

บทความวิจัย

การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ ในโครงสร้างสปีนวาล์ว

นายยา แสนภูมิ งามญา จุริมาศ และพรรณวดี จุริมาศ*

ได้รับบทความ: 20 มิถุนายน 2561

ได้รับบทความแก้ไข: 17 สิงหาคม 2561

ยอมรับตีพิมพ์: 17 สิงหาคม 2561

บทคัดย่อ

ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและอัตราส่วนค่าต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ในโครงสร้างสปีนวาล์วสามารถพิจารณาได้จากพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนโดยมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีนและกระแสสปีน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนของวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ นิกเกิลไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์และโคบอลต์ไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิกอนในโครงสร้างสปีนวาล์วด้วยการใช้แบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปีน เพื่อพิจารณาค่า GMR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์ไรท์ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูล จากผลการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่า GMR ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยโคบอลต์ไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิกอนให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่ที่ต่ำประมาณ 27 เฟมโตโอห์มต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าโครงสร้างแม่เหล็กโคบอลต์ นิกเกิลไฮดรอกไซด์และโคบอลต์ไฮดรอกไซด์ประมาณ 15 และ 16 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า GMR ที่สูงถึง 154% ผลการคำนวณชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยโคบอลต์ไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิกอนมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในโครงสร้างสปีนวาล์วของหัวอ่านข้อมูล

คำสำคัญ: การสะสมสปีน ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก อัตราส่วนค่าต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่

CPP-Giant Magnetoresistance Calculation in Spin Valve Structure

Nattaya Saenphum, Jessada Chureemart, and Phanwadee Chureemart*

Received: 20 June 2018

Revised: 17 August 2018

Accepted: 17 August 2018

ABSTRACT

The magnetoresistance (MR) and giant magnetoresistance (GMR) ratio in spin-valve geometry can be considered from the spin transport behaviour which depends on the gradient of spin accumulation and spin current. The aim of this work is to investigate and compare the spin transport behaviour in spin valve structure with different materials; Co, NiFe, CoFe, and CoFeAlSi by using the generalised spin accumulation model in order to find the appropriate material for real devices. We found that the spin transport parameters of material are the main factors that affect the MR and GMR ratio. The result indicates that the CoFeAlSi heusler alloy structure gives the lowest resistance-area product (RA) of $27 \text{ f}\cdot\text{Ohms}/\text{cm}^2$ whereas the RA of Co, NiFe, and CoFe are 1, 5, and 16 times bigger, respectively. Furthermore, the GMR ratio of CoFeAlSi heusler alloy structure is found at 154%. Therefore, we suggest that the spin-valve structure based CoFeAlSi heusler alloy is the promising material for reading sensor.

Keywords: spin accumulation, magnetoresistance, GMR ratio

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

*Corresponding author: e-mail: phanwadee.c@msu.ac.th

บทนำ

ปัจจุบันกลไกการเกิดปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง ทั้งเชิงทฤษฎี [1-4] และการทดลอง [5-7] เนื่องจากความเข้าใจพื้นฐานทางฟิสิกส์ของปรากฏการณ์ดังกล่าว นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กถูกประยุกต์ใช้ในกระบวนการบันทึกและอ่านข้อมูลของอุปกรณ์สปีนทรอนิกส์เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) หน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็ก (magnetoresistive random access memory, MRAM) และหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่มเชิงแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์สปีนทอร์ก (spin-transfer-torque magnetoresistive random access memory, STT-MRAM) [8-11] อุปกรณ์การบันทึกข้อมูลแบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วหลังจากการค้นพบปรากฏการณ์ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กขนาดใหญ่ (giant magnetoresistance, GMR) [12-13] ซึ่งกระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อาศัยการเกิดปรากฏการณ์ GMR เพื่อแสดงค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากเซนเซอร์วัดสัญญาณของหัวอ่านข้อมูลหรือโครงสร้างสปีนวาล์ว ปรากฏการณ์ GMR คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างสปีนวาล์วโดยมีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปีน (spin-dependence scattering) [14-15] โครงสร้างสปีนวาล์วประกอบด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetic, FM) สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุตัวนำที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (nonmagnetic, NM) [16] โดยทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นที่หนึ่งหรือชั้นพิน (pinned layer) ถูกกำหนดให้มีทิศทางที่แน่นอนเนื่องจากปรากฏการณ์ไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) [17] ในขณะที่ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นที่สองหรือชั้นอิสระ (free layer) สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างอิสระตามการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึกข้อมูล ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในโครงสร้างสปีนวาล์ว กล่าวคือค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามเนื่องจากการกระเจิงของสปีนที่มีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อทิศทางของแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันจะทำให้เกิดการกระเจิงของสปีนที่น้อยซึ่งทำให้เกิดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่ต่ำ กระบวนการทำงานของหัวอ่านข้อมูลอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเพื่อแสดงค่าไบนารีบิต (binary bit) โดยจะแสดงค่าบิต 0 ในกรณีที่ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าต่ำหรือแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและแผ่นบันทึกข้อมูลจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน และแสดงค่าบิต 1 ในกรณีที่ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าสูงหรือแมกนีไทเซชันภายในชั้นพินและแผ่นบันทึกข้อมูลจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้าม

ความต้านทานทางแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าแบบตั้งฉาก (current perpendicular plane giant-magnetoresistance, CPP-GMR) แสดงค่า GMR ที่สูง โดยมีค่าขึ้นอยู่กับการกระเจิงของสปีนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและนอนแมกเนติก (interfacial scattering) และภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร (bulk scattering) การศึกษาเชิงการทฤษฎี [18-19] และการทดลอง [14] แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า CPP-GMR สามารถทำได้จากการเพิ่มการกระเจิงของสปีนที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างสปีนวาล์ว การกระเจิงของสปีนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุที่มีค่าขึ้นอยู่กับการจัดเรียงโครงสร้างของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi level) ในขณะที่การกระเจิงของสปีนภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรมีค่าขึ้นอยู่กับค่าสปีนโพลาริเซชัน (spin polarisation) ดังนั้นการเพิ่มค่าการกระเจิงของสปีนภายในวัสดุจึงเป็น

แนวทางที่นำไปสู่การเพิ่มศักยภาพของหัวอ่านข้อมูล

หัวอ่านข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงคือสามารถแสดงค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณบิต 0 และ 1 ได้อย่างชัดเจน หรือมีค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (MR ratio) ที่สูง สามารถตรวจวัดสัญญาณได้ง่ายและมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นที่ (resistance-area product, RA) ที่ต่ำ [20-21] ปัจจุบันโครงสร้างสปีนนวนาล์วของหัวอ่านข้อมูลใช้การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการทะลุผ่านของสปีน (Tunneling magnetoresistance, TMR) โดยการใช้ชั้นฉนวนบางเป็นชั้นคั่นกลางระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระซึ่งโครงสร้างรอยต่อแบบทะลุผ่าน (Magnetic Tunneling Junction, MTJ) จะให้เกิดอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่สูงกว่าโครงสร้างแบบ GMR [12] อย่างไรก็ตาม ค่า RA ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างแบบ MTJ มีค่าที่สูงกว่าโครงสร้างแบบ GMR ทำให้ยากต่อการตรวจจับสัญญาณของหัวอ่านเนื่องจากผลของบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นฉนวน จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ในปัจจุบันมีการศึกษาปรากฏการณ์ GMR ที่ทำให้เกิดค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็กที่สูงเทียบเท่ากับโครงสร้าง MTJ และมีค่า RA ที่ต่ำ [21] จากเหตุผลดังกล่าวนำไปสู่การศึกษาปรากฏการณ์ GMR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรหลากหลายชนิดเช่น วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรบริสุทธิ์ [22] วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบผสม (alloy) [23] และวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์ (Heusler alloy) [24-25] เพื่อหาวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูล ในปัจจุบันการศึกษาค่า CPP-GMR ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่าง ๆ ถูกศึกษาอย่างกว้างขวางในเชิงการทดลองเพื่อหาวัสดุที่ทำให้เกิดค่า GMR ที่สูงและมีค่า RA ที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม วิธีการศึกษาในเชิงการทดลองมีความยุ่งยากและความซับซ้อนในการปลูกผลึกและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ จากข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของวัสดุด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (simulation method) ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการคำนวณและมีความสะดวกต่อการพิจารณาค่า GMR ในวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่า RA และค่า CPP-GMR ในโครงสร้างสปีนนวนาล์วที่ทำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ด้วยแบบจำลองการสะสมสปีน (generalised spin accumulation model) โครงสร้างสปีนนวนาล์วประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยชั้นวัสดุทองแดง (Copper, Cu) งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบค่า RA และค่า GMR จากการพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างสปีนนวนาล์วโดยชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ วัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ (Cobalt, Co) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรบริสุทธิ์ วัสดุแม่เหล็กนิกเกิลไอรอน (Nickel-Iron, NiFe) และโคบอลต์ไอรอน (Cobalt-Iron, CoFe) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบผสมและวัสดุแม่เหล็กโคบอลต์ไอรอนอะลูมิเนียมซิลิกอน (Cobalt-Iron-Aluminium-Silicon, CoFeAlSi) ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแบบฮอยเลอร์อัลลอยด์ การศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรแต่ละประเภทจะทำให้เข้าใจกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ GMR และปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า RA ความเข้าใจกระบวนการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้สามารถเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

ค่า RA และค่า GMR ในโครงสร้างสปีนวาล์วจะสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองการสะสมสปีนซึ่งจะถูกใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนจากการป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านโครงสร้างดังกล่าว พฤติกรรมการส่งผ่านสปีนถูกอธิบายจากค่าการสะสมสปีน (spin accumulation) และค่ากระแสสปีน (spin current) โดยค่า RA และค่า GMR สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนและกระแสสปีนต่อตำแหน่งดังรายละเอียดต่อไปนี้

แบบจำลองการสะสมสปีน

การเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปีนภายในชั้นวัสดุได้สามารถอธิบายได้จากการปรับแต่งสมการของ Zhang-Levy-Fert (ZLF) [26] ดังแสดงในสมการที่ (1) การเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปีนถูกอธิบายจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างค่าการสะสมสปีนและแมกนีไทเซชัน โดยค่าการสะสมสปีนจะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (precessional motion) รอบแมกนีไทเซชันและเข้าสู่ค่าการสะสมสปีนที่สถานะสมดุลของวัสดุ (\mathbf{m}_∞) ตามระยะเวลาการคลายตัวของสปีนดังสมการ

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} + (J/h)\mathbf{m} \times \mathbf{M} = -\frac{\mathbf{m} - \mathbf{m}_\infty}{\tau_{sf}} \quad (1)$$

เมื่อ \mathbf{m} คือเวกเตอร์ของค่าการสะสมสปีน

\mathbf{M} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชัน

J คือค่าพลังงานการแลกเปลี่ยนระหว่างค่าการสะสมสปีนและแมกนีไทเซชัน

h คือการลดรูปของค่าคงที่ของแพลงค์

τ_{sf} คือระยะเวลาการคลายตัวของสปีน

ค่าการสะสมสปีนที่สถานะสมดุลถูกนิยามจากผลต่างระหว่างจำนวนสปีนขึ้นและลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี ($\mathbf{m}_\infty = n_{eq}^\uparrow - n_{eq}^\downarrow$) โดยทั่วไปค่าการสะสมสปีนจะมีค่าคงที่โดยมีค่าเท่ากับค่าการสะสม สปีนที่สถานะสมดุลของวัสดุ อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบถูกรบกวนจากการป้อนกระแสสปีนผ่านโครงสร้างวัสดุ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปีนภายในโครงสร้างวัสดุ ค่ากระแสสปีนสามารถอธิบายได้จากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนผ่านโครงสร้างวัสดุและการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปีนต่อตำแหน่งโดยมีค่าตามสมการที่ (2)

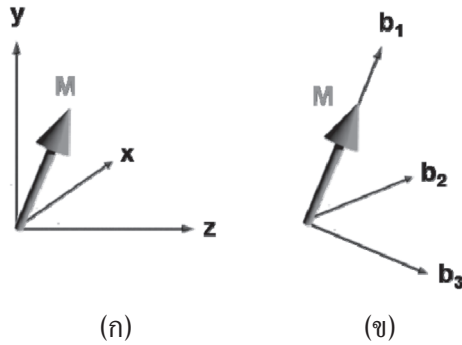
$$\mathbf{j}_m = \beta j_e \mathbf{M} - 2D_0 \left[\frac{d\mathbf{m}}{dx} - \beta \beta' \mathbf{M} \left(\mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{m}}{dx} \right) \right] \quad (2)$$

เมื่อ j_e คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ

D_0 คือการแพร่กระจายของอะตอม

β คือสปีนโพลาไรเซชันของค่านำไฟฟ้า

β' คือสปีนโพลาไรเซชันของการแพร่กระจายของสปีน



รูปที่ 1 (ก) แมกนีไทเซชันในระบบพิกัดฉาก (ข) แมกนีไทเซชันในระบบพิกัดพื้นฐาน

การพิจารณาการเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปินตามสมการที่ (1) นำไปสู่การหาผลเฉลยของค่าการสะสมสปินจากการใช้เงื่อนไขขอบเขต โดยค่าการสะสมสปินถูกแสดงในสององค์ประกอบคือองค์ประกอบที่ขนานกับแมกนีไทเซชัน (longitudinal component of magnetization, \mathbf{m}_p) และองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับแมกนีไทเซชัน (transverse component of magnetization, $\mathbf{m}_{\perp,2}$) ดังแสดงในสมการที่ (3) องค์ประกอบของค่าการสะสมสปินทั้งสององค์ประกอบถูกแสดงในระบบพิกัดพื้นฐาน $\hat{\mathbf{b}}_1$, $\hat{\mathbf{b}}_2$, และ $\hat{\mathbf{b}}_3$ เนื่องจากข้อจำกัดของการพิจารณาแมกนีไทเซชันในทิศทางใดๆ [27] โดยการหมุนแมกนีไทเซชันในระบบพิกัดฉาก x y และ z ตามรูปที่ 1 (ก) ให้มาอยู่ในระบบพิกัดพื้นฐาน โดย $\hat{\mathbf{b}}_1$ แสดงทิศทางของระบบพิกัดพื้นฐานที่ขนานกับแมกนีไทเซชัน ในขณะที่ $\hat{\mathbf{b}}_2$ และ $\hat{\mathbf{b}}_3$ แสดงทิศทางของระบบพิกัดพื้นฐานที่ตั้งฉากกับแมกนีไทเซชันตามรูป 1 (ข)

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_p(x) &= [m_p(\infty) + [m_p(0) - m_p(\infty)]e^{-x/\lambda_{sd}}] \hat{\mathbf{b}}_1 \\ \mathbf{m}_{\perp,2}(x) &= 2e^{-k_1 x} [u \cos(k_2 x) - v \sin(k_2 x)] \hat{\mathbf{b}}_2 \\ \mathbf{m}_{\perp,3}(x) &= 2e^{-k_1 x} [u \cos(k_2 x) + v \sin(k_2 x)] \hat{\mathbf{b}}_3 \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ $k_1 \pm ik_2 = \sqrt{\lambda_{sf}^{-2} + i\lambda_J^{-2}}$ โดยที่ $\lambda_{sf} = \sqrt{2D_0\tau_{sf}}$ $\lambda_J = \sqrt{2hD_0/J}$ และ $\lambda_{sd} = \sqrt{(1-\beta\beta')}\lambda_{sf}$

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ u v และ $m_p(0)$ ในสมการที่ (3) สามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของกระแสสปินซึ่งแสดงความต่อเนื่องของการเคลื่อนที่ของกระแสสปินในตำแหน่งที่อยู่ติดกัน การคำนวณการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ นำไปสู่การคำนวณค่าความต้านทานทางแม่เหล็กและค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็กโดยมีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กถูกอธิบายจากการกระเจิงของสปินภายในชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร และบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรกับชั้นนอนแมกเนติก [14, 24, 25] ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการพิจารณาพฤติกรรมกระแสที่ส่งผ่านสปินซึ่งถูกอธิบายผ่านทางค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กถูกคำนวณจากค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อ (interface resistance) ที่ถูกนิยามจากผลต่างของค่าศักย์ทางเคมี (chemical potential) ของสปินขึ้นและสปินลงของวัสดุต่อความหนาแน่นของกระแสสปินขึ้นและสปินลง [28] โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของผลต่างระหว่างค่าศักย์ทางเคมีมีค่าแปรผันตรงกับค่าการสะสมสปิน ($\delta m \propto \mu = \mu_{\uparrow} - \mu_{\downarrow}$) ในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสสปินขึ้นและสปินลงสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสสปินของระบบ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและกระแสสปินนำไปสู่การคำนวณค่า RA ซึ่งถูกแสดงตามสมการที่ (4)

$$RA_i = \frac{|\Delta m| a^2 t_F k_B T}{|j_m| e^2} \quad (4)$$

- เมื่อ RA_i คือค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่ที่ตำแหน่ง i
 Δm คือผลต่างของค่าการสะสมสปินระหว่างชั้นย่อยที่อยู่ติดกัน ($m_{i+1} - m_i$)
 a คือระยะห่างระหว่างอะตอม
 t_F คือค่าความหนาของชั้นย่อยที่ใช้พิจารณาผลต่างของค่าการสะสมสปิน
 $k_B T$ คือ $1.6 \times 10^{-21} J$ หรือ $10 meV$
 e คือประจุของอิเล็กตรอน
 j_m คือกระแสสปิน

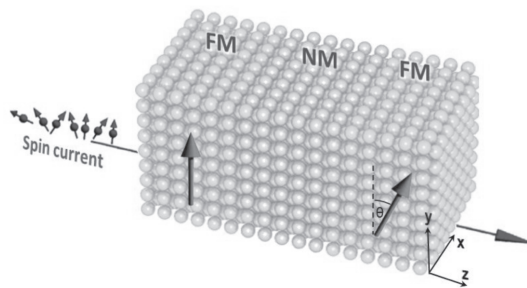
การพิจารณาค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมของระบบ (RA_{tot}) ถูกคำนวณจากผลรวมของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของทุก ๆ ตำแหน่งในโครงสร้าง $RA_{tot} = \sum_i^n RA_i$, โดย n คือจำนวนชั้นย่อยในโครงสร้างการคำนวณค่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็กหรือค่า GMR ซึ่งอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานทางแม่เหล็กรวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงกันข้ามแสดงตามสมการที่ (5)

$$MR \text{ ratio} = \frac{RA_{AP} - RA_P}{RA_P} \quad (5)$$

เมื่อ RA_{AP} และ RA_P คือค่าความต้านทานทางแม่เหล็กเชิงพื้นที่รวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามและจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่า RA และค่า GMR ในโครงสร้างสปีนวาล์ว FM(2nm)/Cu(2nm)/FM(2nm) ทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์มกำหนดให้มีการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางแกน y และแมกนีไทเซชันภายในชั้นอิสระสามารถเปลี่ยนทิศทางในระนาบ yz พฤติกรรมการส่งผ่านสปีนถูกพิจารณาจากการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความหนาแน่น 50 MA/cm^2 ผ่านโครงสร้างของสปีนวาล์วตามแนวแกน z ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างตามรูปที่ 2 นอกจากนี้เพื่อความเสมือนจริงของการคำนวณจะทำการพิจารณาการแพร่ของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มซึ่งเกิดจากธรรมชาติของการปลูกผลึก โดยกำหนดความหนาของการแพร่บริเวณรอยต่อเท่ากับ 0.3 นาโนเมตร



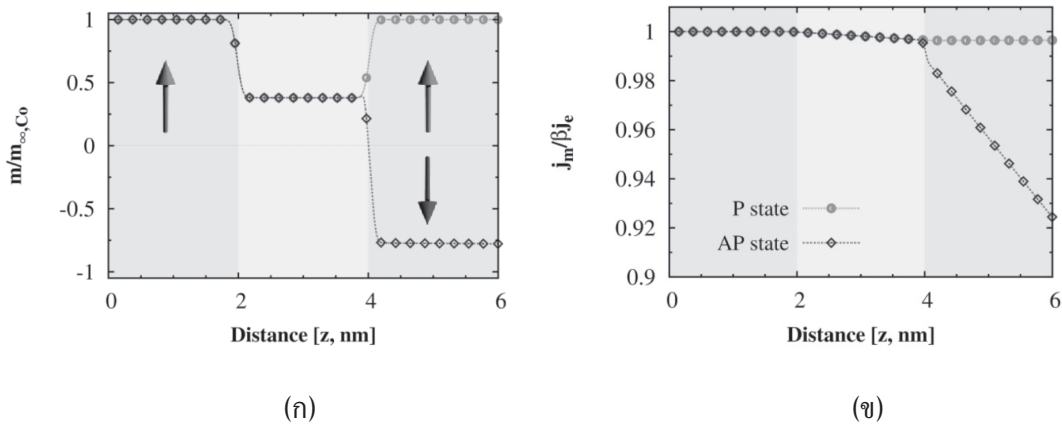
รูปที่ 2 โครงสร้างแม่เหล็กสามชั้นที่ประกอบไปด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยนอนแมกเนติก ลูกศรสีแดง (แนวตั้ง) แสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในวัสดุและลูกศรสีน้ำเงิน (แนวนอน) แสดงทิศทางของการป้อนกระแสสปีน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการส่งผ่านสปีนโดยคำนวณค่า RA และค่า GMR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร 4 ชนิด ได้แก่ Co NiFe CoFe และ CoFeAlSi ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทางสถานะของสปีนขึ้นและสปีนลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มี (density of state, DOS) โดยค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่าง ๆ แสดงตามตารางที่ 1 ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนของ Cu มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสปีนขึ้นและสปีนลงที่ระดับพลังงานเฟอร์มีค่าที่เท่ากัน โดยกำหนดระยะการแพร่ของสปีนภายในชั้น Cu เท่ากับ 600 นาโนเมตร [26, 29]

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร

พารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน	Co [26]	NiFe [26]	CoFe [30]	CoFeAlSi [31-32]
$m_{\infty} (\text{MC/m}^3)$	39.45	111.8	261.5	3.092
β	0.5	0.7	0.56	0.92
β	0.9	0.95	0.73	0.853
$\lambda_{sdl} (\text{nm})$	60	5	12	3
$J (\text{eV})$	0.245	0.106	0.1	0.1

การพิจารณาพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านสปินสามารถพิจารณาได้จากการเคลื่อนที่ของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินในสมการที่ (1) และ (2) เพื่อเป็นการทดสอบความถูกต้องของรูปแบบจำลอง ในลำดับแรกจะทำการพิจารณาค่าการสะสมสปินและกระแสสปินในโครงสร้างวัสดุ Co(2nm)/Cu(2nm)/Co(2nm) โดยทำการพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่แมกนีไทเซชันของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรทั้งสองมีการจัดเรียงตัวไปใน ทิศทางเดียวกัน (parallel state, P) และกรณีที่มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางตรงกันข้าม (anti-parallel state, AP) เมื่อพิจารณาค่าการสะสมสปินภายในชั้นเฟอร์โรชั้นที่หนึ่งบริเวณ bulk ซึ่งเป็นบริเวณที่ห่างจากบริเวณรอยต่อจะมีค่าเท่ากับค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุ โดยค่าการสะสมสปินจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชั้นแรกและนอนแมกเนติกเนื่องจากความแตกต่างของพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินระหว่างวัสดุ ค่าการสะสมสปินจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องภายในชั้น Cu เพื่อเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุ Cu อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความหนาของชั้น Cu ที่มีค่าน้อยกว่าระยะการแพร่กระจายของสปินทำให้ค่าการสะสมสปินภายในชั้น Cu มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าการสะสมสปินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแมกนีไทเซชันเนื่องจากอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนระหว่างอิเล็กตรอนในชั้นตัวนำและแมกนีไทเซชันซึ่งแสดงตามรูปที่ 3 (ก) การเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินที่ตำแหน่งต่าง ๆ นำไปสู่การพิจารณาค่ากระแสสปินซึ่งแสดงตามรูปที่ 3 (ข) ค่ากระแสสปินมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามค่าการสะสมสปินและมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากความต่อเนื่องของเงื่อนไขขอบเขต โดยค่ากระแสสปินมีค่าลดลงอย่างชัดเจนในกรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวแบบตรงกันข้าม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานทางแม่เหล็กจากการกระเจิงของสปิน [32]

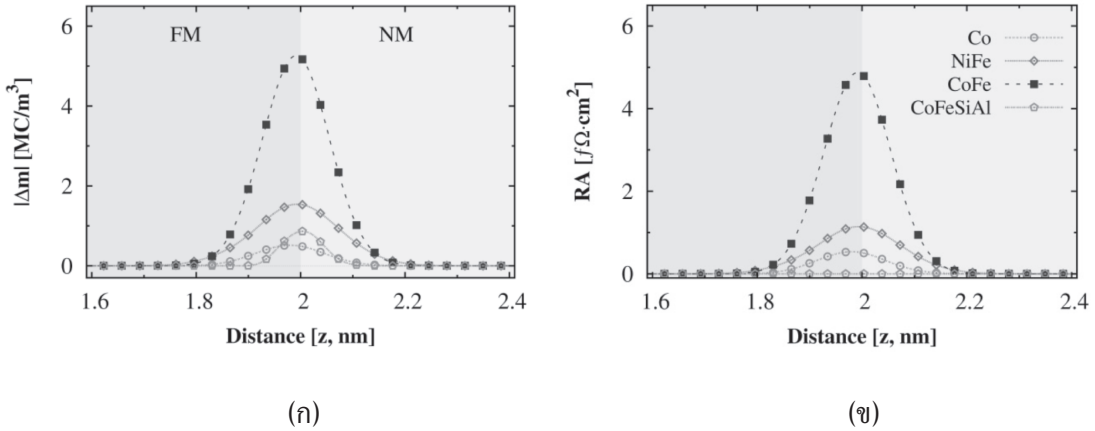


รูปที่ 3 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและ (ข) ค่ากระแสสปินต่อตำแหน่งของโครงสร้าง Co(2nm)/Cu(2nm)/ Co(2nm) ในกรณี P และ AP ลูกศรแสดงทิศทางของแมกนีไทเซชันภายในชั้นฟิล์ม

ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาค่า RA ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่าง ๆ จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินต่อตำแหน่ง พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปิน (Δm) จะมีค่าสูงสุดในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุชั้นวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรและชั้นนอนแมกเนติก เนื่องจากค่าการสะสมสปินมีแนวโน้มจะเข้าสู่ค่าการสะสมสปินของวัสดุนอนแมกเนติกซึ่งแสดงตามรูปที่ 4 (ก) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินมีค่าขึ้นอยู่กับค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร โดยในโครงสร้างรอยต่อ CoFe/Cu จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินสูงสุดเนื่องจากค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุ CoFe มีค่าสูง นอกจากนี้ผลของระยะการแพร่ของสปินยังส่งผลโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปิน ซึ่งในกรณีที่ระยะการแพร่ของสปินมีค่าน้อยส่งผลให้ค่าการสะสมสปินเข้าสู่ค่าการสะสมสปินที่สภาวะสมดุลของวัสดุได้เร็วขึ้น ดังนั้นโครงสร้างรอยต่อระหว่างวัสดุ CoFeAlSi/Cu จึงมีขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินที่สูงกว่าโครงสร้างรอยต่อระหว่างวัสดุ Co/Cu เนื่องจากวัสดุ CoFeAlSi มีค่าสปินโพลาไรเซชันที่สูงกว่าวัสดุ Co ทำให้เกิดความแตกต่างของพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินบริเวณรอยต่อที่สูงกว่า

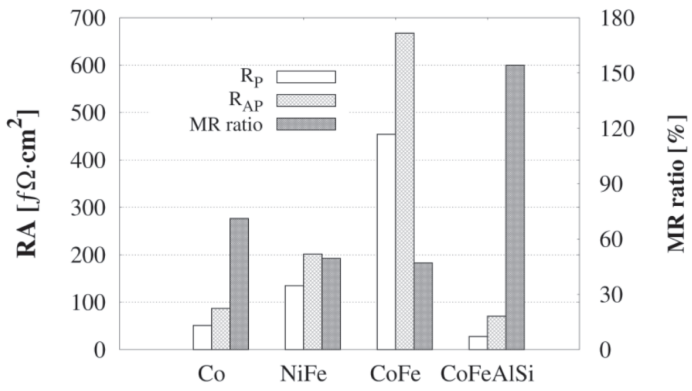
การพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปินนำไปสู่การคำนวณค่า RA ตามสมการที่ (4) การเปลี่ยนแปลงของค่า RA ของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ แสดงตามรูปที่ 4 (ข) ค่า RA มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปิน ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มเนื่องจากการกระเจิงของสปินในบริเวณรอยต่อ จากการศึกษาพบว่ากรณีที่แมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดการกระเจิงของสปินที่สูงซึ่งทำให้เกิดค่า RA มากกว่าในกรณีแมกนีไทเซชันระหว่างชั้นพินและชั้นอิสระจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันซึ่งแสดงในรูปที่ 5 การกระเจิงของสปินบริเวณรอยต่อส่งผลอย่างมากต่อการเกิดค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก [33] ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กผสม NiFe และ CoFe มีค่าสูงกว่าวัสดุแม่เหล็ก Co และ CoFeAlSi อย่างชัดเจนเนื่องจากค่าระยะการแพร่กระจายของสปินที่ต่ำส่งผลให้สปินสามารถกลับ

ทิศทางได้อย่างรวดเร็วและทำให้เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินที่สูง [33] อย่างไรก็ตามค่า สปินโพลาไรซ์เซชันที่สูงของวัสดุแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ CoFeAlSi ส่งผลให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กกรรมมีค่าต่ำ [31-32]



รูปที่ 4 (ก) การเปลี่ยนแปลงค่าการสะสมสปินและ (ข) การเปลี่ยนแปลงค่า RA บริเวณรอยต่อระหว่าง FM/NM ของวัสดุ Co NiFe CoFe และ CoFeAlSi

จากการศึกษาโครงสร้างสปินวาล์วที่ใช้วัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรที่แตกต่างกันจะให้ค่า RA และค่า GMR ที่ต่างกัน โดยพบว่าอัตราส่วนค่าความต้านทานทางแม่เหล็กหรือค่า GMR ของโครงสร้างแม่เหล็กฮอยเลอร์อัลลอยด์ CoFeAlSi แสดงค่า GMR สูงสุด โดยมีค่าประมาณ 154% เนื่องจากวัสดุมีค่าสปินโพลาไรซ์เซชันที่สูง [31-32] นอกจากนี้พบว่าวัสดุแม่เหล็กผสม NiFe และ CoFe แสดงค่า GMR ที่ 49% และ 47% ตามลำดับซึ่งมีค่าต่ำกว่าโครงสร้างแม่เหล็ก Co ที่มีค่า GMR 71% เนื่องจากค่า RA ของวัสดุแม่เหล็กผสม NiFe และ CoFe ที่มีค่าสูง โดยผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง [34]



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่า RA ในกรณี P และ AP และค่า GMR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่างๆ

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทั่วไปของค่าการสะสมสปินเพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรชนิดต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า RA และค่า GMR ในโครงสร้างสปีนวาล์ว ค่าความต้านทานทางแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินและกระแสสปิน ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่า RA และค่า GMR ของวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โร 4 ชนิดคือ Co NiFe CoFe และ CoFeAlSi โดยโครงสร้างสปีนวาล์วที่ประกอบด้วยวัสดุแม่เหล็กเฟอร์โรสองชั้นที่คั่นกลางด้วยชั้น Cu การศึกษาพบว่าค่า RA มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะสมสปินโดยมีค่าขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุ โดยโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กผสม NiFe/Cu และ CoFe/Cu แสดงค่า GMR ที่ต่ำกว่าโครงสร้าง Co/Cu [34] ในขณะที่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสอยเลอร์อัลลอยด์ CoFeAlSi/Cu ให้ค่า RA ที่ต่ำและค่า GMR ที่สูงสุดเนื่องจากภายในวัสดุมีค่าสปินโพลาไรซ์เซชันสูง ซึ่งผลการคำนวณให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลอง [31-32] วิธีการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบหัวอ่านข้อมูลหรืออุปกรณ์สปินทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

เอกสารอ้างอิง

1. Wang, C., Guo, Z., Rong, Y., & Hsu, T. Y. (2004). A modified theoretical model on tunneling giant magnetoresistance of granular films. *Physics Letters A*, 329(3), 236-243.
2. Smith, N., Katine, J. A., Childress, J. R., & Carey, M. J. (2005). Angular dependence of spin torque critical currents for CPP-GMR read heads. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(10), 2935-2940.
3. Blaas, C., Szunyogh, L., Weinberger, P., Sommers, C., Levy, P. M., & Shi, J. (2002). Theoretical evaluation of magnetotransport properties in Co/Cu/Co-based spin valves. *Physical Review B*, 65(13), 134427.
4. Weinberger, P., & Szunyogh, L. (2002). Ab initio characterization of the giant magnetoresistance in realistic spin valves. *Physical Review B*, 66(14), 144427.
5. Grollier, J., Cros, V., Hamzic, A., George, J. M., Jaffrès, H., Fert, A., Faini, G., Youssef, J. B., & Legall, H. (2001). Spin-polarized current induced switching in Co/Cu/Co pillars. *Applied Physics Letters*, 78(23), 3663-3665.
6. Bakonyi, I., Simon, E., Tóth, B. G., Péter, L., & Kiss, L. F. (2009). Giant magnetoresistance in electrodeposited Co-Cu/Cu multilayers: origin of the absence of oscillatory behavior. *Physical Review B*, 79(17), 174421.
7. Grünwald, M., Wahler, M., Schumann, F., Michelfeit, M., Gould, C., Schmidt, R., Würthner, F., Schmidt, G. & Molenkamp, L. W. (2011). Tunneling anisotropic magnetoresistance in organic spin valves. *Physical Review B*, 84(12), 125208.
8. Grünberg, P. A. (2008). Nobel lecture: from spin waves to giant magnetoresistance and beyond. *Reviews of Modern Physics*, 80(4), 1531.

9. Ikeda, S., Hayakawa, J., Lee, Y. M., Matsukura, F., Ohno, Y., Hanyu, T., & Ohno, H. (2007). Magnetic tunnel junctions for spintronic memories and beyond. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 54(5), 991-1002.
10. Diao, Z., Li, Z., Wang, S., Ding, Y., Panchula, A., Chen, E., Wang, L-C., & Huai, Y. (2007). Spin-transfer torque switching in magnetic tunnel junctions and spin-transfer torque random access memory. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 19(16), 165209.
11. Chen, E., Apalkov, D., Diao, Z., Driskill-Smith, A., Druist, D., Lottis, D., et al., & Wolf, S. A. (2010). Advances and future prospects of spin-transfer torque random access memory. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(6), 1873-1878.
12. Wood, R. (2009). Future hard disk drive systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321(6), 555-561.
13. Tian, Y., & Yan, S. (2013). Giant magnetoresistance: history, development and beyond. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 56(1), 2-14.
14. Parkin, S. S. P. (1993). Origin of enhanced magnetoresistance of magnetic multilayers: spin-dependent scattering from magnetic interface states. *Physical Review Letters*, 71(10), 1641.
15. Berkowitz, A. E., Mitchell, J. R., Carey, M. J., Young, A. P., Zhang, S., Spada, F. E., Parker, F. T., Hutten, A., & Thomas, G. (1992). Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys. *Physical Review Letters*, 68(25), 3745.
16. Freitas, P. P., Silva, F., Oliveira, N. J., Melo, L. V., Costa, L., & Almeida, N. (2000). Spin valve sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 81(1-3), 2-8.
17. Gupta, A., Mohanan, S., Kinyanjui, M., Chuvilin, A., Kaiser, U., & Herr, U. (2010). Influence of nano-oxide layer on the giant magnetoresistance and exchange bias of Ni/Mn/Co/Cu/Co spin valve sensors. *Journal of Applied Physics*, 107(9), 093910.
18. