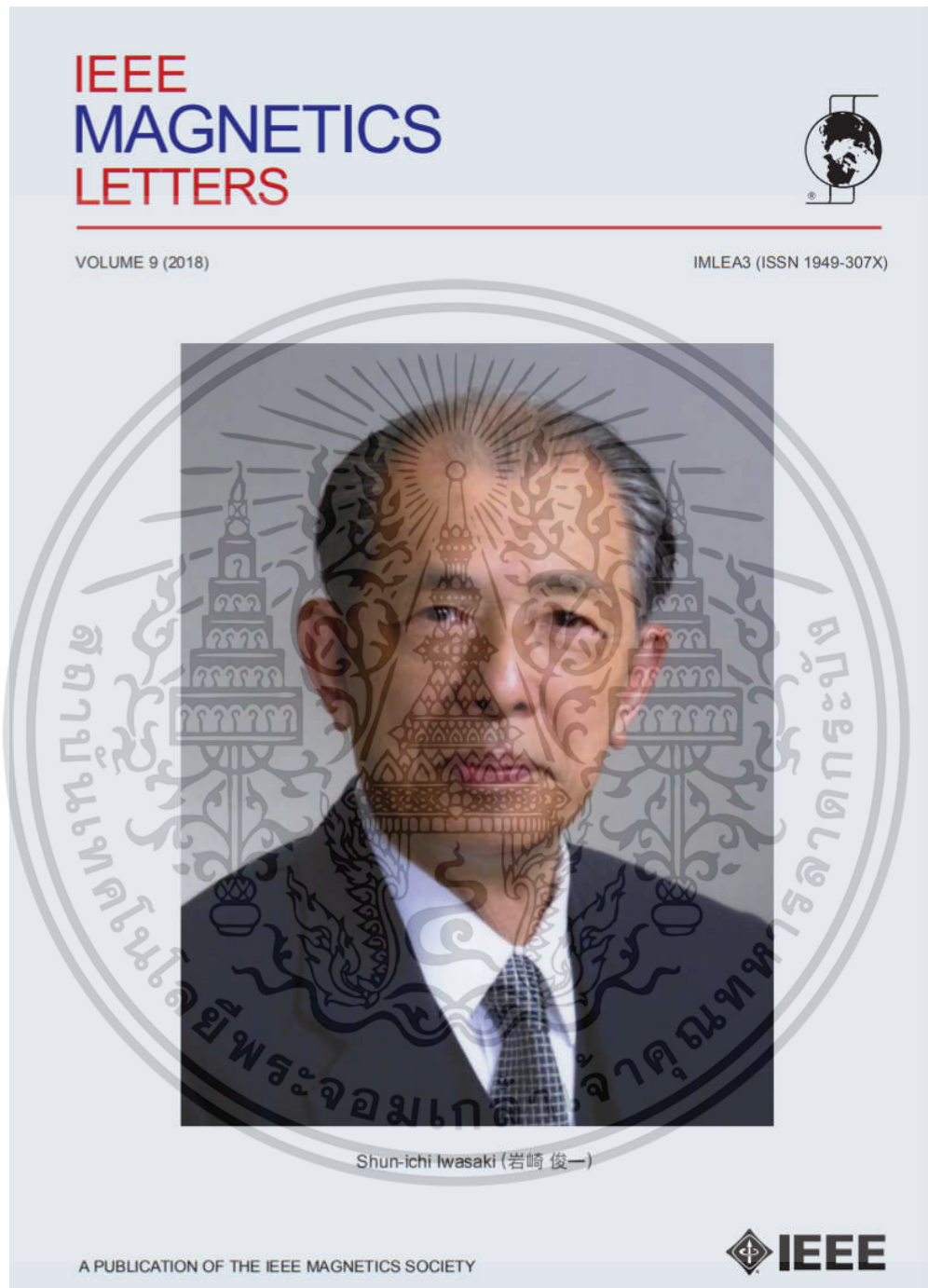
วารสารวิชาการนานาชาติ

1. S. Kaitwanidvilai, N. Chaiduangsi, and D. Tongsoomporn, “**Impact of Background Interference on Signal-to-Noise Ratio in Heat-Assisted Magnetic Recording**”, IEEE magnetics letters, vol.9, no.4506704, 2018.
2. S. Kaitwanidvilai, N. Chaiduangsi, and D. Tongsoomporn, “**Experimental Study of Media Heat Sink Thickness Impact on Signal-To-Noise Ratio in Heat-Assisted Magnetic Recording**”, Japanese Journal of Applied Physics, vol.59, no.SEEC02, 2020.

การประชุมวิชาการนานาชาติ

N. Chaiduangsi, S. Kaitwanidvilai, and D. Tongsoomporn, “**Influence of Recorded Pattern on Background Interference impact in Magnetic Recording**”, has been accepted for publication and oral presentation at the 6th International Conference on Smart Material Research ICSMR 2020 going to be held in Brisbane, Australia during November 12-14 , 2020. The accepted paper will be published in the conference Proceedings (Indexing: Scopus.). **Materials Science Forum**

1. วารสารวิชาการนานาชาติ IEEE magnetics letters



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Information Storage

Impact of Background Interference on Signal-to-Noise Ratio in Heat-Assisted Magnetic Recording

Somyot Kaitwanidvilai¹, Nuttapon Chaiduangri², and Damrongsak Tongsoomporn²¹ Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand² Recording Head Development Group, Seagate Technology (Thailand) Ltd., Samutprakarn 10270, Thailand

Received 19 Jul 2018, revised 3 Sep 2018, accepted 23 Sep 2018, published 2 Oct 2018, current version 17 Oct 2018.

Abstract—We discuss background interference (BGI) arising from the read-back of preexisting data and adjacent tracks on a recording medium. A signal-to-noise ratio analysis is used to measure the impact of BGI in heat-assisted magnetic recording in a spin-stand tester. The signal-to-noise ratio for a data track with an alternating field background was compared to a data track written over a pair of background tracks. We considered the effect of background track offsets: the distance between the background and data tracks. BGI, which depends on the background track offset, can degrade read-back performance. The dibit extraction technique is able to separate the linear dibit response and the BGI in the read-back waveform.

Index Terms—Information storage, heat-assisted magnetic recording, background interference, side-reading effect, dibit extraction, spin-stand recording tester.

I. INTRODUCTION

It is well known that areal density of perpendicular magnetic recording (PMR) is limited to approximately 1 terabit per square inch (Tb/in²) due to its fundamental limit known as superparamagnetic limit [Wood 2009]. To achieve an ultrahigh storage density, a smaller grain size and a very high coercivity (H_c) medium is required in order to maintain the signal-to-noise ratio (SNR) and magnetic stability. However, current magnetic write fields (H_w) cannot write on the higher coercivity medium ($H_w \ll H_c$). Thus, the writing process must be assisted to reduce coercivity of the magnetic medium. In recent years, heat-assisted magnetic recording (HAMR) has been proposed as one of the leading candidates [Rausch 2013, Wu 2013, Rea 2014]. This technology utilizes a near-field transducer (NFT) to heat a tiny spot on a high magnetocrystalline anisotropy medium before recording data at room temperature [Kryder 2008].

An HAMR basic technology demonstration [Wang 2013] used an NFT head and a Fe-Pt medium with more than 1 Tb/in², with more than 1000 write power-on hours at the first-time report, linear density of 1975 kb/in, and track density of 510 kilotracks/in. They suggested a significant opportunity for track density improvement. However, HAMR linear density remains an obstacle to achieving ultrahigh storage capacity. At high linear densities, SNR is limited by several problems, which are as follows:

- 1) increased head and media spacing due to coatings and contact detection, including NFT [Hohlfeld 2016];
- 2) increased transition curvature and broadening effect, which are caused by the circular thermal profile [Ju 2015];
- 3) lower read-back amplitudes for the HAMR media relative to PMR, due to lower read-back amplitude, owing to reduced flux from the media transition (M, T) [Rea 2016a].

In addition, adjacent track interference (ATI) or side erasure [Jiang 2003, Morinaga 2008] have been known as a major problem in magnetic recording systems due to stray fields from the sides of a head, causing erasure effects. However, the interference from a background track (preexisting data on medium) remains an interesting area to study. It can be measured by comparison of the SNR of the recorded data on the alternating-field (AC) background (band erased), which presumably has less read-back interference, and recorded data on a pair of pseudorandom bit sequence (PRBS) background tracks. This SNR loss is attributed to any written-in interference and side reading [Fernandez-de-Castro 2012]. This interference is called “background interference” (BGI). In particular, HAMR track pitch (TP) becomes narrower. Thus, BGI can deteriorate the overall read-back signal and limit linear density. Moreover, such media have a complex structure, such as a combined media stack with thermal design between the layers, including the soft underlayer. Consequently, understanding of the recording process and the SNR characteristics is necessary to develop practical HAMR.

In this letter, we will focus on the effect of BGI using the SNR measured with the signal-to-noise analysis technique. Additionally, dibit extraction was used to investigate the inference source based on time-domain correlation between read-back waveform and corresponding written pattern.

The rest of this letter is organized as follows. Section II briefly describes the experimental details, and Section III discusses the effect of BGI on SNR and dibit extraction results. Finally, Section IV summarizes this study.

II. EXPERIMENTAL DETAIL

In this letter, five HAMR heads were tested on a granular Fe-Pt medium via spin-stand tester. The test condition is a radius of 1.58 in at skew 0° with a spindle speed of 5400 revolutions per minute. The operated clearance is 2 nm for both write and read process. Write

IEEE Conference on Advances in Magnetism, 4–7 February 2018, La Thuile, Italy.
Corresponding author: Nuttapon Chaiduangri (59601313@kmitl.ac.th)
Digital Object Identifier 10.1109/LMAG.2018.2873536

1949-307X © 2018 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
See http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html for more information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

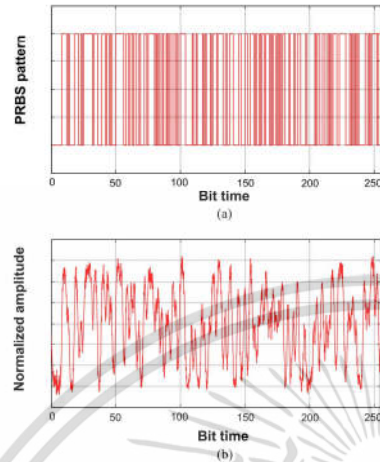


Fig. 1. Both (a) PRBS pattern and (b) corresponding average read-back waveform were generated by $x^4 + x^3 + x^2 + 1$.

current is selected by optimizing the recording performance, whereas laser operation current is selected so that the bit error rate of -2 decade is achieved [Rea 2016b].

In this section, we describe a technique for interference measuring based on PRBS read-back waveforms, namely SNR measurement [Hernández 2016, 2017] and dibit extraction technique with four track layouts [Palmer 1995, Ozgunes 2003].

A. SNR Measurement

In Fig. 1(a), recorded data track is a 255 bit PRBS for 64 consecutive periods, including write precompensation to counteract nonlinear transition shift effect (NLTS). The PRBS generator polynomial used in these experiments is $x^4 + x^3 + x^2 + 1$. The read-back waveform is then captured for 50 different times in order to decouple the effect of asynchronous noise (electronic/reader noise). Then, a spatially noisy waveform can be obtained by averaging the read-back waveform, as shown in Fig. 1(b).

To achieve a noise-free waveform, a noisy waveform is spatially averaged each period from all 64 spatially noisy waveforms. Finally, the SNR is calculated from the power definition using the noise-free signal and the spatial and electronic/reader noise, which is calculated by subtracting the average waveform from the noisy waveform.

B. Dibit Extraction

Dibit extraction is a technique based on time-domain correlation and requires the read-back waveform and corresponding PRBS pattern to yield both a description of the channel transfer function and a description of the nonlinear behavior of the system, such as NLTS phenomena and read-back distortion. In order to investigate the BGI

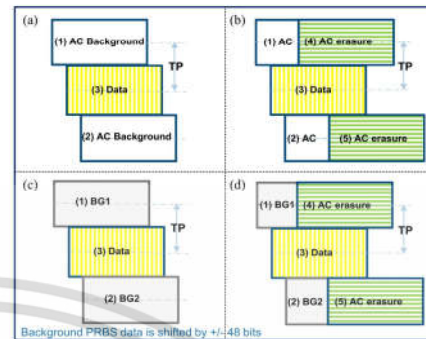


Fig. 2. Four track layouts. (a) AC background, (b) AC erasure overwrites the AC background tracks, (c) PRBS background, (d) AC erasure overwrites the PRBS background tracks. Inset: the track writing sequence is represented by (1) to (5).

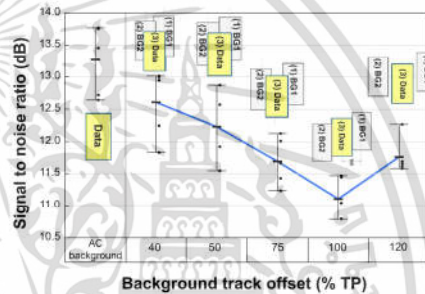


Fig. 3. SNR measurement among the data tracks written on AC background and various background track offset from 40% to 120% TP. Inset: the subplots depict a track layout for each track offset.

source, all tracks are recorded with a different data pattern. The PRBS pattern is written in a data track for the SNR measurement. The top-background track is written by a $+48$ bit shift-forward from the data track, which is denoted by "BG1," whereas the bottom track is written by a -48 bit shift-reverse, which is denoted by "BG2." Additionally, both BG1 and BG2 tracks are called a "PRBS background."

Then, the spatially noisy read-back waveform is analyzed for correlation with the corresponding PRBS pattern. Finally, the linear dibit response can be obtained as shown at the main pulse, and the nonlinearities show up as echoes around the pulse, such as the echoes of BGI impact seen near position $+48$ bit (from BG1) and -48 bit (from BG2) clock.

C. Four Track Layouts

We designed track layouts for the BGI investigation, including ATI impact and less interference, which consist of the following:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

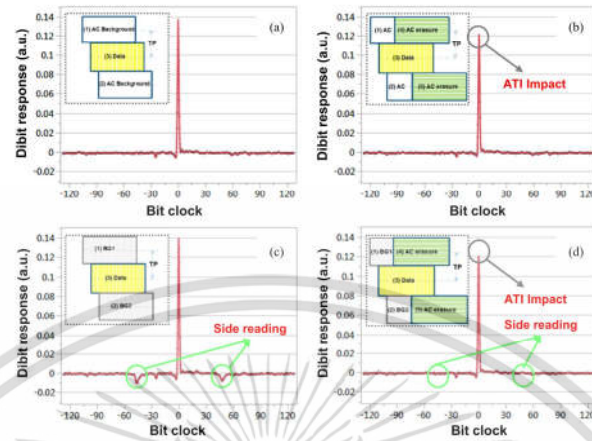


Fig. 4. Four extracted dibit responses from different track layouts correspond to the four track layouts in Fig. 2, as depicted in the subplots. (a) AC background. (b) AC erasure overwrites the AC background tracks. (c) PRBS background. (d) AC erasure overwrites the PRBS background tracks. The dibit response of PRBS background incurs under-shoot echoes at approximately ± 48 bits clock due to a BGI impact.

- 1) AC-background, which is a data track written on a high-frequency AC band-erased;
- 2) AC erasure overwrites the AC background tracks (ATI);
- 3) PRBS background, which is recorded data on a pair of PRBS background tracks (BGI);
- 4) AC erasure overwrites the PRBS background tracks, as depicted in Fig. 2(a)–(d), respectively.

