บทความวิจัย

แบบจำลองเสมือนจริงระดับจุลภาคด้วยวิธีการยอร์คสำหรับการคำนวณอุณหภูมิกีดกันของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในหัวอ่านข้อมูล

วาสนา แดงอ่ำ[1] นนทวัฒน์ ทรัพย์กุล[1] พรรณวดี จุรีมาศ[1] และ เจษฎา จุรีมาศ[1*]

ได้รับบทความ: 14 มีนาคม 2563
ได้รับบทความแก้ไข: 7 พฤษภาคม 2563
ยอมรับตีพิมพ์: 30 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาและนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างทางแม่เหล็กระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกเชื่อมติดกับชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเพื่อทำการคำนวณค่าอุณหภูมิกีดกัน โดยแบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสแบบใหม่ด้วยวิธีการยอร์ค เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการทำนายปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและค่าอุณหภูมิกีดกันซึ่งนำไปสู่การศึกษาผลของเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน พลวัตของวัสดุแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะถูกอธิบายด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการ แลนดอว์-ลิฟชิทซ์-กิลเบิร์ต ตามลำดับ สำหรับกระบวนการวัดค่าอุณหภูมิกีดกันจะใช้เทคนิคการวัดด้วยวิธีการยอร์คโดยหาค่าอุณหภูมิการวัดซึ่งสามารถกำจัดผลเชิงความร้อนออกจากระบบเมื่อทำการวัดค่าสนามไบอัสและเคอเออร์ซิวิตี โครงสร้างไบอัสแลกเปลี่ยนของวัสดุอิริเดียมแมงกานีสและวัสดุโคบอลต์ไอรอนจะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นโครงสร้างในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในปัจจุบัน จากผลการศึกษาพบว่าค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนเนื่องจากผลของความร้อนและค่าอุณหภูมิกีดกันที่ได้จากรูปแบบจำลองให้ผลสอดคล้องกับการทดลอง โดยสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิกีดกันของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนอิริเดียมแมงกานีสเชื่อมติดกับวัสดุโคบอลต์ไอรอนที่มีขนาดความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 8 นาโนเมตร และ 4 นาโนเมตร ได้เท่ากับ 414 เคลวิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองที่ถูกนำเสนอนี้สามารถเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการทำนายผลของสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและค่าอุณหภูมิกีดกันและประยุกต์ใช้กับการทดลองได้จริง

คำสำคัญ: ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน วิธีการยอร์ค อุณหภูมิกีดกัน สมการแลนดอว์-ลิฟชิทซ์-กิลเบิร์ต วิธีมอนติคาร์โลเชิงจลน์

[1]หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[*]ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: Jessada.c@msu.ac.th

Realistic Micromagnetic Model by York Protocol for the Calculation of Blocking Temperature of Exchange Bias Layer in Read Element

Wassana Daeng-am[1], Nonthawat Supkul[1], Phanwadee Chureemart[1] and Jessada Chureemart[1*]

Received: 14 March, 2020
Revised: 7 May, 2020
Accepted: 30 May, 2020

ABSTRACT

In this work, we aim to develop and propose a granular micromagnetic model of the exchange bias layer, consisting of coupled antiferromagnetic (AF) and ferromagnetic (FM) layers, which is the main component of read head of hard disk drive. The proposed model is developed following the new procedure of exchange bias measurement called York protocol. It can predict the reproducible value of exchange bias field (H_{EB}) and blocking temperature (T_B) leading to the study of thermal stability of exchange bias system. The dynamics of AF and FM layers is treated by using the kinetic Monte Carlo method and stochastic-Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation respectively due to their different magnetic properties. In order to calculate the blocking temperature of the system, the granular model based York protocol is first used to find the measurement temperature at which the thermal activation is removed from the system during the measurement of exchange bias field and coercivity. The IrMn/CoFe exchange bias layers are investigated in this work which is the current materials in real devices. The results show that the values of H_{EB} and T_B from the model are consistent with the experimental work. The calculation of T_B for IrMn/CoFe exchange bias system with the thickness of 8 and 4 nm respectively is 414 Kelvin giving good agreement with experiment. This shows that the proposed model is a significant tool for predicting the reproducible value of H_{EB} and T_B and it is capable for real experiment.

Keywords: exchange bias phenomenon, York protocol, blocking temperature, Landau-Lifshitz-Gilbert equation, Kinetic Monte Carlo method

[1]Magnetic information storage technology group, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

[*]Corresponding author, email: Jessada.c@msu.ac.th

บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ (hard disk drive) เป็นหน่วยความจำหลักภายในคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกใช้สำหรับการจัดเก็บข้อมูล ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ แผ่นบันทึกข้อมูล (recording media) หัวเขียน (write head) และหัวอ่าน (read head) ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟได้ถูกออกแบบและพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถในการบันทึกข้อมูล การพัฒนาอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในปัจจุบันนั้นจะมุ่งเน้นความสำคัญในการเพิ่มขนาดพื้นที่ความจุข้อมูล (areal density) และลดขนาดของอุปกรณ์ลงตามความต้องการของผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม เมื่ออุปกรณ์มีขนาดเล็กลงจะส่งผลให้เกิดปัญหาด้านเสถียรภาพทางความร้อนภายในส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหัวอ่านข้อมูลที่ทำหน้าที่ในการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล สำหรับโครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปินวาล์ว (spin-valve structure) จะประกอบด้วยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กและเชื่อมติดกับวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (antiferromagnetic material, AF) โดยชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชั้นแรกที่เชื่อมติดกับวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกจะถูกเรียกว่า ชั้นพิน (pinned layer, PL) ซึ่งแมกนิไทเซชันในชั้นดังกล่าวถูกยึดทิศทางโดยอาศัยปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias phenomenon) [1] และถูกใช้เป็นตัวอ้างอิงในการอ่านข้อมูลจากแผ่นบันทึกข้อมูล นอกจากนี้ชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชั้นที่สองจะถูกเรียกว่า ชั้นอิสระ (free layer, FL) เนื่องจากแมกนิไทเซชันในชั้นดังกล่าวนี้สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระตามการเหนี่ยวนำทิศทางของแมกนิไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลเพื่อใช้สำหรับกระบวนการอ่านข้อมูล

ปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นเนื่องจากการนำชั้นวัสดุ FM มาเชื่อมติดกับชั้นวัสดุ AF โดยอาศัยกระบวนการกระตุ้นทางความร้อน (thermal activation process) [2] และการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อทำให้แมกนิไทเซชันที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ AF และชั้นวัสดุ FM เกิดการแลกเปลี่ยนอันตรกิริยาระหว่างกัน เมื่อทำการพิจารณาคุณสมบัติทางแม่เหล็กผ่านการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสพบว่า ลักษณะของลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนจะมีการเคลื่อนที่ออกจากแกนสมมาตรตามแนวแกนสนามแม่เหล็กภายนอก โดยระยะการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสที่แสดงถึงการเกิดปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนจะถูกเรียกว่า ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias, H_{EB}) ซึ่งนิยามจากจุดที่สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าเป็นศูนย์ ($H = 0$) ถึงจุดกึ่งกลางของลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสที่เคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตร จากการศึกษาโดยทั่วไปพบว่าค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนจะมีค่าแปรผกผันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีส (measurement temperature, T_{MS}) [1,2] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ T_{MS} จะส่งผลทำให้ลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสเคลื่อนที่กลับเข้าหาแกนสมมาตร โดยค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้ค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนมีค่าเป็นศูนย์จะถูกเรียกว่า ค่าอุณหภูมิกีดกัน (blocking temperature, T_B) กล่าวคือ H_{EB} ($T_{MS} = T_B$) = 0 [3] โดยทั่วไปแล้วค่าอุณหภูมิกีดกันดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) [4] ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลนั้นเอง

การวัดผลของอุณหภูมิกีดกันด้วยวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (conventional measurement procedure) [2] สามารถทำได้โดยการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสและคำนวณค่า H_{EB} ที่แต่ละอุณหภูมิ T_{MS} เพื่อพิจารณาหาค่าอุณหภูมิที่ทำให้ค่า $H_{EB} = 0$ อย่างไรก็ตาม การวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการพิจารณาหาค่า T_B เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่รบกวนระบบในขณะที่ทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสทำให้ไม่สามารถทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสและค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยนซ้ำเดิมได้ (non-reproducible exchange bias) จากข้อจำกัดดังกล่าว L.E. Fernandez-Outon และคณะ [5] จึงได้นำเสนอเทคนิคในการวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสรูปแบบใหม่ที่สามารถกำจัดผลของอุณหภูมิที่รบกวนระบบขณะทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีส (thermal free measurement) ซึ่งถูกเรียกว่า วิธีการยอร์ค (York protocol) ซึ่งช่วยให้สามารถวัดลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีส ค่า H_{EB} และ T_B ได้เท่าเดิมทุกครั้งที่ทำการวัดซ้ำ (reproducible exchange bias) แม้ว่าจะทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสจำนวนหลายครั้ง การทราบถึงค่าจริงของปริมาณ H_{EB} และ T_B โดยอาศัยวิธีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสด้วยวิธีการยอร์คจะช่วยให้สามารถทำนายคุณสมบัติทางแม่เหล็กพื้นฐานของวัสดุแม่เหล็กได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของความสามารถในการทนต่อความร้อนหรือเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจริงได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาในเชิงการทดลองในการวัดค่าอุณหภูมิกีดกันพบว่าจะต้องใช้ต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูงและใช้ระยะเวลาในการสร้างตัวอย่างชิ้นงานที่ค่อนข้างยาวนาน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเสนอวิธีการจำลองเชิงตัวเลข (numerical simulation) โดยใช้แบบจำลองทางทฤษฎีอย่างง่าย (simple theoretical model) ที่มีลักษณะเป็นแบบจำลองระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์ (granular micromagnetic model) [3,6] ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตามวิธีการยอร์คเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสและทำนายปริมาณ H_{EB} และ T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนเพื่อเป็นแนวทางในการทดลองซึ่งช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในการผลิตตัวอย่างชิ้นงานเพื่อใช้ในการศึกษา

แม้ว่าแบบจำลองในระดับจุลภาคอย่างง่ายสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกนำเสนอขึ้นจะสามารถทำนายปริมาณ H_{EB} และ T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้สอดคล้องกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดในการพิจารณาผลของอันตรกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็กที่สำคัญซึ่งเกิดขึ้นในระบบวัสดุแม่เหล็กจริง ได้แก่ ค่าสนามแม่เหล็กคู่ขั้วภายในชั้น FM และค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็กภายในชั้น FM เป็นต้น นอกจากนี้ ยังพบว่าแบบจำลองดังกล่าวขาดความเสมือนจริงในการคำนวณ เนื่องจากละเลยผลการพิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชัน (setting process) [7] ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญสำหรับการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสด้วยวีธีการยอร์ค ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้ทำการพัฒนาและนำเสนอแบบจำลองแกรนูลาร์เสมือนจริงที่รวมผลของค่าอันตรกิริยาทางแม่เหล็กเพื่อใช้สำหรับการจำลองขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนให้มีความสอดคล้องตามวิธีการยอร์คอย่างถูกต้องและครบถ้วนโดยการพิจารณากระบวนการกำหนดทิศทางของแมกนีไทเซชันร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายปริมาณ H_{EB} และ T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่มีความถูกต้องได้ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสฟ์ไดร์ฟ โดยในปัจจุบันพบว่าอุณหภูมิความร้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในขณะที่มีการทำงานนั้นจะมีค่า

