

ผลการออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ด้วยวิธีการจำลอง พลศาสตร์สปริงในระดับอะตอม

อรนุช แสงมาศ วาสนา แดงอำ พรณวดี จุรีมาศ และ เกษญา จุรีมาศ*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ 4 แบบ ได้แก่ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิมหรือแบบขั้นเดียว แบบสารประกอบควบคู่แลกเปลี่ยน แบบต่อเนื่องแกรนูลาร์ควบคู่ และแบบผสมระหว่างแบบสารประกอบควบคู่แลกเปลี่ยนและแบบต่อเนื่องแกรนูลาร์ควบคู่ ด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปริงในระดับอะตอมซึ่งมีพื้นฐานจากสมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต เพื่อที่จะเพิ่มศักยภาพและค่าความจุของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ได้ โดยรูปแบบจำลองระดับอะตอมนี้สามารถรวมผลกระทบของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนควบคู่ระหว่างชั้นและภายในชั้นฟิล์มและผลของสนามแม่เหล็กหักล้างเพื่อให้คำนวณมีค่าเสมือนจริงได้ นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญได้แก่ เวลาของวงปิดฮิสเทอรีซิสและอุณหภูมิจะถูกพิจารณาและนำไปใช้ในการคำนวณสมบัติแม่เหล็กพื้นฐานเราพบว่าโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสมแสดงศักยภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ดีที่สุด โดยโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลนี้สามารถเพิ่มศักยภาพความสามารถในการเขียน โดยการลดค่าเคออร์ซิวิตีได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และมีการกระจายตัวของสนามสลับแคบ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสมระหว่างแบบสารประกอบควบคู่แลกเปลี่ยนและแบบต่อเนื่องแกรนูลาร์ควบคู่ สามารถเป็นต้นแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ในอนาคตเพื่อที่จะเพิ่มค่าความจุและศักยภาพที่สูงขึ้นได้

คำสำคัญ: สนามเคอร์เออร์ซิวิตี แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิม แผ่นบันทึกข้อมูลแบบสารประกอบควบคู่แลกเปลี่ยน แผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องแกรนูลาร์ควบคู่

The Effect of Media Design in Advanced Recording Media by the Atomistic Spin Dynamics Simulation

Oranut Saengmart, Wassana Daeng-am, Phanwadee Chureemart and
Jessada Chureemart*

ABSTRACT

In this work, advanced recording media are designed into 4 types such as the conventional perpendicular recording media or single layer (SL) media, exchange coupled composite (ECC) media, coupled granular continuous (CGC) media and the hybrid media combining between ECC and CGC media via an atomistic spin dynamics simulation based on Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation of dynamic motion in order to enhance performance and increase the areal density for advanced recording media. This model can include the effects of inter/intra layer exchange coupling interaction and demagnetizing field for realistic calculation. Moreover, the significant factors such as hysteresis loop time and temperature are considered and used to calculate the magnetic properties. We found that the hybrid media structure shows the best magnetic recording performances. This media demonstrates the enhancements of writability by reducing of the value of coercivity over 50 percent and narrowing of the switching field distribution. In conclusion, the hybrid ECC/CGC media can be a new prototype structure of advanced recording media in order to achieve high areal density and performances.

Keywords: Coercivity field, Conventional perpendicular recording media, Exchange coupled composite media, Coupled granular continuous media

Computational and experimental magnetism group, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

*Corresponding author, email: jessada.c@msu.ac.th

บทนำ

ภายใต้ความต้องการที่จะผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มี ค่าความจุ (areal density) ที่สูงและมีราคาต่ำ ได้นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก (magnetic recording technology) อย่างต่อเนื่องตลอด 60 ปี นับตั้งแต่มีการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขึ้นมาเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1957 โดยปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการประสบความสำเร็จในการเพิ่มค่าความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ การพัฒนาองค์ประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วนได้แก่ หัวเขียน (write head) จะทำหน้าที่ในการผลิตสนามแม่เหล็กภายนอกในการเขียนข้อมูล หัวอ่าน (read head) จะทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลโดยทำการแปลงสัญญาณแม่เหล็กในแผ่นเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้าและแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic recording media) จะทำหน้าที่เก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับหัวเขียนและหัวอ่านข้อมูลได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวัดสัญญาณจากการอาศัยการวัดค่าความต้านทานเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistance, MR) ไปยังการวัดความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมาก (giant magnetoresistance, GMR) [1,2] โดยอาศัยหลักการกระเจิงของสปินในโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูล จากพัฒนานั้นนำไปสู่การวัดค่าสัญญาณในแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปของค่าความต้านทานได้สูงขึ้น แต่ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยตรง คือการพัฒนาในส่วนของแผ่นบันทึกข้อมูลเนื่องจากค่าความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเพิ่มสูงขึ้นได้เมื่อความกว้างของข้อมูลหรือขนาดของบิต (a_0) มีขนาดลดลงในแผ่นบันทึกข้อมูล โดยบิตข้อมูลจะประกอบด้วยแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางซึ่งไปในทิศเดียวกันเรียกว่า โดเมนเดี่ยว (single domain) ซึ่งความกว้างของข้อมูลจะมีค่าแปรผันตรงกับขนาดของเกรนในวัสดุแม่เหล็กในแผ่นบันทึกข้อมูลดังสมการที่ 1 [3,4]

$$a_0 \cong \sqrt{0.35a_{wc}^2 + \left(\frac{D_{av}}{2}\right)^2} \quad (1)$$

เมื่อ a_{wc} แทน Williams-Comstock transition และ D_{av} แทน ค่าเฉลี่ยของขนาดของเกรน ดังนั้นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญต่อการประสบความสำเร็จในการเพิ่มค่าความจุในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือการลดขนาดของเกรนให้มีขนาดเล็กที่สุดซึ่งในปัจจุบันเกรนมีขนาดประมาณ 6 ถึง 8 นาโนเมตร [5-7] โดยสามารถควบคุมด้วยการปลูกฟิล์มแม่เหล็กโลหะเจือ เช่น CoCrPt พร้อมการฉาบร่วม (co-sputtering) ด้วยซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งซิลิกอนออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นขอบเขตของเกรนแม่เหล็กโดยจะทำการจำกัดและลดขนาดของเกรนรวมถึงลดอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนด้วยเนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่แสดงอำนาจทางแม่เหล็ก [8] นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, ค่า S/N) แต่พบว่าการลดขนาดของเกรนในวัสดุแม่เหล็กเพื่อที่จะเพิ่มค่าความจุนั้นจะส่งผลต่อปัญหาด้านความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) ของข้อมูลที่ถูกบันทึกในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งถูกเรียกว่า พลังงานอุปสรรค (energy barrier, ΔE) จะมีค่าลดลง ดังสมการที่ 2