Practical track layout for a commercial PMR drive is similar to the PRBS background, as illustrated in Fig. 2(c). Background track offset is a distance between the center of the data track and background track, which is determined by the TP. These heads had a TP corresponding to the track width that was obtained by a write plus erase technique [Fernandez-de-Castro 2012], and the TP values were varied from around 60 nm to 70 nm. Here, BGI impact can be investigated via comparison of the read-back signal of the PRBS and the AC background. Then, the ATI impact is measured by comparison of the AC background condition, and AC erasure overwrites the AC background. In addition, the PRBS background can be erased to remove the BGI impact and recover the data track performance, as shown in Fig. 2(d).

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

We investigate the performance degradation due to background data in an HAMR recording system using signal-to-noise analysis and dibit extraction measurement, as described in Section II. Next, we discuss two experiments that consist of SNR and dibit extraction.

A. SNR Result

Fig. 3 shows the comparison of SNR among the written data on the AC background and the written data track on a pair of PRBS background tracks at various background track offsets, which are based

on Fig. 2(a) and (c), respectively. There are five track offsets in term of percentage of TP: 40%, 50%, 75%, 100%, and 120% TP. The results are explained as follows.

The AC background is shown in Fig. 2(a). This track layout shows the best SNR to be approximately 13.3 dB. The result suggests that it has a minimal amount of read-back interference, as expected. While the PRBS pattern was recorded at background tracks, the SNR trend clearly degraded with increasing background track offset, from 40% to 100% due to ATI and side reading.

At 40% TP condition, stray fields from the sides of a head during both data and background tracks writing can degrade the amplitude signal of background tracks, which result in the slight SNR loss during read-back.

Here, the minimum SNR is 100% TP of PRBS background track offset. This condition is significant due to use of a commercial PMR drive. It was found that SNR loses ~ 2.2 dB relative to the AC background case because the BG1 and BG2 tracks did not encroach onto each other on the track edges as well as during data track writing, which results in the strongest BGI impact.

In addition, if the background track offset relaxed for 120% TP, BGI will less affect the read-back signal. This explains why the written data track is far away from the BG1 and BG2 tracks, which results in less ATI. Nonetheless, BGI can deteriorate the SNR due to side reading from background tracks.

B. Dibit Response Result

We investigate the interference source via the dibit extraction technique in order to understand the cause of BGI at 100% TP. Here, the results were divided by the four track layouts, as shown in Fig. 4.

In the AC background condition, we obtained only the main dibit response, as shown in Fig. 4(a). This was due to a minimal

amount of read-back interference on both side writing and reading, corresponding to the SNR result. After the AC background tracks are erased, the magnitude of dibit response is deteriorated comparing to the AC background condition due to the ATI impact. Clearly, this side erasure can interact with the data track signal, as shown in Fig. 4(b).

In addition, we found that the dibit response incurs under-shoot echoes at approximately ± 48 bit clock, corresponding with the ± 48 bit shift from the data track pattern that were recorded at background tracks. It indicates that these echoes are the result of side reading at background tracks but opposite polarity signal [see Fig. 4(c)]. One hypothesis of the opposite polarity may be due to an antiparallel region between the data and background track edges, as proposed by Fernandez-de-castro [2012].

In Fig. 4(d), BG1 and BG2 can be erased to remove the BGI impact. Here, the main response amplitude is in loss by ATI while the undershoot echo disappears after erasing the background tracks. To sum up, this experiment points to side reading as the root cause.

IV. SUMMARY

We present an experimental result of BGI impact in heat-assisted magnetic recording performance. SNR was explored using a spinstand recording tester with the signal-to-noise analysis technique. The dibit extraction technique was employed for the breakdown between data signal and BGI from the read-back waveform. The results showed that the strongest BGI impact on HAMR SNR occurred with a background track offset for 100% TP, ~ 2.2 dB relative to the AC background. The primary cause of the SNR deterioration is the side-reading effect. It creates dibit response with opposite polarity or undershoot echo. Finally, many challenges remain to be overcome to commercialize this technology, among which the BGI is one of the most significant issue.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by Thailand Research Fund, and in part by the Research and Researcher for Industry and Seagate Technology (Thailand) under Grant PHD600070. The authors thank Dr. X. Zheng and P. Kampan for assistance.

REFERENCES

Fernandez-de-Castro J, Sandler G, Hurben M, Lu P-L, Curleod N (2012), "Measuring and understanding write width and crosstalk as a function of linear density in perpendicular recording," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, 07B702, doi: 10.1063/1.3673844.

Hernández S, Krivosik P, Huang P-W, Eppler W R, Rausch T, Gage E (2016), "Parametric comparison of modeled and measured heat-assisted magnetic recording using a common signal-to-noise metric," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, 3001404, doi: 10.1109/TMAG.2016.2528224.

Hernández S, Lu P-L, Granz S, Krivosik P, Huang P-W, Eppler W, Rausch T, Gage E (2017), "Using ensemble waveform analysis to compare heat assisted magnetic recording characteristics of modeled and measured signals," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, 3000406, doi: 10.1109/TMAG.2016.2612230.

Höfelfeld J, Zheng X, Benekli M (2015), "Measuring temperature and field profiles in heat assisted magnetic recording," *J. Appl. Phys.*, vol. 118, 064501, doi: 10.1063/1.4928310.

Jiang W, Smith N, Williams M, Weresin W, Kanoki K, Ikeda Y, Takano K, Khersa G, Wood R (2003), "Adjacent-track interference in dual-layer perpendicular recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, pp. 1891-1896, doi: 10.1109/TMAG.2003.813784.

Ju G, Peng Y, Chang E K C, Ding Y, Wu A Q, Zhu X, Kubota Y, Klemmer T J, Amini H, Gao L, Fan Z, Rausch T, Subedi P, Ma M, Kalarickal S, Rea C J, Dimitrov D V, Huang P-W, Wang K, Chen X, Peng C, Chen W, Dykes J W, Seigler M A, Gage E C, Chantrell R, Thiele J-U (2015), "High density heat-assisted magnetic recording media and advanced characterization—Progress and challenges," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, 3201709, doi: 10.1109/TMAG.2015.2439690.

Kryder M H, Gage E C, McDaniel T W, Challener W A, Rottmayer R E, Ju G, Hsia Y-T, Erden M E (2008), "Heat assisted magnetic recording," *Proc. IEEE*, vol. 96, pp. 1810-1835, doi: 10.1109/PROC.2008.2004315.

Morinaga A, Mochizuki M, Kimura W, Okada T, Miyamoto N, Maruyama Y, Hsiao D, Hsu Y (2008), "Adjacent track interference analysis of shielded perpendicular writers," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 320, pp. 2955-2958, doi: 10.1016/j.jmmm.2008.08.016.

Orzanges I, Eppler W R (2003), "Synchronization-free dibit response extraction from PRBS waveforms," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, pp. 2225-2227, doi: 10.1109/TMAG.2003.815436.

Palmer D, Mong J, Stineck D, Wood R (1995), "Characterization of the read/write process for magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, pp. 1071-1076, doi: 10.1109/TMAG.1995.5606698.

Rausch T, Trantham J D, Chu A C, Daskrouh H, Riddering J W, Henry C P, Kiely J D, Gage E C, Dykes J W (2013), "HAMR device performance and integration challenges," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, pp. 730-733, doi: 10.1109/TMAG.2012.2218228.

Rea C, Benekli M, Subedi P, Meadousa R, Kalarickal S, Kiely J, Chen W, Zhou H, Hernandez S, Peng Y, Thiele J-U, Wu A Q, Ju G, Ranch T, Gao K, Seigler M, Gage E (2016a), "Writer and reader head-to-media spacing sensitivity assessment in HAMR," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, 3000608, doi: 10.1109/TMAG.2015.2483319.