ประมาณ 400 เคลวิน [2] ดังนั้นค่า T_B ของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งสามารถแปรผันได้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของเกรนแม่เหล็ก AF [2,4,5] ควรมีค่าสูงกว่า 400 เคลวิน เพื่อให้หัวอ่านข้อมูลสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองแกรนูลาร์ในระดับจุลภาคเสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตามวิธีการยอร์คเพื่อใช้สำหรับการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสทำนายปริมาณ H_{EB} และ T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูล โครงสร้างของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF และชั้นวัสดุ FM ซึ่งจะประกอบไปด้วยเกรนแม่เหล็กจำนวนมากจะถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างโวโรนอย (Voronoi construction) ซึ่งช่วยให้สามารถกำหนดตัวแปรควบคุม (input parameters) ของการจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเสมือนจริงได้ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้อาศัยเทคนิควิธีการที่แตกต่างกันสำหรับการอธิบายคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่มีความแตกต่างกันของวัสดุแต่ละประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะเวลา (timescale) ที่แมกนีไทเซชันภายในวัสดุแต่ละประเภทใช้สำหรับกระบวนการกลับทิศทาง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เทคนิคมอนติคาร์โลเชิงจลน์ (kinetic Monte Carlo) สำหรับการพิจารณาลักษณะการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF ในระยะยาว และเลือกใช้สมการแลนดอว์–ลิฟต์ชิต–กิลเบิร์ต (Landau–Lifshitz–Gilbert equation) หรือสมการ LLG สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น FM การประยุกต์ใช้เทคนิคการคำนวณทั้งสองรูปแบบร่วมกันจะนำไปสู่การศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนผ่านการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีส (hysteresis loop) ในลำดับสุดท้ายจะได้ทำการคำนวณค่า H_{EB} จากลักษณะการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสออกจากแกนสมมาตรในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิใดๆ ที่ต้องการศึกษาหรืออุณหภูมิการกระตุ้น (activation temperature, T_{ACT}) เพื่อนำไปใช้สำหรับการพิจารณาหาค่า T_B ตามลำดับ การคำนวณของแบบจำลองแกรนูลาร์ในระดับจุลภาคเสมือนจริงสำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตามวิธีการยอร์คมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

แบบจำลองแกรนูลาร์สำหรับชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน

การศึกษาพฤติกรรมการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF โดยอาศัยเทคนิคมอนติคาร์โลเชิงจลน์จะเริ่มจากการคำนวณค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (energy barrier of AF grain, E_{AF}) ที่ใช้เพื่อป้องกันการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็ก AF แต่ละเกรนจะถูกอธิบายอยู่ในรูปของค่าพลังงานอิสระตามรูปแบบสมการพลังงานของสโตนเนอร์–โวฮ์ลฟาธ (Stoner–Wolhfarth energy equation) [8] ซึ่งเป็นผลรวมของค่าพลังงานแอนไอโซโทรปีของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (AF anisotropy energy) ที่แมกนีไทเซชันใช้สำหรับการรักษาทิศทางให้อยู่ในทิศแกนง่าย (easy axis, **e**) และค่าพลังงานสนามแม่เหล็กระหว่างชั้นวัสดุ (exchange interlayer energy) ที่แมกนีไทเซชันภายในเกรนเฟอร์โรแมกเนติกออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในเกรนแอนติเฟอร์โรแมกเนติก ดังสมการ

$$E_{AF} = -adK_{AF}(\mathbf{e}\cdot\mathbf{m}_{AF})-J_S ac\mathbf{m}_{FM}\cdot\mathbf{m}_{AF} \quad (1)$$

เมื่อ a คือพื้นที่หน้าตัดของเกรนแม่เหล็ก

d คือความหนาของชั้นฟิล์มแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

K_{AF} คือค่าคงที่แอนไอโซโทรปีของชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก

J_S คือค่าคงที่การแลกเปลี่ยนบริเวณพื้นผิววัสดุ (interfacial exchange constant)

c คือค่าแฟคเตอร์ที่ใช้แสดงถึงการเชื่อมติดกันของเกรนแม่เหล็กแต่ละเกรนระหว่างชั้นวัสดุ (contact fraction)

m_{FM} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ใช้แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น FM

m_{AF} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ใช้แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้น AF

ในการพิจารณากระบวนการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อพลังงานความร้อนของระบบมีค่าสูงกว่าค่าพลังงานกีดกันในช่วงระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชัน (relaxation time, τ) ตามกฎของอาร์เรห์นเนียส-นีลส์ (Arrhenius-Néel law) [9] ดังสมการ

$$\tau^{-1} = f_0 \exp\left[-\frac{E_{AF}}{k_B T}\right] \quad (2)$$

เมื่อ f_0 คือค่าคงที่การสั่น (frequency factor) k_B คือค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann's constant) และ T คืออุณหภูมิของระบบ โดยค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กต่ำที่สุดที่เกรนแม่เหล็ก AF ใช้สำหรับการป้องกันการกลับทิศทางเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนหรือปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนติกภายในระยะเวลาการคลายตัวเท่ากับ 100 s ด้วยค่าคงที่ในการสั่น $f_0 = 10^9$ Hz [10] จะต้องมีค่าเท่ากับ $E_{AF} = 25k_BT$

สำหรับการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่ทิศแกนง่ายของแมกนีไทเซชันในชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก **e** กระทำมุมใดๆ กับทิศทางของสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก $\mathbf{H}_T^{AF}$ กล่าวคือ $\theta_H \neq 0$ พบว่าจะไม่สามารถทำการคำนวณปริมาณพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็กในชั้น AF ได้โดยตรงเนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการประมาณเชิงตัวเลข [11] สำหรับการพิจารณาค่าพลังงานกีดทางแม่เหล็กของเกรนแม่เหล็ก AF ที่เป็นฟังก์ชันของค่าสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก $\mathbf{H}_T^{AF}$ และมุม θ_H แสดงดังสมการ

$$E_{AF}(\mathbf{H}_T^{AF}, \theta_H) = KV\left[1 - \frac{|\mathbf{H}_T^{AF}|}{g(\theta_H)}\right]^{\kappa(\theta_H)} \quad (3)$$