$$\Delta E = K_u V \left(1 - \frac{H_w}{H_k}\right)^2 \quad (2)$$

เมื่อ K_u คือ ค่าคงที่แอนไอโซทรอปี (anisotropy constant) V คือ ปริมาตรของเกรนในวัสดุแม่เหล็ก H_w คือ สนามแม่เหล็กภายนอกหรือสนามเขียนและ H_K คือค่าสนามแอนไอโซทรอปีที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็ก โดยค่าพลังงานอุปสรรคขั้นต่ำที่จะสามารถรักษาข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้ระยะเวลาที่ 10 ปีจะต้องมีค่าพลังงานอุปสรรคมากกว่า $60k_B T$ เมื่อค่า k_B คือค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant) และ T คือ อุณหภูมิ ดังนั้นการลดขนาดของเกรนเพื่อที่จะเพิ่มค่าความจุข้อมูลจะส่งผลให้ปริมาตรของเกรนในวัสดุลดลงซึ่งนำไปสู่การก่อให้เกิดปัญหาด้านความเสถียรทางความร้อน จากสมการที่ 2 พบว่าการเพิ่มค่าคงที่แอนไอโซทรอปีที่สูงมากซึ่งเป็นสมบัติภายในของวัสดุแม่เหล็กที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแผ่นบันทึกข้อมูลตัวอย่างเช่น SmCo_5 , $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ และ FePt มีค่าคงที่แอนไอโซทรอปีสูงถึง 20×10^7 , 4.6×10^7 และ 7×10^7 [9,10] ตามลำดับ จะสามารถแก้ไขปัญหาทางด้านความเสถียรทางความร้อนได้ แต่พบว่าการแก้ไขปัญหาทางด้านความร้อนกลับนำไปสู่การเกิดปัญหาใหม่อีกด้านคือความสามารถในการเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ เนื่องจากการเพิ่มพลังงานอุปสรรคที่สูงจะส่งผลต่อการเลือกวัสดุที่ผลิตสนามเขียน (write field) ที่สูงในหัวเขียนซึ่งเป็นข้อจำกัดในการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตหัวเขียนข้อมูลก่อให้เกิดปัญหาใหม่ขึ้นอีกด้านนอกจากนี้แล้วการแก้ไขปัญหาทางด้านการผลิตของสนามเขียนยังนำไปสู่ปัญหาอีกด้านเกี่ยวกับผลของค่า S/N ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วย จากความต้องการในการเพิ่มศักยภาพของความเร็วในการเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟโดยการลดขนาดของเกรนจะนำไปสู่ปัญหาของแผ่นบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกัน 3 ด้าน (media trilemma problem) [11] ได้แก่ ความเสถียรทางความร้อน ความสามารถในการเขียนและค่า S/N

จากปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการเพิ่มค่าความจุของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉาก ได้มีการนำเสนอเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแบบใหม่ เช่น แผ่นบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบอาศัยความร้อน (heat assisted magnetic recording media, HAMR) [9] แผ่นบันทึกข้อมูลแบบบิต (bit patterned media, BPM) และแผ่นบันทึกข้อมูลแบบอาศัยคลื่นไมโครเวฟ (microwave assisted magnetic recording media, MAMR) [12] ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้อาศัยพื้นฐานในการแก้ปัญหาโดยเพิ่มขีดความสามารถของหัวเขียนข้อมูล เช่น การใช้เทคโนโลยีของเลเซอร์และคลื่นไมโครเวฟมาช่วยในขบวนการเขียนซึ่งสามารถเขียนข้อมูลได้ในกรณีที่แผ่นบันทึกข้อมูลที่มีเกรนขนาดเล็กและมีค่าคงที่แอนไอโซทรอปีที่สูง แต่พบว่าสำหรับเทคโนโลยีแบบใหม่นี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ขบวนการผลิตหัวเขียน การออกแบบหัวเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและขบวนการผลิตในระดับนาโน ซึ่งจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษาและการพัฒนารวมถึงปัญหาในด้านต้นทุนการผลิตในการเปลี่ยนระบบหัวเขียนข้อมูลแบบใหม่ ดังนั้นเทคโนโลยีแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิมยังคงเป็นทางเลือกเดียวที่ยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในปัจจุบัน

ดังนั้นเทคโนโลยีแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากหรือแบบชั้นเดียว (SL) จึงถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของค่าความจุและแก้ไขปัญหา media trilemma problem ที่เกิดขึ้นโดยมีการนำเสนอแผ่นบันทึกข้อมูลตั้งฉากแบบใหม่ซึ่งเป็นการออกแบบลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์มแม่เหล็กหลายชั้น เช่น แผ่นบันทึกข้อมูลแบบสารประกอบควบคู่แลกเปลี่ยน (exchange coupled composite, ECC) [13,14] แผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องแกรนูลาร์ควบคู่ (coupled granular continuous, CGC) [15-17] และแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม [18-20] ซึ่งเป็นการรวมเอารูปแบบโครงสร้างของแบบ ECC และ CGC เข้าด้วยกันแต่พบว่างานวิจัยทางการทดลองและทางทฤษฎีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลของการออกแบบลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์มหลายชั้นที่มีความซับซ้อนต่อสมบัติแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลน้อยมาก เนื่องจาก

ลักษณะของการปลูกฟิล์มที่มีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีค่าความหนาของชั้นฟิล์มในระดับนาโนเมตร จะต้องใช้ระยะเวลาและการลงทุนที่สูงรวมถึงการศึกษาทางทฤษฎีพบว่ายังมีข้อจำกัดของรูปแบบจำลองแม่เหล็ก ในระดับจุลภาคมาตรฐาน (standard micromagnetic simulation) ที่ให้ผลที่คลาดเคลื่อน เนื่องจากขนาดของชั้นฟิล์มหลายชั้นที่มีขนาดความหนาแต่ละชั้นลดลงในระดับอะตอมนั้น มีอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมที่ส่งผลต่อการคำนวณสูงซึ่งไม่ถูกพิจารณาในการคำนวณในระดับจุลภาค

จากข้อจำกัดข้างต้นได้นำไปสู่การนำเสนองานวิจัยนี้ โดยทำการจำลองโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนและศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กที่มีผลต่อการพัฒนาประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอม (atomistic spin dynamics simulation) ด้วยโปรแกรม VAMPIRE software package [20] รูปแบบจำลองนี้สามารถจำลองลักษณะโครงสร้างที่มีความซับซ้อนได้ในระดับอะตอมและคิดผลของอันตรกิริยาระหว่างอะตอมและอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นและภายในชั้นฟิล์ม (intra/inter layer exchange coupling interaction) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อกระบวนการหมุนกลับของแมกนีไทเซชัน (magnetisation reversal) ได้นอกจากนี้รูปแบบจำลองนี้สามารถพิจารณาผลของสนามแม่เหล็กหักล้าง (demagnetizing field) หรือปริมาณสนามแม่เหล็กขั้วคู่ (dipolar field) ระหว่างอะตอมที่เกิดขึ้นภายในระบบโครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากและให้ค่าการคำนวณได้เสมือนจริง ในงานวิจัยนี้จะทำการจำลองโครงสร้างเสมือนจริงแบบต่างๆ ได้แก่ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิม แผ่นบันทึกข้อมูลแบบสารประกอบควดรูแลกเปลี่ยน แผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องกรนูลาร์ควดรู และ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม เพื่อทำการศึกษาผลของการออกแบบลักษณะทางกายภาพของชั้นฟิล์มหลายชั้น โดยทำการคำนวณวงปิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) เพื่อทำการศึกษาคูสมบัติแม่เหล็กพื้นฐานที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลสุดท้ายทำการเปรียบเทียบสมบัติแม่เหล็กเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างที่ซับซ้อนแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นต้นแบบของการออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากในอนาคตต่อไป