Rea C, Höfelfeld J, Kalarickal S, Benekli M, Sam A, Olson H, Zhou H, Saunders D, Gokemeijer N, Seigler M, Gao K Z, Rausch T, Dykes J W, Wu A, Thiele J-U, Ju G, Gage E (2014), "HAMR performance and integration challenges," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, pp. 62-66, doi: 10.1109/TMAG.2013.2287886.

Rea C, Subedi P, Gao K, Zhou H, Lu P-L, Czochke P J, Hernandez S, Ma M, Lopusnik R, Peng Y, Thiele J-U, Wu A Q, Ju G, Rausch T, Seigler M, Gage E (2016b), "Area-density limits for heat-assisted magnetic recording and perpendicular magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, 3001304, doi: 10.1109/TMAG.2016.2527733.

Wang X, Gao K, Zhou H, Bai A, Seigler M, Gage E (2013), "HAMR recording limitations and extensibility," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, pp. 680-692, doi: 10.1109/TMAG.2012.2221689.

Wood R, Williams M, Kavcic A, Miles J (2009), "The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, pp. 917-923, doi: 10.1109/TMAG.2008.2010676.

Wu A Q, Kubota Y, Klemmer T, Rausch T, Peng C, Peng Y, Karns D, Zhu X, Ding Y, Chang E K C, Zhao Y, Zhou H, Gao K, Thiele J-U, Seigler M, Ju G, Gage E (2015), "HAMR areal density demonstration of 1+ Tbps on spinstand," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, pp. 779-782, doi: 10.1109/TMAG.2012.2219513.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วารสารวิชาการนานาชาติ Japanese Journal of Applied Physics

Japanese Journal of Applied
Physics



REGULAR PAPER

Experimental study of media heat sink thickness impact on signal-to-noise ratio in heat-assisted magnetic recording

To cite this article: Somyot Kaitwanidvilai et al 2020 *Jpn. J. Appl. Phys.* **59** SEEC02

View the [article online](#) for updates and enhancements.



This content was downloaded from IP address 192.55.18.36 on 16/02/2021 at 04:25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Experimental study of media heat sink thickness impact on signal-to-noise ratio in heat-assisted magnetic recording

Somyot Kaitwanidvilai¹, Nuttapon Chaiduangstri^{1*}, and Damrongsak Tongsoomporn²

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

²Seagate Technology (Thailand) Ltd., Samutprakarn, 10270 Thailand

*E-mail: 59601313@kmitl.ac.th

Received August 14, 2019; revised September 29, 2019; accepted October 28, 2019; published online January 28, 2020

Recently, heat-assisted magnetic recording (HAMR) has been demonstrated to extend the areal density growth over the superparamagnetic limited. One key component of this technology is a heat sink layer in HAMR media, which benefits the thermal gradient and transition noise. However, the disadvantage of the heat sink layer (HS) has not been fully explored. In this paper, we investigate the background interference (BGI) impact as a result of the heat sink layer via the spin-stand tester. HAMR heads included a light delivery system that have measured a signal-to-noise ratio and down-track thermal gradient on a variety of HS thickness. Subsequently, we found that a thicker HS is a trade-off between the BGI and thermal gradient. Thus, it remains challenging to achieve an ultra-high areal density using the thermal media design.
 © 2020 The Japan Society of Applied Physics

1. Introduction

Nowadays, conventional perpendicular magnetic recording (PMR) faces an areal density limited due to the superparamagnetic phenomena.¹⁾ Ultra-storage density requires a very high coercivity media to maintain magnetic stability and signal-to-noise ratio (SNR) for a prolonged period of time. However, the current writer cannot write in high anisotropy media due to the limitation of magnetic material.

Many publications suggest one technique that can be used to overcome this is heat-assisted magnetic recording (HAMR).²⁻⁵⁾ During the recording process, the HAMR head employs a near-field transducer to heat high anisotropy media until the Curie temperature is reached. In this state, the writing ability of a conventional writer can reverse the magnetization of recording media with a high magnetocrystalline anisotropy condition. At the same time, the HAMR head must provide a sufficiently minute heat spot size. Then, the HAMR media temperature must rapidly reduce in order to keep the magnetization direction at room temperature. Here, a heatsink (HS) layer is a key factor for HAMR media,⁶⁾ which also helps to cool and improve thermal gradient. Typically, HAMR media looks similar to PMR media except for the HS layer, which consists of a media overcoat/storage layer/interlayer/heat sink/ glass substrate,⁷⁾ as shown in Fig. 1. This figure shows the difference between PMR and HAMR, which occurs only in the HS layer. This layer directly increases head-keeper-separation.⁸⁾ Consequently, developing practical HAMR is necessary to understand the recording characteristics both when recording HAMR head and media.

In 2013, HAMR drive was demonstrated at the first-time report for overcoming PMR limited.⁹⁾ It indicated an excellent capability for track density improvement for HAMR, but the linear density is still challenging in terms of achieving a higher areal density. Recent studies have suggested that the HAMR recording performance is limited and has several problems.¹⁰⁻¹⁴⁾ For instance, HAMR recording has a unique switching field distribution, which affects transition jitter and saturation noise. To improve the transition jitter, a thicker HS was proposed to obtain higher thermal gradient while a higher laser operating current is required. Moreover, the track edge broadening and transition

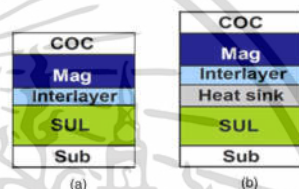


Fig. 1. (Color online) Example of (a) conventional PMR media versus (b) HAMR media.

curvature for HAMR is larger than PMR recording due to its heat spot. They also explored the side reading in the HAMR system and found that it is stronger than PMR,^{6,15)} and sidetrack or background interference (BGI) is reduced by the addition of an SUL.

Nonetheless, the previous studies have not yet profoundly studied the effect of a heat sink layer, where it is the media stack thermal design between the interlayer and soft underlayer. Therefore, this paper investigates the effect of the heat sink layer on a SNR via the spin-stand tester. Down-track thermal gradient and BGI impact are observed a variety of HS thickness. Here, we organized the rest of this paper as follows: Sect. 2 briefly describes the experimental setup; then, the effects of heat sink thickness on both the laser delivery system and SNR results are discussed in Sect. 3; finally, Sect. 4 concludes this study.

2. Experimental methods

For the experiment setup, the recording performance measurement employed a high-precision spin-stand. 30 HAMR heads, including a light delivery system, were tested on three different media types with thinner, normal, and thicker HS thickness conditions. In the laser operating current of each head (I_{op}), it was selected by optimizing the recording performance, where is the bit error rate condition for -2 decades achieved at the data rate of 1222 Mbps at 2 nm fly-height for writing/reading. The test condition was a 1.38° skew at a radius of 0.869 on 10,500 RPM.

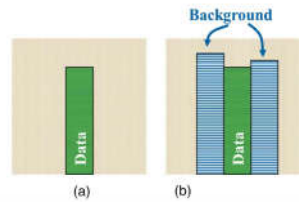


Fig. 2. (Color online) Illustration of track layouts (a) single track and (b) triple tracks, in all cases down-track is vertical and cross-track is horizontal.

The first experiment focused on a relationship between HS thickness and its down-track thermal gradient. The down-track thermal gradient is a crucial parameter for HAMR recording system.^{16–19} The thickness values of HS will directly affect recording temperature and the heat spot in HAMR media.²⁰ Many studies have suggested that the write field gradient will have an impact on the effective write gradient,²¹ as shown in the below equation. Hence, this experiment considers the recording performance impact from HS layer

$$\text{Effective write gradient} = \frac{dH_{\text{eff}}}{dx} = \frac{dH_w}{dx} + \frac{dH_x}{dT} \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

where the head magnetic field is “ H_w ”, the media anisotropy field is “ H_x ”, the temperature is “ T ”, and the down-track position is “ x ”.