เมื่อ $g(\theta_H) = [\cos^{2/3}\theta_H + \sin^{2/3}\theta_H]^{-3/2}$ และ $\kappa(\theta_H) = 0.86 + 1.14g(\theta_H)$ เป็นรูปแบบการคำนวณเชิงตัวเลขที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กในกรณีที่ $\theta_H \neq 0$ [12] สำหรับค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กที่สามารถคำนวณได้จากสมการ (3) จะถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันที่แต่ละสถานะพลังงานแสดงดังสมการ

$$\tau^{-1}(\mathbf{H}_T^{AF}, \theta_H) = f_0 \exp\left[\frac{-E_{AF}(\mathbf{H}_T^{AF}, \theta_H)}{k_B T}\right] \quad (4)$$

เมื่อ $E_{AF}(\mathbf{H}_T^{AF}, \theta_H)$ คือ ค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กรวมที่ต้องใช้สำหรับการกลับทิศทางของแมกนีไทเซชัน และ θ_H คือมุมระหว่างทิศแกนง่าย **e** และทิศทางของสนามแม่เหล็กรวมที่กระทำต่อชั้นแอนติเฟอร์โรแมกเนติก $\mathbf{H}_T^{AF}$ ภายหลังจากนั้นผลรวมของระยะเวลาการคลายตัวของแมกนีไทเซชันของระบบที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะที่มีพลังงานต่ำที่สุดสองสถานะ กล่าวคือ $\tau^{-1} = \tau_{12}^{-1} + \tau_{21}^{-1}$ จะถูกคำนวณเพื่อที่จะได้นำไปใช้สำหรับการพิจารณาโอกาสในการผันกลับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF ดังสมการ

$$P_t = (1 - e^{-t_m/\tau}) \tag{5}$$

เมื่อ t_m คือระยะเวลาที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10^{-8} s [12] จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าโอกาสในการเปลี่ยนสถานะ P_t กับตัวเลขสุ่ม x ที่ถูกกำหนดให้มีค่าระหว่าง $0 < x < 1$ ถ้าค่าโอกาสการเปลี่ยนสถานะมีค่ามากกว่าตัวเลขสุ่ม $P_t > x$ แมกนีไทเซชันจะสามารถกลับทิศทางได้ แต่ถ้า $P_t < x$ แมกนีไทเซชันในระบบจะไม่สามารถผันกลับทิศทางได้ ซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำการพิจารณาค่าพลังงานกีดกันทางแม่เหล็กของแมกนีไทเซชันอีกครั้งจนกว่าจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดและวิธีการคำนวณในลักษณะนี้จะดำเนินไปจนกว่าเกรนแม่เหล็ก AF ทุกเกรนภายในระบบสามารถผันกลับทิศทางได้อย่างสมบูรณ์ โดยผลรวมของแมกนีไทเซชันภายในชั้น AF จะมีค่าเท่ากับผลเฉลี่ยของแมกนีไทเซชันของเกรนแม่เหล็ก AF ทุกเกรนภายในระบบ

สำหรับการคำนวณพลวัตของแมกนีไทเซชันในชั้น FM สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้สมการ LLG ซึ่งเป็นสมการที่ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันที่เวลาใดๆ เนื่องจากแรงบิดหรือทอร์กที่สนามแม่เหล็กประสิทธิผลกระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็ก FM ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวนเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผลแสดงดังรูปที่ 2 สมการ LLG มีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial t} = -\frac{\gamma}{(1+\alpha^2)}\mathbf{M}_i \times \mathbf{H}_{eff}^i - \frac{\gamma\alpha}{(1+\alpha^2)}[\mathbf{M}_i \times (\mathbf{M}_i \times \mathbf{H}_{eff}^i)] \tag{6}$$

เมื่อ $\mathbf{M}_i$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันในชั้น FM ที่พิจารณา

γ คือค่าสัมบูรณ์อัตราส่วนไจโรแมกเนติก (absolute gyromagnetic ratio)

α คือค่าคงที่ของการหน่วง (damping constant)

$\mathbf{H}_{eff}^i$ คือสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำต่อแมกนีไทเซชันภายในเกรนแม่เหล็ก FM ที่ถูกพิจารณา

(ก) (ข)

รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของแมกนีไทเซชันแบบหมุนวนเข้าสู่สนามแม่เหล็กประสิทธิผล (ก) ภาพด้านข้างและ (ข) ภาพด้านบน

สนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่เกิดขึ้นภายในระบบเป็นผลรวมของค่าสนามแอนไอโซโทรปี (anisotropy field, $\mathbf{H}^{i}_{anis}$) ค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างเกรนแม่เหล็ก (exchange field between grains, $\mathbf{H}^{ij}_{exch}$) ค่าสนามแม่เหล็กภายนอก (applied magnetic field, $\mathbf{H}_{app}$) และค่าสนามความร้อน (thermal field, $\mathbf{H}^{i}_{th}$) นอกจากนี้การพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กรวมในชั้น FM ที่เชื่อมติดกับชั้น AF จำเป็นจะต้องคิดผลของค่าสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุที่แมกนีไทเซชันในชั้น AF ออกแรงกระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้น FM (exchange interlayer field on FM layer, $\mathbf{H}^{FM-AF}_{exch}$) ร่วมด้วยเพื่อให้สามารถคำนวณผลของปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนได้โดยรายละเอียดการคำนวณปริมาณาสนามแม่เหล็กแต่ละประเภทถูกอธิบายไว้ในอ้างอิง [12] ดังนั้นจึงสามารถเขียนค่าสนามแม่เหล็กประสิทธิผลที่กระทำกับชั้น FM ที่เชื่อมติดกับชั้น AF ได้ดังนี้

$$\mathbf{H}^{i}_{eff} = \mathbf{H}^{i}_{anis} + \mathbf{H}^{ij}_{exch} + \mathbf{H}^{i}_{app} + \mathbf{H}^{i}_{th} + \mathbf{H}^{i,FM-AF}_{exch} \tag{7}$$

การคำนวณพลวัตของแมกนิไทเซชันในชั้น AF และชั้น FM ด้วยวีธีการมอนติคาร์โลและสมการ LLG ทำให้สามารถคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนได้ สำหรับการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนตามวิธีการยอร์คสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง (non-activation temperature, T_{NA}) และขั้นตอนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิการกระตุ้น (activation temperature, T_{ACT}) [2] ที่ต้องการพิจารณาซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณปริมาณ H_{EB} และ T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน สำหรับขั้นตอนการพิจารณาหาค่า T_{NA} สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ให้ความร้อนต่อชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยอุณหภูมิการกำหนดทิศทาง (setting temperature, T_{SET}) ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H เป็นเวลา 90 นาที

2. ลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T ใดๆ ในขณะที่มีการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H

3. เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับ T จึงทำการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 1 นาที และเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสลูปที่หนึ่ง

4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-2 แล้วจึงทำการให้สนามแม่เหล็กในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 30 นาที และเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสลูปที่สอง

5. หากลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสลูปที่หนึ่งและลูปที่สองยังไม่เกิดการซ้อนทับกันให้ทำการวัดลูปวงปิดอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิ T ใดๆ ที่มีค่าลดต่ำลงและทำซ้ำกระบวนการเดิม (trial and error) จนกระทั่งลูปวงปิดทั้งสองเกิดการซ้อนทับกัน

เมื่อใดก็ตามที่ลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสลูปที่หนึ่งและลูปที่สองซ้อนทับกันจะสามารถพิจารณาได้ว่าอุณหภูมิที่ทำให้ลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสทั้งสองซ้อนทับกันเป็นอุณหภูมิ $T = T_{NA}$ ที่ไม่มีผลกระทบของความร้อนภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยอุณหภูมิ T_{NA} ดังกล่าวนี้จะถูกใช้สำหรับการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสในลำดับถัดไป สำหรับรายละเอียดการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน ณ อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา สามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

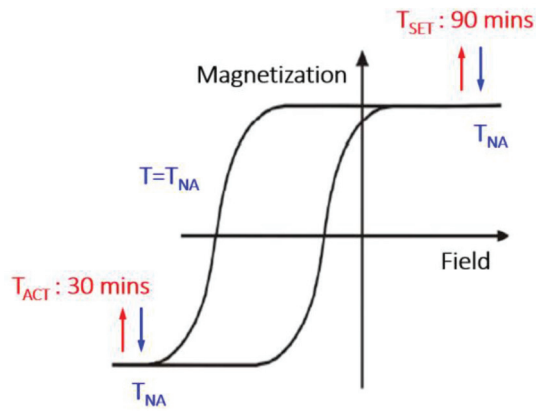
1. ให้ความร้อนต่อชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยอุณหภูมิ T_{SET} ในขณะที่มีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H เป็นเวลา 90 นาที

2. ลดอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิ T_{NA} ที่พิจารณาได้ก่อนหน้านี้

3. ป้อนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางลบ -H เป็นเวลา 1 นาที และเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสลูป

4. เพิ่มอุณหภูมิที่ต้องการพิจารณาซึ่งถูกเรียกว่า อุณหภูมิที่มีการกระตุ้น T_{ACT} เป็นระยะเวลา 30 นาที

5. ลดอุณหภูมิของระบบให้กลับเข้าสู่ T_{NA} อีกครั้งและเริ่มทำการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสที่ไม่มีผลการกระตุ้นทางความร้อนอีกครั้งจนเกิดเป็นลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนด้วยวิธีการยอร์ค [2]

การวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสตามวิธีการยอร์คพบว่าแมกนีไทเซชันในชั้น AF จะไม่ได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อน (AF free of thermal activation) ดังนั้นจึงทำให้สามารถพิจารณาค่า H_{EB} ที่แน่นอนของระบบโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นได้ แม้ว่าจะมีการวัดลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสซ้ำอีกหลายครั้ง เมื่อสามารถคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ตามวิธีการยอร์คได้จะทำให้สามารถคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} จากลักษณะการเคลื่อนที่ของลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสออกจากแกนสมมาตรในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} และนำไปสู่การพิจารณาหาค่าอุณหภูมิกีดกัน T_B ได้ ตามลำดับ โดยผลการศึกษาจะถูกอธิบายถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

ผลการทดลอง

การศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนและเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนในงานวิจัยนี้ได้อาศัยรูปแบบจำลองระดับจุลภาคเสมือนจริงตามวิธีการยอร์คที่ถูกพัฒนาขึ้น การประยุกต์ใช้แบบจำลองระดับจุลภาคเสมือนจริงตามวิธีการยอร์คเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยนภายในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลจะเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้นวัสดุ AF และชั้นวัสดุ FM เชื่อมติดกันโดยอาศัยโปรแกรมจำลองโครงสร้างโวโรนอย ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของชั้นวัสดุ AF และชั้นวัสดุ FM

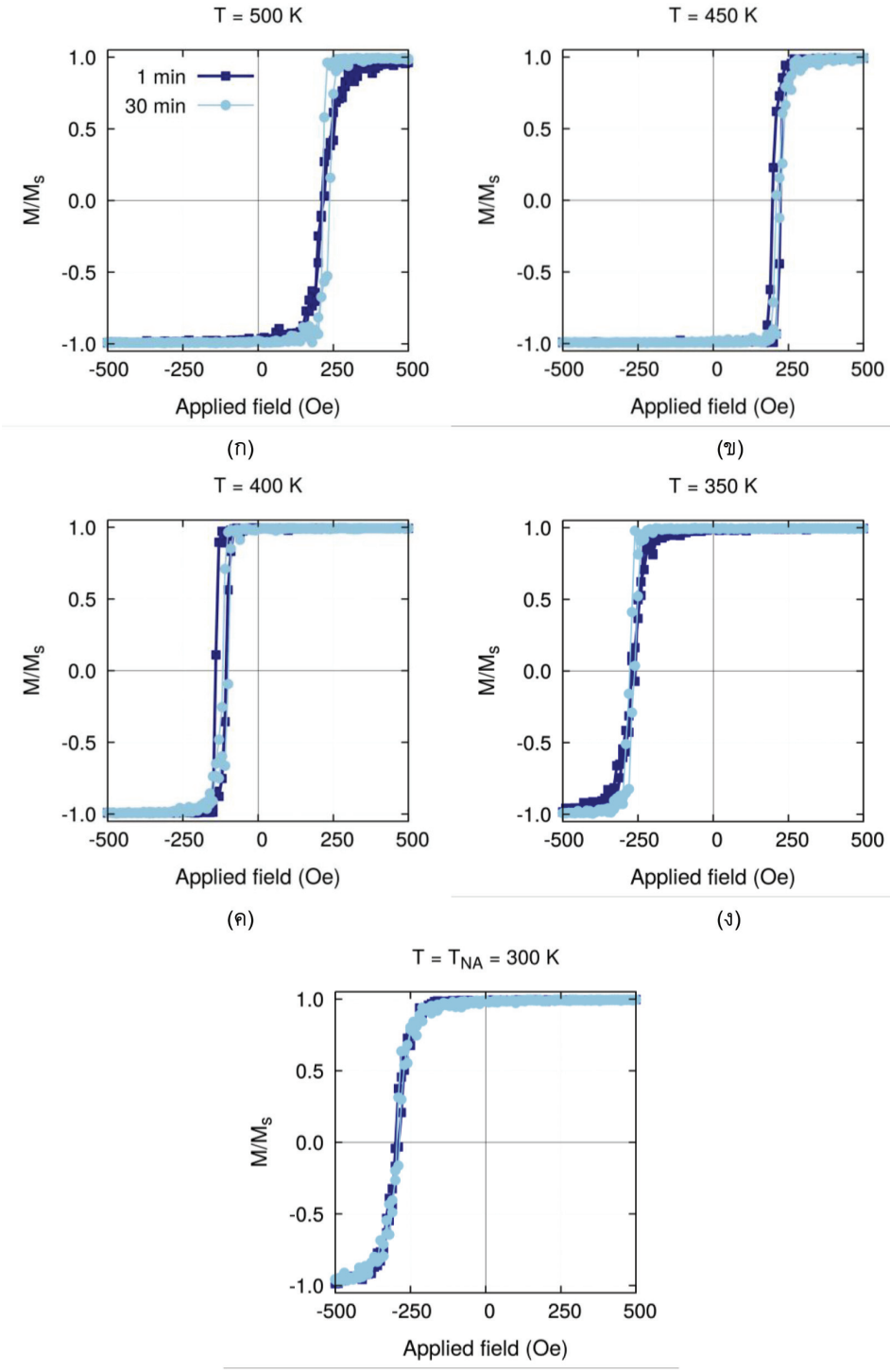
พารามิเตอร์	ชนิดของวัสดุ	
	AF	**FM**
ความกว้างของระบบในแนวแกน x (nm)	250	250
ความยาวของระบบในแนวแกน y (nm)	250	250
ค่ากลางของขนาดของเกรนแม่เหล็ก D_m (nm)	8	8
ค่าการกระจายตัวของขนาดของเกรน σ_{lnd}	0.2 [13]	0.2 [13]
ระยะห่างระหว่างเกรนแม่เหล็ก (nm)	0.1	0.1
ความหนาของชั้นฟิล์ม t_{film} (nm)	8	4

ในการศึกษานี้จะได้เลือกใช้วัสดุอิริเดียมแมงกานีส (Iridium Manganese, IrMn) และวัสดุโคบอลต์ไอรอน (Cobalt Iron, CoFe) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุ AF และวัสดุ FM ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุทั้งสองประเภทถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเป็นชั้นอ้างอิงภายในหัวอ่านข้อมูลสำหรับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในปัจจุบัน [2] โดยค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กพื้นฐานของวัสดุ IrMn และวัสดุ CoFe ได้แก่ ค่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature, T_C) ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization, M_S) และค่าคงที่แอนไอโซโทรปี (anisotropy constant, K_U) รวมไปถึงปริมาณความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ (exchange interlayer field strength, H_{ex}^{int} เป็นต้น ถูกสรุปไว้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กของชั้นวัสดุ IrMn และชั้นวัสดุ CoFe

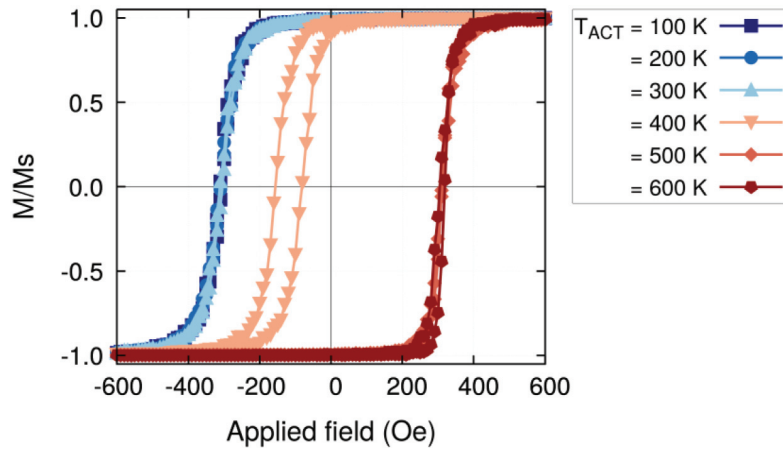
พารามิเตอร์	ชนิดของวัสดุ	
	IrMn	**CoFe**
ค่าอุณหภูมิวิกฤติ T_C (K)	690 [14]	1300 [14]
ค่าคงที่แอนไอโซโทรปี K_U (erg/cc)	5.56×10^6 [15]	1.8×10^5 [12]
ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว M_S (emu/cc)	1800 [12]	1800 [12]
ความแรงสนามแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นวัสดุ H_{ex}^{int} (Oe)	500	500

ภายหลังจากที่สามารถจำลองโครงสร้างชั้นวัสดุ IrMn และชั้นวัสดุ CoFe ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ได้ จากนั้นจะทำการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิที่ไม่มีผลกระทบทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง T_{NA} โดยทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ณ อุณหภูมิ T ใดๆ ตามขั้นตอนการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิที่ไม่มีผลทางความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อวิธีการทดลอง รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิ T_{NA} จากการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่อุณหภูมิ T ใดๆ ตั้งแต่ T = 500 เคลวิน ซึ่งกำหนดให้มีค่าลดลงครั้งละ 50 เคลวิน จนถึง 300 เคลวิน แสดงดังรูปที่ 4 (ก)–(จ) ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกันด้วยเวลาการให้สนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทาง –H เท่ากับ 1 นาที และ 30 นาที เมื่อพิจารณาลักษณะของลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่อุณหภูมิ T= 500 เคลวิน ในรูปที่ 4(ก) พบว่าลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสจะมีการเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรไปตามแกนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก +H และจะเห็นได้ว่าลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสลูปที่หนึ่งและลูปที่สองยังไม่เกิดการซ้อนทับกัน จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิของระบบลงครั้งละ 50 เคลวิน พบว่าลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสจะมีการเคลื่อนที่กลับเข้าสู่แนวแกนสมมาตรและเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรไปตามแกนสนามแม่เหล็กภายนอกในทิศทางบวก –H ตามการลดลงของอุณหภูมิ T โดยพบว่าอุณหภูมิในการคำนวณที่ทำให้ลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสทั้งสองลูปเกิดการซ้อนทับกัน กล่าวคือ ลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสที่สามารถคำนวณได้ทั้งสองลูปมีปริมาณสนามเคอเออร์ซิวิตีในทางด้านซ้ายและทางด้านขวาเท่ากัน มีค่าเท่ากับ T = 300 เคลวิน แสดงดังรูปที่ 4(จ) ดังนั้นในขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่แต่ละค่าอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} สำหรับกรณีศึกษานี้จะได้กำหนดค่าอุณหภูมิในการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสให้มีค่าเท่ากับ T_{NA} = 300 เคลวิน เพื่อให้สามารถกำจัดผลกระทบจากการกระตุ้นทางความร้อนต่อแมกนีไทเซชันในชั้น AF และคำนวณปริมาณ H_{EB} และ T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ได้



รูปที่ 4 ตัวอย่างการพิจารณาหาค่าอุณหภูมิ T_{NA} จากการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่อุณหภูมิใดๆ (ก) T = 500 เคลวิน (ข) T = 450 เคลวิน (ค) T = 400 เคลวิน (ง) T = 350 เคลวิน และ (จ) T = 300 เคลวิน ตามลำดับ

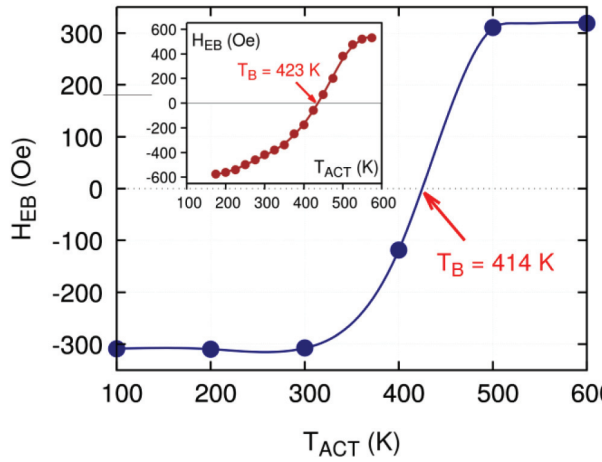
เมื่อสามารถพิจารณาค่าอุณหภูมิ T_{NA} ได้เท่ากับ 300 เคลวิน ในลำดับต่อไปจึงทำการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสที่ค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ใดๆ เพื่อนำไปใช้สำหรับการคำนวณค่าสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ซึ่งจะนำไปสู่การพิจารณาหาค่ากลางของอุณหภูมิกีดกัน T_B ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่มีความถูกต้องได้ รูปที่ 5 แสดงผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสของชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ตั้งแต่ 100 เคลวิน ถึง 600 เคลวิน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 100 เคลวิน โดยจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าเท่ากับ 100 เคลวิน ลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสจะเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรไปในทิศทาง –H และเมื่อค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าลูปวงฮิสเทอร์รีซีสจะมีแนวโน้มการเคลื่อนที่กลับเข้าสู่แกนสมมาตรและเคลื่อนที่ออกจากแนวแกนสมมาตรไปในทิศทาง +H สาเหตุเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิการกระตุ้น T_{ACT} ส่งผลทำให้แมกนีไทเซชันในชั้น IrMn เกิดการกลับทิศทางไปในทิศตรงกันข้ามกับทิศทางเริ่มต้น



รูปที่ 5 ตัวอย่างการคำนวณลูปวงปิดฮีสเทอร์รีซีสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ตั้งแต่ 100 เคลวิน ถึง 600 เคลวิน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 100 เคลวิน

ผลการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีสที่ค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 นำไปสู่การพิจารณาหาปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยนที่แต่ละค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ทำให้สามารถพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ในลักษณะฟังก์ชันของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ได้ดังแสดงในรูปที่ 6 จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าในกรณีที่อุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าต่ำ ปริมาณ H_{EB} จะมีค่าติดลบและมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นค่าบวกเมื่ออุณหภูมิ T_{ACT} มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกที่ได้รับการกระตุ้นด้วยค่าอุณหภูมิ T_{ACT} มีแนวโน้วการเปลี่ยนแปลงทิศทางตามสนามแม่เหล็กภายนอก สำหรับค่าอุณหภูมิกีดกัน T_B ของระบบจะสามารถพิจารณาได้จากจุดตัดแกน x หรือค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ที่ส่งผลทำให้ปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยน H_{EB} ของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ $H_{EB} = 0$ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ที่มีค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างและค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 1 และ