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

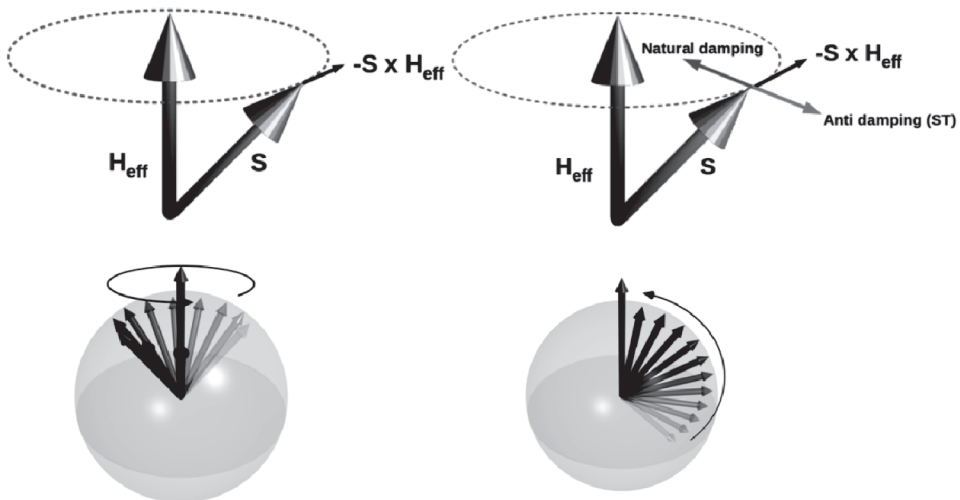
งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลตั้งฉากแบบใหม่ ศึกษากระบวนการผันกลับทิศทางของสปินและสมบัติแม่เหล็กพื้นฐานที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากการออกแบบโครงสร้างแบบต่างๆโดยอาศัยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอมด้วยโปรแกรม VAMPIRE software package [20] หัวข้อนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของวิธีการคำนวณพลวัตของโมเมนต์แม่เหล็กระดับอะตอมซึ่งมีพื้นฐานจากการพิจารณาพลังงานรวมของระบบและจะอธิบายในรูปพลังงานรวมแฮมิลโทเนียนของสปินแบบดั้งเดิม (classical spin Hamiltonian) ในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงการพิจารณาการเคลื่อนที่พลวัตของสปินซึ่งมีพื้นฐานการคำนวณจากสมการแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert, LLG equation) จะสามารถอธิบายผลการเปลี่ยนแปลงของสปินต่อเวลาเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลนำไปสู่การคำนวณห้วงปิดฮิสเทอรีซิสเพื่อใช้ศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ที่ถูกจำลองขึ้นไป

รูปแบบจำลองทางแม่เหล็กระดับอะตอม

สำหรับการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีความหนาของชั้นฟิล์มหลายชั้นที่บางในระดับอะตอมโดยพบว่าวิธีที่เหมาะสมและให้ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่มีค่าเสมือนจริงคือ การคำนวณด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอม เนื่องจากสามารถพิจารณาผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนควบคู่ระหว่างอะตอมได้สำหรับวัสดุแม่เหล็กที่มีความหนาใกล้เคียงในระดับอะตอมพบว่าผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนจะส่งผลต่อการผันกลับของแมกนีไทเซชันสูงโดยการคำนวณหาปริมาณแมกนีไทเซชันของระบบจะเกิดจากผลรวมของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมทุกตัวในระบบภายใต้การคำนวณของสมการการเคลื่อนที่ของแลนดอว์-ลิฟชิตซ์-กิลเบิร์ต (Landau-Lifshitz-Gilbert equation of motion, LLG) ซึ่งจะอธิบายพลวัตหรือการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสปินเมื่อมีการวิวัฒนาการไปของเวลาเนื่องจากแรงบิดหรือทอร์คที่เกิดจากการเหนี่ยวนำทิศทางของสปินด้วยสนามแม่เหล็กประสิทธิผลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \mathbf{S}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} \mathbf{S}_i \times \mathbf{H}_{eff}^i - \frac{\gamma\alpha}{1+\alpha^2} \left[\mathbf{S}_i \times (\mathbf{S}_i \times \mathbf{H}_{eff}^i) \right] \quad (1)$$

เมื่อ \mathbf{S}_i คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินที่มีทิศทางใดๆ \mathbf{H}_{eff}^i คือสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (effective magnetic field) γ คือค่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติก (gyromagnetic ratio) และ α คือค่าคงที่การหน่วง (damping constant) อัตราการเปลี่ยนแปลงของสปินต่อเวลาจากสมการที่ 1 สามารถอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของสปินได้ในสองลักษณะคือ เทอมแรกแสดงถึงการเคลื่อนที่ของสปินแบบหมุนวนรอบสนามแม่เหล็กประสิทธิผล (precessional motion) และ เทอมที่สองแสดงถึงการเคลื่อนที่ของสปินแบบหน่วง (damping motion) เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะออกแรงบิดกระทำต่อสปินมีผลทำให้สปินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามแม่เหล็กประสิทธิผลแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของสปินเนื่องจาก ก) การเคลื่อนที่แบบหมุนวน ข) การเคลื่อนที่แบบหน่วง

จากสมการ 1 สนามแม่เหล็กประสิทธิผลจะมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 2

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_{exc} + \mathbf{H}_{ani} + \mathbf{H}_{app} + \mathbf{H}_{dip} + \mathbf{H}_{ther} \quad (2)$$

เมื่อ \mathbf{H}_{exc} แทนสนามปฏิสัมพันธ์แลกเปลี่ยน (exchange interaction field) ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างสปินสามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์ของพลังงานต่อโมเมนต์แม่เหล็ก (μ) ของสปิน ($\frac{\partial \mathcal{H}_{exc}}{\partial \mu_i}$) สำหรับการคำนวณค่าพลังงานการแลกเปลี่ยนในแบบจำลองระดับอะตอมจะพิจารณาอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนโดยตรงแบบระยะสั้นหรืออันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างสปินที่อยู่ติดกันซึ่งมีผลรวมค่าพลังงานการแลกเปลี่ยนระหว่างสปินถูกอธิบายในรูปแบบสมการของแฮมิลโทเนียนคือ $\mathcal{H}_{exc} = -\sum_{i \neq j} J_{ij} (\hat{S}_i \cdot \hat{S}_j)$ จะอธิบายอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างสปิน i และสปิน j ที่อยู่ติดกันเมื่อ J_{ij} คือค่าคงที่ของปริพันธ์การแลกเปลี่ยน (exchange integral) และ \hat{S}_i และ \hat{S}_j คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสปินตัวที่ i กับสปินตัวที่ j ตามลำดับ

\mathbf{H}_{ani} คือสนามแอนไอโซทรอปีเป็นสนามที่รักษาทิศทางของสปินหรือแมกนีโทเซชันให้มีการจัดเรียงตัวตามทิศแกนง่ายของวัสดุแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กัลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุแม่เหล็กเนื่องจากสปินจะเกิดจากการเคลื่อนที่รอบตัวเองและรอบวงโคจร ในการคำนวณในระดับอะตอมสามารถคำนวณพลังงานแอนไอโซทรอปีจาก $\mathcal{H}_{ani} = -K_u \sum_i (\hat{S}_i \cdot \hat{e})^2$ เมื่อ K_u คือค่าคงที่แอนไอโซทรอปีและ \hat{e} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศแกนง่ายในโครงสร้างผลึก

\mathbf{H}_{app} คือสนามแม่เหล็กภายนอกจะอธิบายการตอบสนองของสปินเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกอันตรกิริยาระหว่างสปินและสนามแม่เหล็กภายนอกจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำสปินให้จัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กและค่าพลังงานภายนอกอธิบายได้ตามสมการ $\mathcal{H}_{app} = \mu_s \sum_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{H}_{app}$ เมื่อ μ_s แทนขนาดของโมเมนต์แม่เหล็กของสปิน

\mathbf{H}_{dip} คือสนามแม่เหล็กหักล้างจะอธิบายในรูปของพลังงานการลดสภาพแม่เหล็กของวัสดุเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแม่เหล็กเองซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแมกนีโทเซชัน โดยค่าพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุแม่เหล็กและการคำนวณค่าพลังงานการลดสภาพความเป็นแม่เหล็กพิจารณาจากปริพันธ์ของค่าอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างแมกนีโทเซชันและสนามหักล้างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแทนด้วย $\mathbf{H}_{dip} = -\frac{1}{2} \int \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_{dip} dv$ [21]

\mathbf{H}_{ther} คือสนามความร้อนจะอธิบายผลของความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิภายนอกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสปินหรือแมกนีโทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งสามารถพิจารณาผลของความเสถียรของความร้อน โดยสนามความร้อนสามารถคำนวณได้จาก $\mathbf{H}_{ther}^i(t) = \Gamma(t) \sigma$ [22] เมื่อ σ แทนส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐานมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{2\alpha k_B T}{\gamma \mu_s \Delta t}}$ และ $\Gamma(t)$ คือฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน

วิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอมด้วยโปรแกรม VAMPIRE software package [20] จะสามารถสร้างโครงสร้างอะตอมเสมือนจริงของแผ่นบันทึกข้อมูลตั้งจากแบบต่างๆ ได้เช่นแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ SL ECC CGC และ ECC/CGC ซึ่งจะถูกนำเสนอในส่วนของผลการทดลองในหัวข้อถัดไปจากการ

กำหนดโครงสร้างอะตอมจะสามารถคำนวณพลังงานรวมและสนามแม่เหล็กประสิทธิผลเนื่องจากปัจจัยที่สำคัญดังสมการที่ 2 นำไปสู่การคำนวณหาการเคลื่อนที่พลวัตของปริมาณแมกนีไทเซชันที่สถานะสมดุลซึ่งอธิบายในสมการที่ 1 และสามารถคำนวณหาปริมาณแมกนีไทเซชันเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกได้และใช้ในการคำนวณหาวงปิดฮีสเทอรีซิสและสมบัติทางแม่เหล็กต่อไป

ผลการทดลอง

การออกแบบโครงสร้างเสมือนจริงของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่

เพื่อที่จะศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กพื้นฐานที่มีผลต่อการพัฒนาและเพิ่มศักยภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากให้มีค่าความจุมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้วเนื่องจากการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ดังนั้นการจำลองโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอมจะต้องมีการออกแบบและกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กที่นำมาใช้ในแบบจำลองให้มีความเสมือนจริงเพื่อที่จะได้ผลการคำนวณที่มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลที่ออกแบบเพื่อใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ประเภท

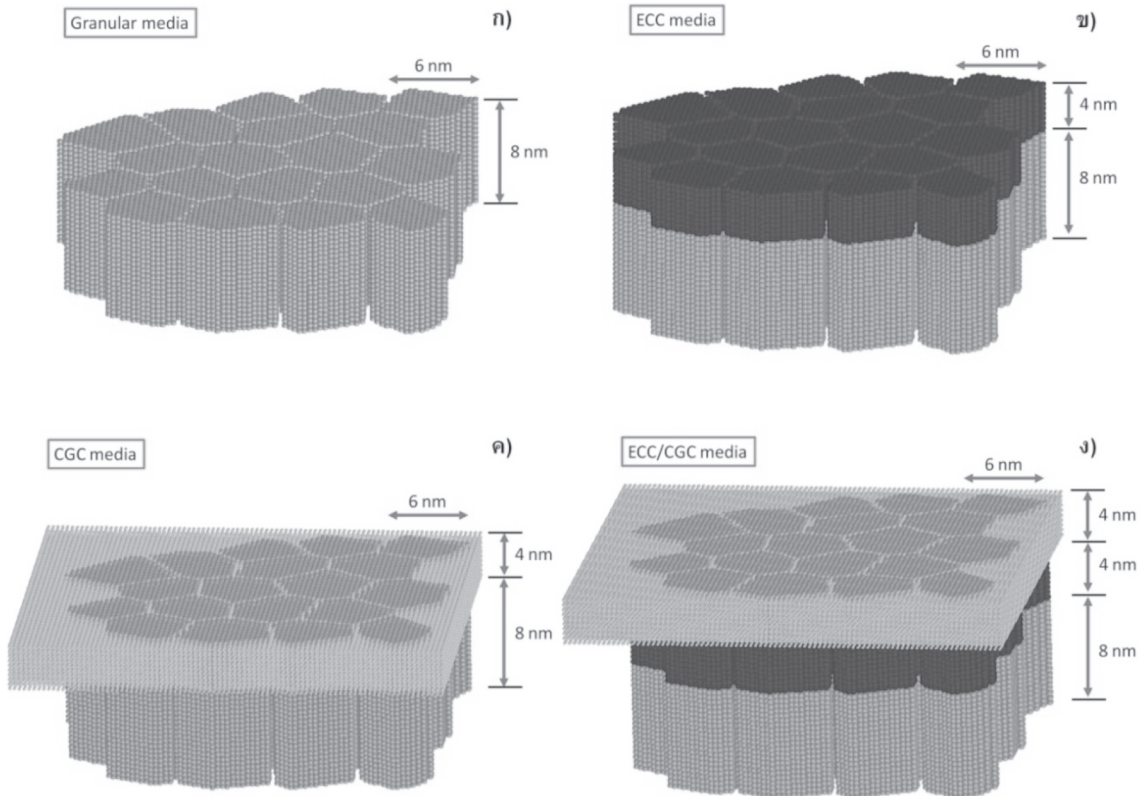
1. แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิมหรือแบบชั้นเดียว SL จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็กเพียง 1 ชั้น เช่นวัสดุแม่เหล็ก CoPt จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแท่งเกรน (columnar stack) ซึ่งถูกชั้นกลางด้วยวัสดุ SiO_2 ชั้นฟิล์มเดียวจะทำหน้าที่เป็นชั้นเก็บข้อมูลเนื่องจากมีค่าคงที่แอนไอโซทรอปีที่สูง ดังนั้นรูปแบบจำลองโครงสร้างระดับอะตอมจะทำการออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบชั้นเดียวโดยกำหนดให้ความหนาของชั้นฟิล์มอยู่ที่ 21 อะตอมหรือประมาณ 8 นาโนเมตร สมบัติทางแม่เหล็กภายในโดยกำหนดให้ค่าคงที่แอนไอโซทรอปีมีค่าเท่ากับ 2.2 เทสลา และแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetisation, M_s) เท่ากับ 700 emu/cc โดยกำหนดให้ค่าความเข้มของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมมีค่าเท่ากับ 9.86×10^{-21} J/atom

2. แผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC จะมีลักษณะโครงสร้างแบบแท่งเกรนคล้ายแผ่นบันทึกข้อมูลตั้งฉากแบบเดิมแต่จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็ก 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นฟิล์มแม่เหล็กที่มีค่าคงที่แอนไอโซทรอปีที่สูงจะทำหน้าที่เก็บข้อมูลและชั้นฟิล์มแม่เหล็กด้านบนซึ่งมีค่าคงที่แอนไอโซทรอปีต่ำจะทำหน้าที่เสมือนชั้นช่วยหมุน (switching layer) โดยรูปแบบจำลองโครงสร้างระดับอะตอมจะกำหนดให้ค่าสมบัติทางแม่เหล็กของชั้นฟิล์มเก็บข้อมูล คือ $H_{K1} = 2.2$ เทสลา $M_{s1} = 700$ emu/cc และมีความหนาเท่ากับ 8 นาโนเมตร ในขณะที่ชั้นฟิล์มช่วยหมุน $H_{K2} = 1.6$ เทสลา $M_{s2} = 800$ emu/cc และมีความหนาชั้นฟิล์มที่ 11 อะตอม หรือ 4 นาโนเมตร โดยกำหนดให้อันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มทั้งสองมีค่าเป็น 5% ของค่า J_{ij}

3. แผ่นบันทึกข้อมูลแบบ CGC มีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็ก 2 ชั้น โดยชั้นแรกคือชั้นเก็บข้อมูลซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบแท่งเกรนซึ่งแต่ละเกรนจะถูกแยกห่างออกจากกัน ในขณะที่ชั้นฟิล์มแม่เหล็กที่สองจะมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มแม่เหล็กแบบต่อเนื่องซึ่งแตกต่างจากแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC โดยกำหนดให้ชั้นเก็บข้อมูลมีสมบัติทางแม่เหล็กและความหนาของชั้นฟิล์มเหมือนกับ ECC แต่ขณะที่ชั้นฟิล์มแม่เหล็กต่อเนื่องจะมีค่า $H_{K2} = 1$ เทสลา $M_{s2} = 600$ emu/cc มีความหนาชั้นฟิล์มที่ 4 นาโนเมตร

และค่าอันตรกิริยาระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กเท่ากับ 5% ของค่า J_{ij} ในขณะที่อันตรกิริยาภายในชั้นฟิล์มต่อเนื่องมีค่าสูงเท่ากับ 50% ของค่า J_{ij}

4. แผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม ECC/CGC มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็ก 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นแรกคือ ชั้นเก็บข้อมูลซึ่งมีค่าคงที่เอนไอโซทรอปีที่สูง $H_{K_1} = 2.2$ เทสลา $M_{S_1} = 700$ emu/cc และมีความหนาเท่ากับ 8 นาโนเมตร ชั้นที่สองคือ ชั้นฟิล์มช่วยหมุนมีสมบัติแม่เหล็ก $H_{K_2} = 1.6$ เทสลา $M_{S_2} = 800$ emu/cc และมีความหนาเท่ากับ 4 นาโนเมตร ซึ่งชั้นฟิล์มที่หนึ่งและสองจะมีลักษณะโครงสร้างแบบแท่งเกรนซึ่งเกรนแต่ละเกรนจะแยกออกจากกัน 0.5 นาโนเมตร และชั้นที่สามคือ ชั้นฟิล์มต่อเนื่องมีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก $H_{K_3} = 1$ เทสลา $M_{S_3} = 600$ emu/cc และมีความหนาเท่ากับ 4 นาโนเมตร โดยอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นฟิล์มแรกและชั้นที่สองชั้นที่สองและสามมีค่าเป็น 5% และ 10% ของค่า J_{ij} ตามลำดับ



รูปที่ 2 โครงสร้างของชั้นบันทึกข้อมูลในแนวตั้งฉาก (ก) ชั้นบันทึกข้อมูลแบบชั้นเดี่ยว SL (ข) ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC (ค) ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ CGC และ (ง) ชั้นบันทึกข้อมูลแบบ ECC/CGC

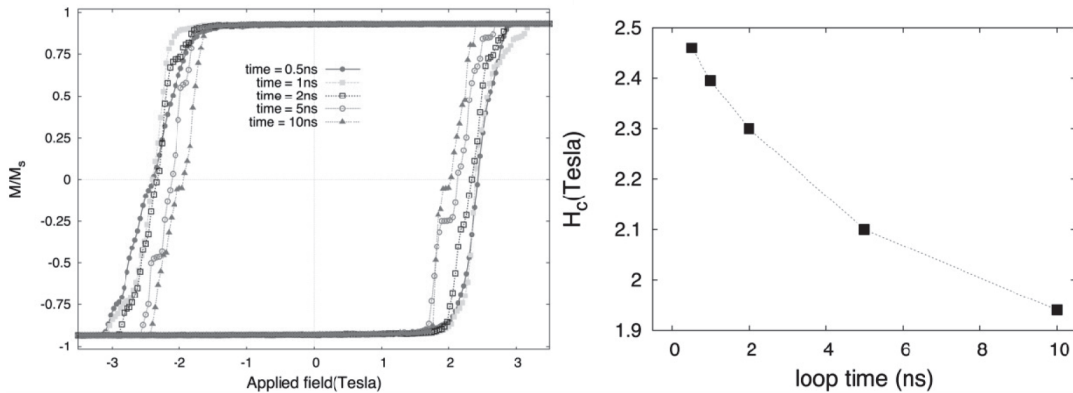
ระบบของโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลจะถูกจำลองให้มีขนาดของระบบที่มีค่าเท่ากันเพื่อใช้เปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็ก โดยกำหนดให้มีขนาดของระบบ กว้าง 34 นาโนเมตร และยาว 34 นาโนเมตร และขนาดของแต่ละเกรนมีค่าเท่ากับ 6 นาโนเมตรและมีช่องว่างระหว่างเกรนเป็น 0.5 นาโนเมตร ซึ่งสามารถจำลองจำนวนเกรนทั้งหมดประมาณ 20 เกรน หรือประมาณ 180,000 อะตอม สมบัติทางแม่เหล็กวัสดุแม่เหล็กที่ถูกใช้ในรูปแบบจำลองมีพื้นฐานจากวัสดุโลหะเจือ CoPt ซึ่งมีอุณหภูมิคูรี 1000 เคลวิน และพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ 0 และ 300 เคลวิน รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างเสมือนจริงที่ได้จากรูปแบบจำลองพลศาสตร์สปินแบบอะตอมของโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลจากผลการทดลองพบว่าลักษณะของโครงสร้างมีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลจริง [5] โดยจะนำโครงสร้างเสมือนจริงนี้ไปใช้ศึกษาสมบัติแม่เหล็กในหัวข้อถัดไป

ปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการคำนวณทางแม่เหล็กในระดับอะตอม

การศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยวิธีการจำลองโครงสร้างพลศาสตร์สปินจะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองนั้นจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการคำนวณสมบัติทางแม่เหล็กของรูปแบบจำลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็ก ได้แก่ ผลของการขึ้นอยู่กับเวลา (time dependence) ผลของอุณหภูมิและผลของสนามหมุนกลับหรือสนามขั้วคู่เพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมต่อระบบและนำไปใช้ในการคำนวณในลำดับต่อไป

1. ผลของปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับเวลา

ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาประสิทธิภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลและสมบัติทางแม่เหล็กคือการวัดปริมาณสนามหมุนกลับ (switching field) ของแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งพบว่าปริมาณที่ส่งผลต่อค่าสนามหมุนกลับคือ เวลาหรือความถี่รวมที่ใช้ในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิส 1 รอบ หรือเวลารวมที่ใช้ในการวัดค่าแมกนีไทเซชันโดยนับเวลาเริ่มจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกจากค่าที่เป็นบวกสูงสุดไปยังค่าสนามแม่เหล็กที่ติดลบสูงสุดหรือทิศตรงข้ามและกลับมายังค่าสนามแม่เหล็กที่เป็นบวกสูงสุดอีกครั้ง โดยจะทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการวัดวงปิดเพื่อคำนวณหาค่าสนามหมุนกลับหรือค่าเคอเออร์ซิวิตี (coercivity, H_c) ที่เวลาแตกต่างกันดังนี้ 0.5×10^{-9} , 1×10^{-9} , 2×10^{-9} , 5×10^{-9} และ 10×10^{-9} วินาที ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกจะกำหนดให้มีค่าตั้งแต่ 3.5 เทสลา ถึง -3.5 เทสลาในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นฟิล์ม โดยโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิมจะถูกเลือกมาพิจารณาผลของปัจจัยที่ขึ้นกับเวลาแสดงดังรูปที่ 3 ก)



รูปที่ 3 ก) ลักษณะของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ SL ที่เวลาต่างๆ และ ข) ค่าเคอร์เออซีวิตีที่เวลาต่างๆ