This experiment obtained the laser operating current modulation methods in order to measure the down-track thermal gradient.^{22–24} While the magnetic head records a single tone pattern, the laser operating current is modulated. It shows the correlation between a transition position and the laser operating current variation. The down-track thermal gradient can be extracted, as shown in Eq. (2)

$$\frac{dT}{dx} = \frac{(T_w - T_a)\delta p}{\Delta x} = \frac{4.2}{\text{TransMod}} \quad (2)$$

In (2), the writing temperature (T_w) is applied by a single value of 710° Kelvin to all cases,²⁴ and the ambient

temperature (T_a) is 290° Kelvin.²⁴ Here, the fractional change in laser operating current modulation ($\Delta I_{op}/I_{op}$) is “ δp ”, which expressed in the percent of ΔI_{op} . The resultant displacement modulation (Δx) is measured by analysis of the signal. Then, TransMod is the normalization the transition modulation to the laser modulation, as shown in Eq. (3)

$$\text{TransMod} = \frac{\Delta x}{\delta p}. \quad (3)$$

In the next part, we consider the effect of HS thickness on BGI impact via SNR measurement. The track layouts are designed for investigating the effects of BGI, as shown in Fig. 2. There consist of a single track and triple tracks, where the single track is the Iso SNR measured for a data track written on a high-frequency band-erased background. In the case of the triple tracks, we recorded the neighboring tracks for a 100% offset of the track width-to-face with the maximum SNR loss from side reading.²⁵

In our experiment, the spin-stand tester measures the SNR to analyze a recording head and media characteristic. This method is useful for understanding the effect of media properties and recording conditions in HAMR systems.^{26–30} The detailed test procedures are explained as follows:

1. Firstly, we selected the pseudo-random bit sequence (PRBS) generator polynomial for $m^8 + m^4 + m^3 + m^2 + 1$. Then, 255 bits of PRBS with 64 consecutive periods were recorded on the mentioned track layouts.
2. After that, a reader captures the recorded PRBS signal for 50 different time intervals to remove an electronic or reader noise.
3. The averaging waveform of the 64 consecutive periods provides a spatially noisy waveform.
4. Thus, the signal power consists of noise-free, spatial, and electronic or reader noise signal. Finally, we can calculate the SNR by subtracting the recorded PRBS waveform from the noisy waveform.

3. Results and discussion

3.1. Effect of the heat sink layer to laser operating current

Figure 3 shows the correlation between a normalized laser operating current for each head and HS thickness. We

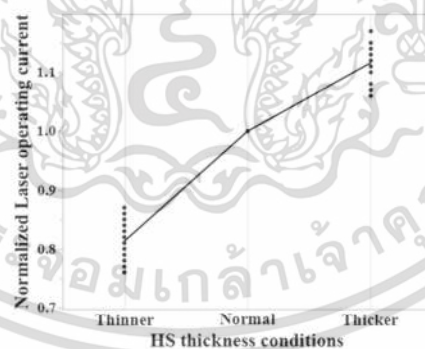


Fig. 3. The normalized laser operating current correlates with HS thickness.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

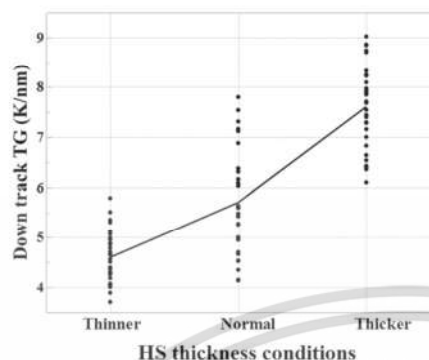


Fig. 4. Measured down-track thermal gradient as a function of heat sink thickness.

observed that the laser operating current increases linearly with increased HS thickness. The highest required current is at thicker HS thickness media, which can explain that the media temperature is rapidly cooled when the laser operating current is turned on, and it is hard to reach the Curie temperature.

To achieve -2 decade, a higher laser operating current is required. In the case of the thicker HS thickness media, the laser operating current is significantly increased by 11% relative to normal HS thickness. In this case, the laser delivery system can degrade faster than the thinner condition. Despite a thicker HS which is required for high laser operating current to record the data, it also has benefit in terms of the thermal gradient, which is established in the next part.

3.2. Thermal gradient measurement result

In the HAMR system, the written transition depends on its down-track thermal gradient. Figure 4 shows the thermal gradient as a function of HS thickness. The higher down-track thermal gradient was enabled by a thicker HS. The

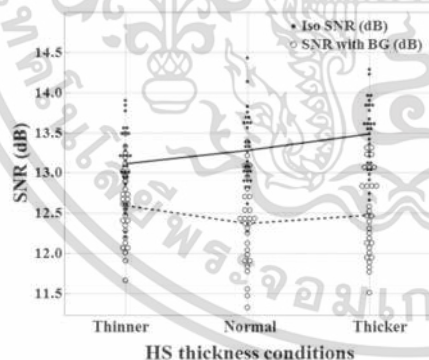


Fig. 5. SNR measurement among the PRBS data tracks written on AC background (Iso SNR) and with background track (SNR with BG).

maximum down-track thermal gradient is about 7.59 kelvin per nm at the thicker HS thickness, while the lowest is at 4.60 kelvin per nm at the thinner HS thickness. This result can explain why the media temperature is cooled faster, which results in a sharper heat spot.

To create a link with the above experiment, thicker HS media makes a higher down-track thermal gradient while the higher laser operating current is required. It is a trade-off between head lifetime and recording performance.

3.3. Signal-to-noise ratio measurement results

In this section, the SNR measurement results consist of two cases, as shown in Fig. 5. The Iso SNR and SNR with BGI values were measured on the single track and triple tracks, respectively. Firstly, the single track shows an increased SNR with a thicker HS because of better down-track thermal gradient and written transition shape. The maximum SNR is 13.5 dB, at the thicker HS condition.

However, we observed that the SNR value of the triple tracks was lower than the Iso SNR. When we increased the HS thickness, the SNR did not improve as much as expected. Overall, SNRs are only around 12.5 dB. The reason for this may be due to the fact that the BGI was increased.

Figure 6 shows the SNR loss due to BGI. We calculated the delta SNR between Iso and with BGI for the same head and media. It appears that thicker HS gives a higher SNR loss. The maximum loss is ~ 1 dB loss at thicker HS condition. This study shows that the side reading is the main problem, which is the stray field from the background track interfere in the data signal. As to why thicker HS can increase BGI impact, this can be explained as an "undershoot area" by Chris Rea.⁵⁾

In a further experiment, the magnetic footprint of the thicker HS thickness condition is shown in Fig. 7. Here, we recorded the PRBS data over a high-frequency band-erased background. Then, the readback waveform was processed via the spin-stand footprint test technique.^{31,32)} It appears as the side reading signal while the reader over the bottom track. The opposite polarity of center-track data has occurred. It seems that the stray field in the recording layer is hard to flow to SUL, but it is easier to direct to the reader. Thus the HAMR system faces the strong side reading effect due to the added thicker HS layer. To achieve the best performance for

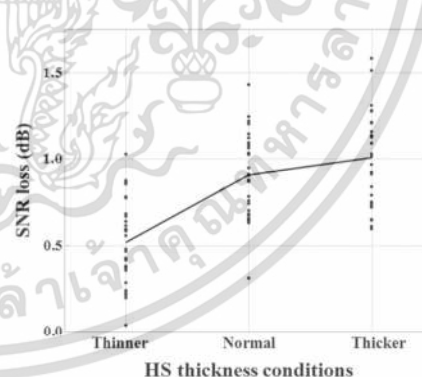


Fig. 6. The effect of BGI impact on SNR with various HS thicknesses.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

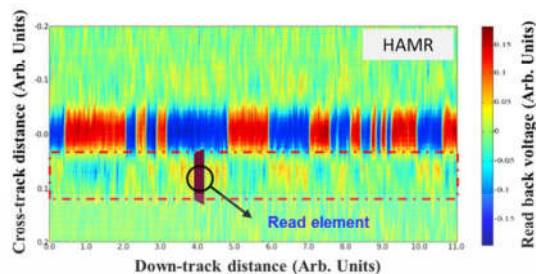


Fig. 7. (Color online) The magnetic footprint of a thicker HS thickness condition.