ตารางที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งถูกใช้สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าอุณหภูมิกีดกัน T_B เท่ากับ 414 เคลวิน ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองวัดค่าอุณหภูมิกีดกัน T_B ในโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน NiFe(30nm)/Ru(1nm)/IrMn(6nm)/CoFe(5nm)/Ta(3nm) ด้วยวิธีการยอร์คโดย G. Vallejo-Fernandez และคณะ [14, 15] ดังแสดงในรูปด้านใน (inset) ของรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าสามารถวัดค่าอุณหภูมิกีดกัน T_B เท่ากับ 423 เคลวิน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนที่ถูกออกแบบตามเงื่อนไขที่กำหนดในงานวิจัยนี้จะคงมีเสถียรภาพทางความร้อนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริงในโครงสร้างหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟอย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าต่ำกว่า 414 เคลวิน ซึ่งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการทำงานของหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟในช่วงประมาณ 300–400 เคลวิน [16] อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่ามากกว่า 414 เคลวิน จะส่งผลทำให้โครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe ดังกล่าวขาดเสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากแมกนีไทเซชันของชั้นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกไม่สามารถยึดทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกไว้ได้



รูปที่ 6 ปริมาณ H_{EB} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} ตั้งแต่ 100 เคลวิน ถึง 600 เคลวิน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 100 เคลวิน และรูปด้านในแสดงปริมาณ H_{EB} เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ T_{ACT} จากผลการทดลอง [14-15]

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาและนำเสนอแบบจำลองโครงสร้างทางแม่เหล็กระดับจุลภาคแบบแกรนูลาร์เสมือนจริงของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญภายในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ แบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นได้รับการพัฒนาให้สามารถจำลองขั้นตอนการคำนวณลูปวงปิดฮิสเทอร์รีซีส ตามวิธีการยอร์คเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการทำนายปริมาณ H_{EB} และ T_B ซึ่งนำไปสู่การพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยน IrMn/CoFe โดยพลวัตของแมกนีไทเซชันภายในชั้น IrMn ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุแอนติเฟอร์โรแมกเนติกและชั้น CoFe ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกถูกอธิบายด้วยวิธีการมอนติคาร์โลเชิงจลน์และสมการแลนดอว์-ลิฟชิทซ์-กิลเบิร์ต ตามลำดับ จากผล

การศึกษาในเบื้องต้นพบว่าแบบจำลองที่ถูกนำเสนอขึ้นสามารถคำนวณปริมาณสนามไบอัสแลกเปลี่ยนและค่าอุณหภูมิกีดกันจากรูปแบบจำลองได้สอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างชั้นไบอัสแลกเปลี่ยนอิริเดียมแมงกานีสเชื่อมติดกับวัสดุโคบอลต์ไอรอนที่มีขนาดความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 8 นาโนเมตรและ 4 นาโนเมตร ถูกพบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าต่ำกว่า 414 เคลวิน ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิกีดกันของระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. Meiklejohn, W. H., & Bean, C. P. (1956). New magnetic anisotropy. *Physics Review, 102*(3), 1413-1414.
2. O'grady, K., Fernandez-Outon, L. E., & Vallejo-Fernandez, G. (2010). A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322*(8), 883-899.
3. Craig, B., Lamberton, R., Johnston, A., Nowak, U., Chantrell, R. W., & O'Grady, K. (2008). A model of the temperature dependence of exchange bias in coupled ferromagneticantiferromagnetic bilayers. *Journal of Applied Physics, 103*(7), 07C102.
4. Vallejo-Fernandez, G., & Chapman, J. N. (2010). Thermal stability of exchange bias nanostructures. *Journal of Applied Physics, 107*(9), 09D704.
5. Fernandez-Outon, L. E., O'Grady, K., & Carey, M. J. (2004). Thermal phenomena in IrMn exchange biased systems. *Journal of Applied Physics, 95*(11), 6852-6854.
6. Vallejo-Fernandez, G., & Chapmam, J. N. (2009). Size effects in submicron exchange bias square elements. *Applied Physics Letter, 94*(26), 262508.
7. Carpenter, R., Vick, A. J., Hirohata, A., Vallejo-Fernandez, G., & ÕGrady, K. (2014). Effect of grain cutting in exchange biased nanostructures. *Journal of Applied Physics, 115*(17), 17B905.
8. Tannous, C., & Gieraltowski, J. (2008). The Stoner-Wohlfarth model of ferromagnetism. *European Journal of Physics, 29*(3), 475-487.
9. Pfeiffer, H. (1990). Determination of anisotropy field distribution in particles assemblies taking into account thermal fluctuations. *Physica Status Solidi, 118*(1), 295-306.
10. El-Hilo, M., O'Grady, K., Chantrell, R. W., & Dickson, D. P. E. (1993). Time dependent magnetisation in systems with distributed energy barriers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 123*(1-2), 30-34.
11. Chantrell, R. W., Walmsley, N., Gore, J., & Maylin, M. (2001). Calculations of the susceptibility of interacting superparamagnetic particles. *Physics Review B: Condensed Matter Mater Physics, 63*(2). 1-14.

12. Daeng-am, W., Chureemart, P., Rittidech, A., Atkinson, L. J., Chantrell, R. W., & Chureemart, J. (2019). Micromagnetic model of exchange bias: effects of structure and AF easy axis dispersion for IrMn/CoFe bilayers. *Journal of Physics D: Applied Physics, 53*(4), 045002.
13. Aley, N. P., Vallejo-Fernandez, G., Kroeger, R., Lafferty, B., Agnew, J., Lu, Y., & O'Grady, K. (2008). Texture effects in IrMn/CoFe exchange bias systems. *IEEE Transactions on Magnetics, 44*(11), 2820-2823.
14. Vallejo-Fernandez, G., Fernandez-Outon, L. E., & O'Grady, K. (2008). Antiferromagnetic grain volume effects in metallic polycrystalline exchange bias systems. *Journal of Physics D: Applied Physics, 41*(11), 112001-115507.
15. Vallejo-Fernandez, G., Deakin, T., O'Grady, K., Oh, S., Leng, Q., & Pakala, M. (2010). Measurement of the antiferromagnet activity in exchange bias systems. *Journal of Applied Physics, 107*(9), 09D709.
16. Milyaev, M. A., Naumova, L. I., Proglyado, V. V., Chernyshova, T. A., Blagodatkov, D. V., Kamenskii, I. Y., & Ustinov, V. V. (2015). Thermal stability of spin valves based on a synthetic antiferromagnet and $Fe_{50}Mn_{50}$ alloy. *The Physics of Metals and Metallography, 116*(11), 1073-1079.