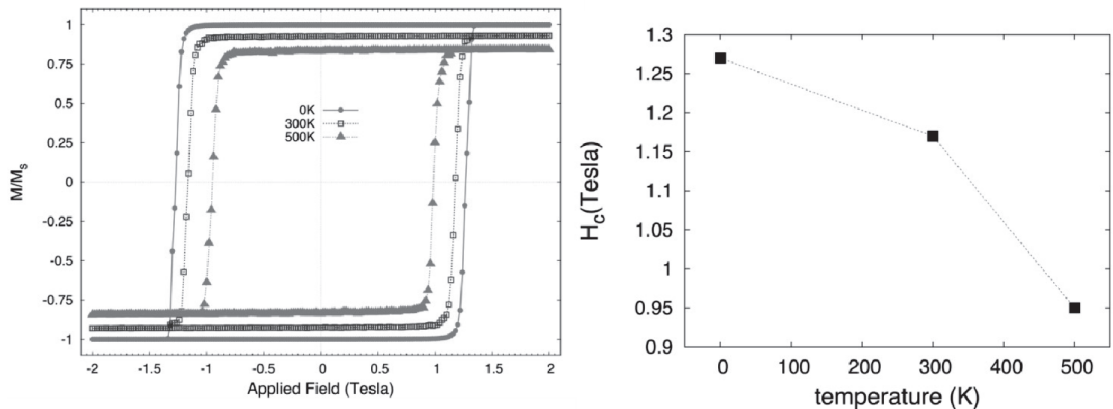
จากรูปที่ 3 ข) แสดงค่าเคอร์เออซีวิตีของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิมที่มีโครงสร้างเดิมแต่มีเวลาที่แตกต่างกันจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้เวลาในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติแม่เหล็กหรือค่าเคอร์เออซีวิตีอย่างมาก โดยการเพิ่มค่าของเวลาที่มากขึ้นจะมีผลต่อการลดลงของค่าเคอร์เออซีวิตีซึ่งพบว่าค่า H_c จะมีค่าลดลง 20% ที่เวลา 10×10^{-9} วินาทีเมื่อเทียบกับเวลาของวงปิดฮิสเทอรีซิสที่ 1×10^{-9} วินาที สาเหตุเนื่องมาจากการใช้เวลาในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสที่นานขึ้นจะมีผลทำให้สนามแม่เหล็กภายนอกหรือพลังงานศักย์ภายนอกตอบสนองต่อสปินภายในระบบมากขึ้นจึงส่งผลต่อการหมุนกลับทิศทางที่เพิ่มขึ้นนั้นนำไปสู่การลดลงของค่าเคอร์เออซีวิตีนั่นเองจะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าเวลาในรูปแบบจำลองโครงสร้างระดับอะตอมจะส่งผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กสูงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดค่าเวลาที่ใช้ในการวัดฮิสเทอรีซิสที่ 5×10^{-9} วินาที เพื่อที่จะได้ค่าที่สอดคล้องกับการทดลอง เนื่องจากขบวนการเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะใช้เวลาในการเขียนเร็วมากๆ หรือค่าความถี่ที่สูงมาก ($< 10 \times 10^{-9}$ วินาที) [23]

2. ผลของปัจจัยที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือ พลังงานความร้อนหรือผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิภายนอก โดยการศึกษาผลของปัจจัยที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะทำการศึกษาโดยพิจารณาโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม ECC/CGC ซึ่งมีขนาดโครงสร้างของระบบกว้าง 34 นาโนเมตร และยาว 34 นาโนเมตร และขนาดของเกรนมีค่าเท่ากับ 6 นาโนเมตรและพิจารณาที่อุณหภูมิ 0, 300 และ 500 เคลวิน

เมื่อพิจารณาระบบที่อุณหภูมิ 0 เคลวินพบว่าค่าเคอร์เออซีวิตีจะมีค่ามากที่สุดและค่าอัตราส่วนปกติของ M/M_s (M/M_s normalization) จะมีค่าเท่ากับ 1 ในขณะที่เมื่อเพิ่มค่าพลังงานความร้อนพบว่าค่าเคอร์เออซีวิตีและค่าปกติของแมกนีไทเซชันจะมีค่าลดลง โดยรูปที่ 4 ก) แสดงผลของลักษณะวงปิดฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิต่างกันเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นฟิล์ม พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่าเคอร์เออซีวิตีและค่าแมกนีไทเซชันและรูปที่ 4 ข) แสดงค่าสนามหมุน

กลับของเคอร์เอชวีดีที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะมีค่า 1.27, 1.17 และ 0.95 เทสลา ที่อุณหภูมิ 0, 300 และ 500 เคลวิน ตามลำดับซึ่งจะมีค่าลดลงถึง 25% โดยสาเหตุเนื่องจากผลของพลังงานความร้อนจะส่งผลต่อสปินของอะตอมทุกตัวในระบบให้ได้รับพลังงานภายนอกที่สูงขึ้นนำไปสู่การหมุนกลับทิศทางของสปินง่ายขึ้นเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลนั่นเอง นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าผลของพลังงานความร้อนจะไม่ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของวงปิดฮีสเทอรีซิส



รูปที่ 4 ก) ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสมที่อุณหภูมิ 0, 300 และ 500 เคลวิน ข) ค่าเคอร์เอชวีดีฮีสเทอรีซิสที่อุณหภูมิต่างๆ

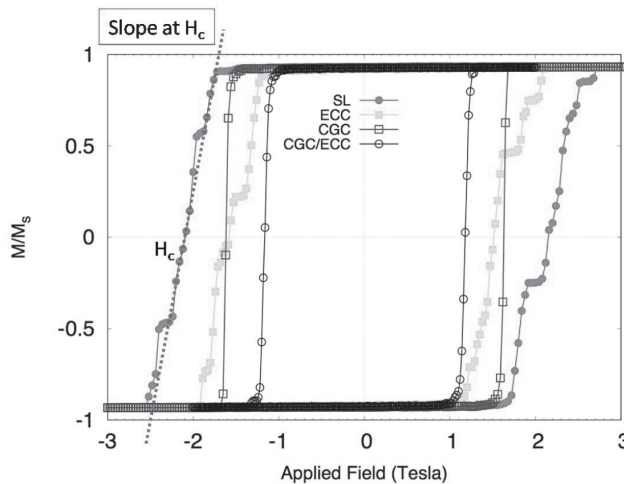
สมบัติทางแม่เหล็กเนื่องจากการออกแบบโครงสร้าง

การพิจารณาสมบัติทางแม่เหล็กเนื่องมาจากผลของการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีโครงสร้างแบบต่างๆ ได้แก่ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบ SL ECC CGC และ ECC/CGC เพื่อที่จะทำการคำนวณผลทางแม่เหล็กให้ค่าเสมือนจริงระบบจะทำการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อการคำนวณรูปแบบจำลองพลศาสตร์สปินระดับอะตอมซึ่งได้ศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาดังต่อไปนี้เวลาของวงปิดฮีสเทอรีซิสมีค่า 5×10^{-9} วินาที อุณหภูมิ 300 เคลวินขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเกรนมีค่า 8 นาโนเมตร และมีการรวมผลของสนามหักล้างหรือสนามขั้วคู่ในระบบ

โดยวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างต่างๆ จะถูกคำนวณโดยกำหนดทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอกให้มีทิศตั้งฉากกับแผ่นฟิล์ม โดยสนามแม่เหล็กอิ่มตัวสูงสุด (H_S) จะมีค่าเท่ากับ 3 เทสลา และค่าแมกนีไทเซชันจะถูกคำนวณที่สนามแม่เหล็กภายนอกครั้งละ 0.03 เทสลา โดยรูปที่ 5 แสดงลักษณะรูปร่างของวงปิดฮีสเทอรีซิสของแผ่นบันทึกข้อมูลของโครงสร้างที่แตกต่างกันเนื่องจากการออกแบบแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ จะเห็นได้ว่าการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลหลายชั้นที่มีความซับซ้อนจะส่งผลสำคัญต่อสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าเคอร์เอชวีดีและค่าความชันของ

อัตราส่วนปกติของ M/M_s ที่ผ่านจุด $H_c \left[\frac{d(M/M_s)}{dH} \right]_{H=H_c}$ โดยพบว่าคุณสมบัติรูปร่างของวงปิดฮีสเท

อริชีสของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ SL จะมีกว้างที่สุดและ H_c มีค่า 2.1 เทสลาซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่แอนไอโซทรอปีของวัสดุแม่เหล็ก ในขณะที่ผลของการออกแบบโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น CGC, ECC และ ECC/CGC ลักษณะโครงสร้างของวงปิดฮีสเทอรีซิสจะมีค่าแควลงซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าการออกแบบโครงสร้างของชั้นฟิล์มหลายชั้น ชั้นฟิล์มจะมีผลต่อขบวนการหมุนกลับของแมกนีไทเซชันของชั้นเก็บข้อมูล และทำให้ค่าสนามหมุนกลับซึ่งมีแปรผันตามค่า H_c มีค่าลดลงอย่างมาก นำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพของการเขียนข้อมูลเนื่องจากค่าคงที่แอนไอโซทรอปีในชั้นเก็บข้อมูลที่มีค่าสูง 2.2 เทสลาแต่กับใช้สนามเขียนที่น้อยนั่นเอง



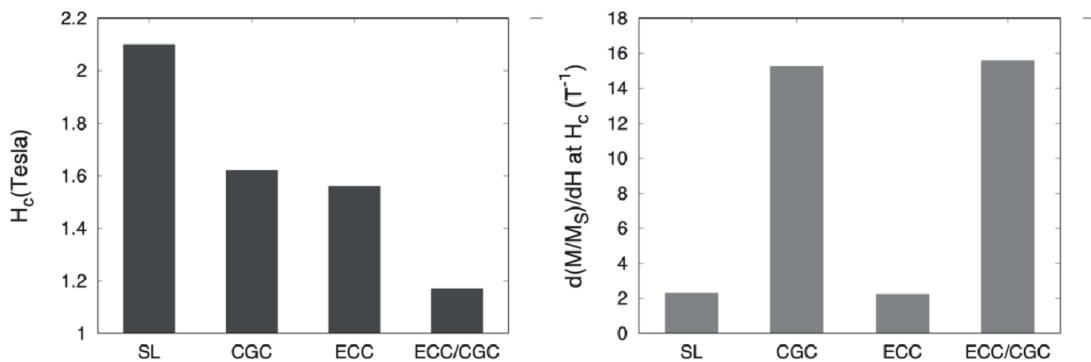
รูปที่ 5 ลักษณะของวงปิดฮีสเทอรีซิสของโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน และตัวอย่างของเส้นความชันที่ผ่านจุดเคอเออร์ซีวิตี

รูปที่ 6 ก) จะแสดงผลของการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ที่มีผลต่อการลดลงของค่าเคอเออร์ซีวิตี (ค่าคงที่แอนไอโซทรอปีของชั้นเก็บข้อมูล $H_k = 2.2$ เทสลา) สำหรับโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC ค่าเคอเออร์ซีวิตีจะมีค่าลดลงมากกว่าการออกแบบโครงสร้างแบบ CGC สาเหตุเนื่องมาจากการออกแบบโครงสร้างของ ECC จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มแม่เหล็ก 2 ชั้นซึ่งมีค่าคงที่แอนไอโซทรอปีที่ต่ำถูกปลูกบนชั้นฟิล์มเก็บข้อมูล เมื่อมีการเขียนข้อมูลหรือให้สนามแม่เหล็กภายนอกจะส่งผลให้แมกนีไทเซชันในชั้นฟิล์มแม่เหล็กด้านบนมีการหมุนกลับทิศทางก่อนชั้นเก็บข้อมูลนำไปสู่การส่งผ่านแรงทอร์คไปยังชั้นเก็บข้อมูลซึ่งส่งผลให้ค่าเคอเออร์ซีวิตีมีค่าลดลงในขณะที่ค่าความชันของอัตราส่วนปกติของ M/M_s ที่ผ่านจุด H_c ซึ่งค่าความชันจะอธิบายถึงอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมของโครงสร้าง โดยถ้าค่าความชันที่มีค่าสูงหมายถึงการหมุนกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันจะเกิดขึ้นพร้อมกันหรือมีการกระจายตัวของสนามหมุนหรือสนามเขียนที่แคบซึ่งจะส่งผลให้เกิดค่า S/N ที่สูงและจะเพิ่มศักยภาพของแผ่นบันทึก

ข้อมูล แต่พบว่าค่าความชันที่ผ่านจุด $H_c \left[\frac{d(M/M_s)}{dH} \right]_{H=H_c}$ ของโครงสร้างแบบ ECC จะมีค่าใกล้เคียงกับ

โครงสร้าง แบบ SL ดังรูปที่ 6 ข) ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อารเปลี่ยนรูปร่างของวงปิดฮีสเทอรีซิส

สำหรับสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลที่มีโครงสร้างแบบ CGC จะพบว่าผลของค่า H_C จะมีค่าลดลงน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบ ECC แต่พบว่าลักษณะรูปร่างของวงปิดฮิสเทอรีซิสของโครงสร้างแบบ CGC จะมีส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวงปิดฮิสเทอรีซิสซึ่งจะมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมหรือไม่มีการบิดเบี้ยวของวงปิดโดยค่าความชันจะมีค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบ SL และแบบ ECC สาเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างแบบ CGC จะมีการออกแบบโครงสร้างโดยทำการเพิ่มชั้นฟิล์มต่อเนื่องบนชั้นเก็บข้อมูลซึ่งพบว่าชั้นฟิล์มต่อเนื่องที่มีค่าอันตรกิริยาที่สูงจะทำหน้าที่ในการรักษาทิศทางการหมุนกลับในชั้นเก็บข้อมูลด้านล่างเมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกที่สามารถกลับทิศทางของแมกนีไทซ์ในชั้นเก็บข้อมูลได้จะก่อให้เกิดการหมุนกลับอย่างพร้อมกัน (coherent reversal) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบโครงสร้างแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC จะส่งผลให้เกิดการลดลงของค่า H_C ที่สูงแต่มีค่าความชัน $\left[\frac{d(M/M_S)}{dH} \right]_{H=H_C}$ ที่ต่ำ ในขณะที่การออกแบบโครงสร้างแบบ CGC จะมีผลให้เกิดการลดลงของ H_C ที่ต่ำกว่าแต่ค่าความชันที่สูงกว่า ซึ่งโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ทั้งสองจะมีข้อดีกันคนละด้านจึงนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม



รูปที่ 6 ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคอร์ซีวิตีกับลักษณะโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูล ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชันของ $\left[\frac{d(M/M_S)}{dH} \right]_{H=H_C}$ กับลักษณะโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่างๆ

โครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสมซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์ม 3 ชั้น โดยลักษณะโครงสร้างของ 2 ชั้นแรกจะมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างแบบ ECC ซึ่งเกรนแต่ละเกรนแยกออกจากกันในขณะที่ชั้นบนสุดจะถูกปลูกด้วยฟิล์มต่อเนื่องซึ่งคล้ายลักษณะโครงสร้างแบบ CGC ดังรูปที่ 2 ง) พบว่าค่าเคอร์ซีวิตีจะมีค่าลดลงถึง 50% เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่แอนไอโซทรอปีภายใน ในขณะที่ค่าความชันของอัตราส่วนปกติที่ผ่านจุด H_C จึงมีค่าสูงซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสมสามารถพัฒนาศักยภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลได้ในทั้งส่วนของการลดลงของค่าสนามเขียนของหัวเขียนข้อมูลนอกจากนี้ยังสามารถลดความกว้างของการกระจายตัวของสนามเขียนเนื่องจากค่าความชันมีค่าสูงอีกด้วย

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กพื้นฐานที่มีผลต่อการพัฒนาและเพิ่มศักยภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากให้มีค่าความจุมากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้วโดยทำการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบใหม่ด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอมเนื่องจากวิธีการจำลองทางแม่เหล็กในระดับจุลภาคจะให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลในปัจจุบันนี้มีความซับซ้อนและความหนาของชั้นฟิล์มมีการลดลงในระดับนาโนเมตรซึ่งส่งผลให้ผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมในวัสดุแม่เหล็กส่งผลต่อการคำนวณอย่างมากโดยการพิจารณาด้วยวิธีการจำลองทางแม่เหล็กในระดับจุลภาคเป็นการประมาณค่าของอะตอมหลายๆ อะตอมซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมจะให้ผลคำนวณที่คลาดเคลื่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ด้วยวิธีรูปแบบจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอมซึ่งสามารถรวมผลของอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนภายในและระหว่างชั้นฟิล์มได้รวมถึงผลของอุณหภูมิและสนามหักล้างซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการคำนวณสมบัติทางแม่เหล็กของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากอย่างมาก โดยงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากด้วยกัน 4 แบบ ได้แก่ แผ่นบันทึกข้อมูลแบบตั้งฉากแบบเดิมหรือแบบชั้นเดียว (SL) แผ่นบันทึกข้อมูลแบบสารประกอบควมคู่แลกเปลี่ยน (ECC) แผ่นบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องแกรนูลาร์ควมคู่ (CGC) และแผ่นบันทึกข้อมูลแบบผสม (ECC/CGC) เพื่อศึกษาว่าลักษณะโครงสร้างใดสามารถเพิ่มศักยภาพของแผ่นบันทึกข้อมูลได้สูงที่สุด

การคำนวณคุณสมบัติทางแม่เหล็กด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์สปินในระดับอะตอมนั้น พบว่ามีปัจจัยหลายด้านที่จำเป็นต้องควบคุมเพื่อให้ผลการคำนวณทางคอมพิวเตอร์มีค่าเสมือนจริงได้แก่ ผลของปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับเวลา ผลของอุณหภูมิ และ ผลของสนามหักล้าง โดยพบว่าเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการวัดวงปิดฮิสเทอรีซิสหนึ่งรอบสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าเคอร์เออซีวิตีมีค่าลดลงและมีค่าที่เมื่อเวลามีค่ามากกว่า 20×10^{-9} วินาทีนอกจากนี้พบว่าผลของอุณหภูมียังส่งผลต่อสมบัติทางแม่เหล็กเช่นกัน ดังนั้นการควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการคำนวณหาสมบัติทางแม่เหล็กจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดค่าเวลาหนึ่งรอบฮิสเทอรีซิสมีค่า 5×10^{-9} วินาทีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ถูกใช้ในการพิจารณาสมบัติทางแม่เหล็กทางการทดลองและพิจารณาผลของอุณหภูมิห้องที่ 300 เคลวินจากการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กพบว่าโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ ECC จะสามารถลดค่าสนามหมุนกลับได้สูง แต่มีการกระจายตัวของสนามหมุนกลับที่กว้าง โครงสร้างแบบ CGC จะสามารถลดค่าสนามหมุนกลับที่น้อยกว่าแต่การกระจายตัวของสนามหมุนกลับจะแคบ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบ SL ในขณะที่โครงสร้างแบบผสม ECC/CGC หรือโครงสร้างแบบ 3 ชั้น จะสามารถลดค่าสนามหมุนกลับได้สูงรวมถึงการกระจายตัวของสนามที่แคบซึ่งเป็นพื้นฐานของคุณสมบัติที่สำคัญของแผ่นบันทึกข้อมูลจากข้อดีของสมบัติแม่เหล็กนี้จะนำไปสู่โครงสร้างต้นแบบของแผ่นบันทึกข้อมูลแบบใหม่ในอนาคตและสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2560 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

1. Binasch, G., Grunberg, P., Saurenbach, F., and Zinn, W. 1989. Enhanced Magnetoresistance in Layered Magnetic Structures with Antiferromagnetic Interlayer Exchange. *Physical Review B* 39: 4828–4830.
2. Baibich, M.N., Broto, J.M., Fert, A., Van Dau, F.N., Petroff, F., Etienne, P., Creuzet, G., Friederich, A. and Chazelas, J. 1988. Giant Magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr Magnetic Super lattices. *Physical Review Letter* 61: 2472–2475.
3. Williams, M.L., and Comstock, R. L., 1971. An Analytic Model of the Write Process in Digital Magnetic Recording. *AIP Conference Proceedings* 5: 738–742.
4. Richter, H. J. 1999. Recent Advances in the Recording Physics of Thin-Film Media. *Journal of Physics D: Applied Physics* 32(21): R147.
5. Chureemart, J., Chureemart, P., Pressesky, J., Nolan, T., and O’Grady, K. 2013. Media Design and Orientation in Perpendicular Media. *IEEE Transactions on Magnetics* 49(7): 3592-3595.
6. Chureemart, J., Chureemart, P., Evans, R., Chantrell, R.W., and O’Grady, K. 2011. Magnetic Orientation in Advanced Recording Media. *Journal of Physics D: Applied Physics* 44: 455002.
7. Piramanayagam, S.N., Tan, H.K., Ranjbar, M., Wong, S.K., Sbiaa, R., and Chong, T.C. 2011. Magnetic Interaction in Perpendicular Recording Media with Synthetic Nucleation Layers. *Applied Physical Letter* 98: 152504.
8. Chureemart, P., Chureemart, J., and Chantrell, R.W. 2016. Model of Advanced Recording Media: The Angular Dependence of the Coercivity Including the Effect of Exchange Interaction. *Journal of Applied Physics* 119: 063903.
9. Rottmayer, R., Batra, S., Buechel, D., Challener, W., Hohlfield, J., Kubota, Y., Li, L., Lu, B., Mihalcea, C., Mountfield, K., Pelhos, K., Peng, C., Rausch, T., Seigler, M.A., Weller, D., and Yang, X. 2006. Heat-Assisted Magnetic Recording. *IEEE Transactions on Magnetics* 42(10): 2417-2421.
10. Weller, D., Mosendz, O., Parker, G., Pisana, S., and Santos, T.S. 2013. L_{10} FePt_{XY} Media for Heat Assisted Magnetic Recording. *Physica Status Solidi (a)* 210:1245.
11. Richter, H. J. 2007. The Transition from Longitudinal to Perpendicular Recording. *Journal of Physics D: Applied Physics* 40(9): r149.

12. Zhu, J.G., Zhu, X., and Tang, Y. 2008. Microwave Assisted Magnetic Recording. *IEEE Transactions on Magnetics* 44: 125.
13. Victora, R.H., and Shen, X. 2005. Composite Media for Perpendicular Magnetic Recording. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(2): 537.
14. Suess, D., Schrefl, T., Fahler, S., Kirschner, M., Hrkac, G., Dorfbauer, F. and Fidler, J. 2005. Exchange Spring Media for Perpendicular Recording. *Applied Physical Letter* 87(1): 012504.
15. Sonobe, Y., Weller, D., Ikeda, Y., Schabes, M., Takano, K., Zeltzer, G., Yen, B.K., Best, M. E., Greaves, S.J., Muraoka, H., and Nakamura, Y. 2001. Thermal Stability and SNR of Coupled Granular/Continuous Media. *IEEE Transactions on Magnetics* 37(4): 1667-1670.
16. Yasumori, J., Sonobe, Y., Greaves, S.J., and Tham, K.K. 2009. Approach to High-Density Recording Using CGC Structure. *IEEE Transactions on Magnetics* 45: 850-855.
17. Choe, G., Zheng M., Acharya B.R., Abarra E.N., and Zhou J.N. 2005. Perpendicular Recording CoPtCrO Composite Media with Performance Enhancement Capping Layer, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(10): 3172-3174.
18. Nolan, T.P., Valcu, B.F., and Richter, H.J. 2011. Effect of Composite Designs on Writability and Thermal Stability of Perpendicular Recording Media. *IEEE Transactions on Magnetics* 47: 63.
19. Tham, K.K., Saito, S., Hasegawa, D., Itagaki, N., Hinata, S., Ishibashi, S., and Takahashi, M. 2012. Effect of Inhomogeneous Microstructure of Granular Layer on Inter Granular/ Inter Layer Exchange Coupling in Stacked Perpendicular Recording Media. *Journal of Applied Physics* 112(9): 093917.
20. Evans, R.F.L., Fan, W.J., Chureemart, P., Ostler T.A., Ellis, M.O.A., and Chantrell, R.W. 2014. Atomistic Spin Model Simulations of Magnetic Nano Materials. *Journal of Physics: Condensed Matter* 26(10): 103202.
21. Boerner, E. D., Chubykalo-Fesenko, O., Mryasov, O. N., Chantrell, R. W., and Heinonen, O. 2005. Moving Toward an Atomistic Reader Model. *IEEE Transactions on Magnetics* 41(2): 936.
22. Brown, W. F. 1963. Thermal Fluctuations of a Single-Domain Particle. *Physical Review* 130(5): 1677.
23. Sharrock, M. P. 1994. Time Dependence of Switching Fields in Magnetic Recording Media. *Journal of Applied Physics* 76: 6413.

ได้รับบทความวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2560

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 31 พฤษภาคม 2560