HAMR system, we need to consider the thermal gradient, head reliability, and especially the BGL.

4. Conclusions

It is known that the advantage of having a thicker heat sink layer is thermal gradient improvement. However, in this paper, we indicated the problem of the HS layer via the spin-stand experiment, which is the BGL. By measuring SNR with several HS thicknesses, we found that a thicker HS can increase BGL. The cause of this problem can be explained by the fact that the stray field in the recording layer is hard to flow to SUL compared to a thinner condition. Hence, the thermal design should consider this problem, as well as the thermal gradient because the practical usage recorded a neighboring track.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge technical support from Dr X. Zheng and P. Kampun. Finally, Thailand Research Fund, and, in part, by the Research and Researcher for Industry and Seagate Technology (Thailand) who supported this work under Grant No. PHD6010070.

ORCID iDs

Nuttapon Chaiduangri <https://orcid.org/0000-0001-6927-143X>

- 1) R. Katayama and S. Suguna, *Jpn. J. Appl. Phys.* **58**, SKKB01 (2019).
- 2) M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, G. Ju, Y. T. Hsia, and M. F. Erden, *Proc. IEEE* **96**, 1810 (2008).
- 3) R. Wood, M. Williams, A. Kaveic, and J. Miles, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 917 (2009).
- 4) W. A. Challener et al., *Nat. Photonics* **3**, 220 (2009).
- 5) B. C. Stipe et al., *Nat. Photonics* **4**, 484 (2010).
- 6) G. Ju et al., *IEEE Trans. Magn.* **51**, 3201709 (2015).
- 7) Storage Research Consortium, private communication (2011).
- 8) C. Rea, P. Czoschke, P. Krivosik, V. Sapozhnikov, S. Granz, J. Zhu, Y. Peng, J. U. Thiele, G. Ju, and M. Seigler, *IEEE Trans. Magn.* **55**, 3000708 (2019).
- 9) A. Q. Wu et al., *IEEE Trans. Magn.* **45**, 779 (2013).
- 10) X. Wang, K. Gao, H. Zhou, A. Itagi, M. Seigler, and E. Gage, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 686 (2013).
- 11) C. Y. Tseng, M. Hurben, G. Sandler, D. Saunders, and J. Fernandez-de-Castro, *IEEE Trans. Magn.* **47**, 2974 (2011).
- 12) C. Rea et al., *IEEE Trans. Magn.* **52**, 3001304 (2016).
- 13) M. A. Cordle, D. M. Mader, S. D. Granz, A. S. Chu, P. L. Lu, F. Martens, Y. Qi, T. Rausch, J. W. Riddering, and K. Gao, *IEEE Trans. Magn.* **52**, 3100307 (2016).
- 14) Y. Kubota et al., *IEEE Trans. Magn.* **54**, 3201206 (2018).
- 15) C. Rea et al., *IEEE Trans. Magn.* **53**, 3000606 (2017).
- 16) S. Hernandez, Z. Liu, S. Granz, I. Gilbert, D. Mader, M. Blaber, P. W. Huang, C. Rea, G. Ju, and T. Rausch, *IEEE Trans. Magn.* **54**, 3001604 (2018).
- 17) R. Rottmayer et al., *Trans. Mag.* **42**, 2417 (2006).
- 18) S. J. Greaves, R. Itagaki, and Y. Kanai, *IEEE Trans. Magn.* **55**, 3001506 (2019).
- 19) J. Hofffeld, P. Czoschke, P. Asselin, and M. Benkli, *IEEE Trans. Magn.* **55**, 3000511 (2019).
- 20) B. F. Valcu, H. Gee, M. Alex, and F. Champoin, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 3001804 (2014).
- 21) I. Gilbert, Z. Liu, D. A. Saunders, W. R. Eppler, C. J. Rea, and T. Rausch, *IEEE Trans. Magn.* **55**, 3001204 (2019).
- 22) J. Hofffeld, X. Zheng, and M. Benkli, *J. Appl. Phys.* **118**, 064501 (2015).
- 23) H. J. Richter, C. C. Poon, G. Parker, M. Staturoni, Q. Mosendz, R. Zakai, and B. J. Stipe, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 5378 (2013).
- 24) D. A. Saunders, J. Hofffeld, X. Zheng, T. Rausch, and C. Rea, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 3100305 (2017).
- 25) S. Kaitwanidvilai, N. Chaiduangri, and D. Tongsoomporn, *IEEE Magn. Lett.* **9**, 4506704 (2018).
- 26) K. Kim and J. Moon, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 3675 (2013).
- 27) S. Hernandez, P. L. Lu, S. Granz, P. Krivosik, P. W. Huang, W. Eppler, T. Rausch, and E. Gage, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 3000406 (2017).
- 28) Y. Jiao, Y. Wang, and R. H. Victora, *IEEE Trans. Magn.* **51**, 3002504 (2015).
- 29) Y. Jiao, J. Hofffeld, and R. H. Victora, *IEEE Trans. Magn.* **54**, 3001105 (2018).
- 30) J. G. Zhu and H. Li, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 765 (2013).
- 31) N. Chaiduangri, A. Kaewrawang, K. Chooruang, and D. Tongsoomporn, *Appl. Mech. Mater.* **781**, 215 (2015).
- 32) A. M. Taratorin, M. Nikiforov, A. Shteyn, R. Shi, and M. Alex, *IEEE Trans. Magn.* **54**, 3000408 (2018).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การประชุมวิชาการนานาชาติ ICSMR 2020

**The 6th International Conference on Smart Material Research
ICSMR2020**

Acceptance Notification and Invitation Letter

The 6th International Conference on Smart Material Research
ICSMR2020
Melbourne, Australia • November 12-14, 2020
www.ICSMR.org

Nuttapon Chaiduangstri, Somyot Kaitwanidvilai, Damrongsak Tongsomporn
Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Thailand
Email: 59601313@kmitl.ac.th; drsomyotk@gmail.com;
damrongsak.tongsomporn@seagate.com;

Dear Nuttapon Chaiduangstri, Somyot Kaitwanidvilai, Damrongsak Tongsomporn,

We are pleased to inform you that, after the double-blind peer review (please refer to the attached files), your manuscript, as identified below, has been accepted for publication and oral presentation at the 6th International Conference on Smart Material Research (ICSMR2020), going to be held in Brisbane, Australia during November 12-14, 2020.

Paper ID: CM20-504

Paper Title: Influence of Recorded Pattern on Background Interference impact in Magnetic Recording

The accepted paper sent on time, duly registered and presented in the conference will be published in the conference Proceedings (**Indexing: Scopus.**).

On behalf of the entire organization, we would like to convey to you our hearty congratulations for the shortlisting of your paper for the conference program. It would be our pleasure to meeting you in Melbourne during ICSMR2020 & we eagerly look forward to the same.

With kind regards,

Yours sincerely,
ICSMR 2020 Organizing Committee
October 16, 2020

1 / 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Influence of Recorded Pattern on Background Interference impact in Magnetic Recording

Nuttapon Chaiduangstri^{1, a}, Somyot Kaitwanidvilai^{1, b, *} and
Damrongsak Tongsomporn^{2, c}

¹Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

²Seagate Technology (Thailand) Ltd., Samutprakarn, 10270, Thailand

^a59601313@kmitl.ac.th, ^bdrsomyotk@gmail.com, ^cdamrongsak.tongsomporn@seagate.com

*Corresponding Author

Keywords: Background Interference Impact, Heat-assisted magnetic recording, Recorded Pattern.

Abstract. This paper discusses the impact of background interference on a recorded pattern for heat-assisted magnetic recording technology (HAMR). Several patterns of the background track were examined, with the log bit error rate and signal to noise ratio measured via a spin-stand tester using HAMR head and media. It was found that the low frequency pattern gave the highest BER and SNR loss due to the strong magnetic field from the adjacent tracks. Similar to its practical use, the PRBS pattern also showed high interference. These observations may be used to support HDD areal density growth.

Introduction

The digital data growth rate has increased due to social media, personal computer, and smartphone device technological advancements. IDC forecasts that the global data sphere will grow from 33 Zettabytes (ZB) in 2018 to 175 ZB by 2025 [1], requiring the deployment new data storage solutions to support this demand.

For applications requiring very high storage capacity, hard disk drives (HDD) which use magnetic recording technology, provides a much lower total cost of ownership than that of solid-state drives (SSD). However, with current perpendicular magnetic recording (PMR) technology, the areal density growth rate is slowing down due to the superparamagnetic limit [2]. To maintain SNR, as the bit size shrinks the magnetic recording grains in the media also need to shrink. If the grains are made too small, they become thermally unstable. To achieve thermal stability, high-coercivity media is required. The conventional PMR magnetic writer is not sufficient to write such a high-coercivity media. To overcome this limit, researchers have proposed heat-assisted magnetic recording (HAMR) [3] as a promising alternative to achieve an ultra-high density storage. This approach employs a near-field transducer (NFT) to assist the conventional writer by raising the temperature of the HAMR media to temporarily reduce the coercivity and allowing it to be magnetized by the write head. The heat sink layer in the media enables thermal gradient (TG) improvement and the ability to quickly cool the media back to room temperature.

In 2019, Seagate demonstrated 2.27 terabits per square inch (Tbpsi) with interlaced track-layout and multiple reader architecture [4], establishing HAMR as a leading candidate for the future data storage technology. There are still many challenges to increasing areal density further. For instance, HAMR's signal to noise ratio (SNR) is limited by several constraints: 1) HAMR's unique switching field distribution results in added transition jitter and saturation noise [5], 2) the integrated NFT writer creates more transition curvature and broadening effects than a PMR writer because of thermal spot effects driven by the NFT design [6], and 3) the trade-off between recording performance and reliability of the HAMR system as TG increases with heat sink thickness [7].

In this study, we consider the impact of the side reading or background interference (BGI) for conventional HAMR recording, i.e. the interference from the written adjacent track on the read-back

signal [8]. Triple recorded tracks were compared among several background patterns and track pitch offsets and the log bit error rates (BER) were calculated to determine the HAMR recording head and media performance using a spin-stand test system. SNR's were measured to understand the noise characteristics.

The rest of this paper is organized as follows. Section II briefly describes the experimental details, and Section III discusses the BGI impact on the recorded pattern with BER and SNR results. Finally, Section IV concludes this study.

Experimental Methods

In order to assess the BGI impact from the recorded pattern, the sample HAMR heads and media were tested via a spin-stand test system. This spin-stand test system is a high-precision instrument, which is widely used to characterize head and media performance.

The test condition was set at a radius of 0.869 inches (equivalent to a skew of 1.38°) at 10,500 RPM. The active fly height was 2 nm for writing and reading. The laser operating condition was optimized for each head by sweeping the laser bias current until -2 decades log BER was achieved at the data rate of 1,222 Mbps. The single tone BGI tracks employed 305.5 MHz (611 Mbps) and 76.4 MHz (152.7 Mbps) for the high and low frequency patterns, respectively.

2.1. Track layouts and log BER measurement. We designed track layouts for BGI investigation as shown in Fig. 1, including a reference track without background as depicted in Fig. 1 (a). For all cases, the recorded data was a pseudo-random bit sequence (PRBS) pattern on the center track. Fig. 1 (b) and 1 (c) show track layouts having a single tone pattern (low & high frequencies) and a PRBS as the background tracks, respectively. The track pitch (TP) was defined as the distance between the centers of the reference track and the background track. In the analysis, the track pitch was also varied by 50%, 100%, and 120% of the nominal TP.

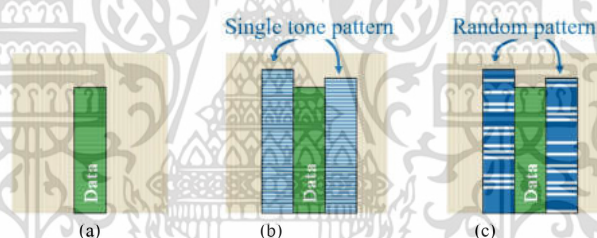


Figure 1. Schema of triple tracks with a various written adjacent track condition (a) non-background pattern (b) single tone pattern (c) pseudo-random bit sequence pattern.

To characterize the magnetic recording performance, a typical system contains three main parts, 1) encoding/decoding, 2) writing, and 3) reading. Before recording a user data pattern into the media, the recorded pattern is encoded to avoid noise from several sources, i.e., media noise, electronic noise, interference and distortion. The reader provides read signals to the decoder in order to decode the user data. The log bit error rate [9] is typically used as the performance metric and calculated using the number of read bit errors divided by the total number of user bits. For example, if the decoder shows 1,000 bits in error while encoded data contains 1,000,000 bits, the log BER would be $\log_{10}(1,000/1,000,000)$, which is equal to -3 decades.

2.2. Signal to noise ratio measurement. In general, the signal to noise ratio measurement is used to analyze a recording head and media characteristic via a spin-stand tester. It is useful for understanding the effects of the head, media, and recording conditions. The signal to noise ratios can

be calculated using an ensemble waveform analysis [10]. This method extracts electronic, transition and remanence noises. The detailed test procedures are explained as follows:

- The pseudo-random bit sequence (PRBS) generator polynomial for $m^8 + m^4 + m^3 + m^2 + 1$ is selected for the data pattern, with 255 bits of PRBS with 64 consecutive periods recorded on the mentioned track layouts. A reader then captured the recorded PRBS signal for 50 rounds to remove electronic or reader noise.
- A reader then captures the recorded PRBS signal for 50 rounds to remove electronic or reader noise.
- The averaging waveform of the 64 consecutive periods provides a spatially noisy waveform.
- The overall signal power can be divided into noise-free signal, spatial noise and electronic/reader noise. An appropriate weighting function can separate the spatial noise into the media transition and remanence noise. Finally, the SNR is the ratio of the overall signal power to the respective noise power.

Results and Discussion

Four recorded patterns and three-track pitch conditions were investigated. The background interference impact on HAMR performance was assessed by BER and SNR measurements as described above.

3.1. Bit Error Rate vs. Recorded Pattern. In Fig. 2, the effects of different background tracks on the recorded pattern were determined using log BER. This enabled the comparison of the center track log BER with the cases with and without background patterns. In addition, the track pitch impact was also investigated. The best recorded performance was achieved when the user data was recorded under the non-background condition. However, we observed that the worst condition occurred under a low frequency BGI, i.e. BER degraded by 0.37 decades relative to the non-background (Fig.3). The PRBS BGI pattern was also found to show performance degradation, but slightly better than the low frequency condition since a PRBS contained low frequency components from a long bit period. Note that the PRBS BGI case demonstrates the practical case where old data is directly overwritten by new data. We also observed that the BGI impact could be reduced using a high frequency pattern (higher data rate). The 100% TP condition had the greatest BGI impact while the shingled recording style (50% TP) and adjusted erase bands (120% TP) also looked promising.

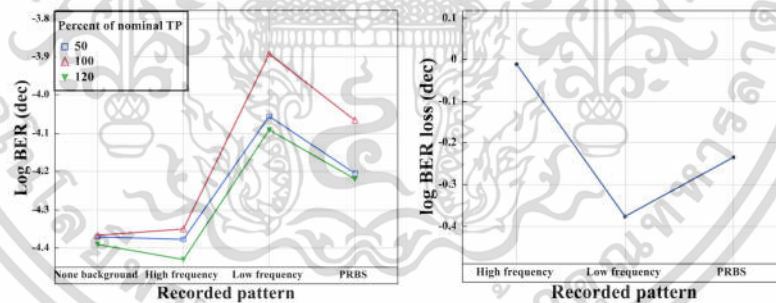


Figure 2. BER vs. recording pattern at various track pitch.

Figure 3. BER degradation vs. recorded pattern at 100% of the nominal track pitch.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2. Signal to noise ratio vs. Recorded Pattern. To study the background interference impact of the recorded pattern, we investigated the interference source via ensemble waveform analysis technique as mentioned above. Here, the total, electronic, transition, and remanence SNR's were extracted from the read-back signals. We compared the SNR among 1) non-background pattern, 2) low frequency pattern, 3) high frequency pattern, and 4) pseudo-random bit sequence pattern conditions.

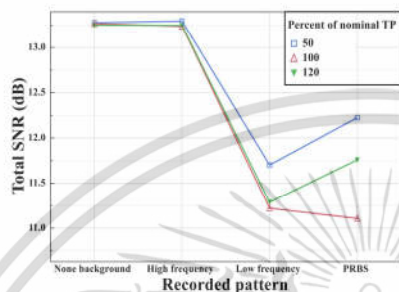


Figure 4. Total SNR as a function of recorded patterns for non-background, high frequency, low frequency, and PRBS. The SNR from each percent of the nominal track pitch is shown as a marker.

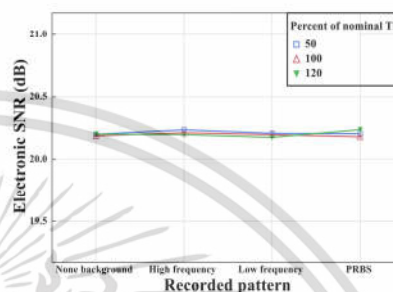


Figure 5. Electronic SNR as a function of recorded patterns for non-background, high frequency, low frequency, and PRBS.

Fig. 6 depicts the transition noise from the read-back signal for each BGI pattern, and shows that the maximum BGI impact occurs in the low frequency and PRBS conditions, particularly when the track pitch is at 100%. The transition SNR loss is about 2.1 dB relative to the non-background condition.

In Fig. 7, the remanence SNR, which describes the center bit signal, shows 4.6 dB degradation under the PRBS condition. This impact is higher than that of the transition noise, suggesting that the BGI mainly affects the center bit signal. When comparing between the various BGI cases, the transition and remanence noise behaviors are comparable to that of a total SNR (Fig. 4). This indicates that the majority of the noise is contributed by the remanence noise and followed by the transition noise.

Finally, these results show that SNR degradation is mostly impacted by the transition noise and remanence noise, with a PRBS pattern as the background track. In the experiment, the same transducer was used to write and read tracks. Therefore, the stray field from the background track is the root cause of degradation. In other words, the main problem was the side reading that interferes the reader during the read-back process either at the center or transition bits. Hence, these results signify that the read error performance is dependent of the background patterns.

Conclusions

In this study, the impacts of background interference and track pitch on HAMR recorded pattern were investigated. The spin-stand test results showed significant performance loss from the low frequency and PRBS background interference, particularly at 100% track pitch offset. The SNR measurements

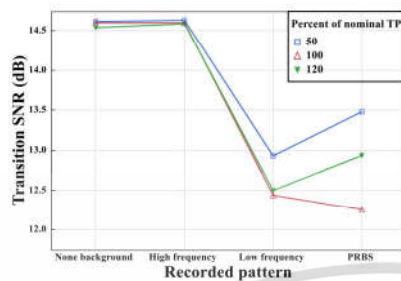


Figure 6. Transition SNR as a function of recorded patterns for non- background, high frequency, low frequency, and PRBS.

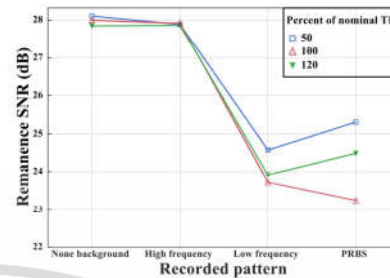


Figure 7. Remanence SNR as a function of recorded patterns for non- background, high frequency, low frequency, and PRBS.

confirmed that both the transition and remanence SNRs were degraded due to the strong remanence magnetic field of the adjacent background tracks. Finally, interference noise reduction was achieved by increasing the data rate (decreasing the bit length). Consequently, these observations are expected to support HDD areal density improvement in order to commercially drive the use of HAMR.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the technical support from Tim Dr. X. Zheng and the EDE-Asia group, Seagate Technology. This study was supported by the Thailand Research Fund and Research and Researcher for Industry and Seagate Technology (Thailand) Grant No. PHD60I0070.

References

- [1] D. Reinsel, J. Gantz and J. Rydning: The digitization of the world from edge to core, An IDC White Paper, Doc# US44413318 (2018).
- [2] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic and J. Miles: The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media, *IEEE Trans. Magn.* 45(2) 917-923 (2009).
- [3] M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel and et al.: Heat Assisted Magnetic Recording, *Proceeding of IEEE*, 96, 1810-1835 (2008).
- [4] S. Granz, J. Jury, C. Rea and et al.: Areal density comparison between conventional, shingled, and interlaced HAMR, *IEEE Trans. Magn.*, 55(3), 3100203 (2019).
- [5] X. Wang, K. Gai, H. Zhou, A. Itagi and et al.: HAMR recording limitations and extendibility, *IEEE Trans. Magn.*, 49(2), 686-692 (2013).
- [6] C. Rea, P. Subedi, K. Gao and et al.: Areal-density limits for heat-assisted magnetic recording and perpendicular magnetic recording, *IEEE Trans. Magn.*, 52(7), 3001304 (2016).
- [7] S. Kaitwanidvilai, N. Chaiduang Sri and D. Tongsojporn: Experimental study of media heat sink thickness impact on signal-to-noise ratio in heat-assisted magnetic recording, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 59, SEEC02 (2019).
- [8] S. Kaitwanidvilai, N. Chaiduang Sri and D. Tongsojporn: Impact of background interference on signal-to-noise ratio in heat-assisted magnetic recording, *IEEE Magn. Letter*, 4506704, (2018).
- [9] P. Khunkitti, A. Kruesubthaworn, A. Kaewrawang and A. Siritaratiwat: Playback signal distortion in CPP-GMR read heads due to induced electromagnetic interference, *J. Magn. Magn. Mater.*, 465, 14-18, (2018).
- [10] S. Hernández, P. L. Lu, S. Granz and et al.: Using ensemble waveform analysis to compare heat assisted magnetic recording characteristics of modeled and measured signals *IEEE Trans. Magn.*, 53(2), 3000406 (2017).

ประวัติผู้เขียน

| | |
|------------------|---|
| ชื่อ-นามสกุล | นายณัฐพล ไชยดวงศรี |
| วัน เดือน ปีเกิด | 15 พฤษภาคม 2533 ที่จังหวัดขอนแก่น |
| ที่อยู่ | 21 หมู่ 27 หมู่บ้าน โนนม่วง ตำบล ศิลา อำเภอ เมืองขอนแก่น จังหวัด ขอนแก่น 40000 โทร.0-845-154-371 |
| ประวัติการศึกษา | 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2555 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้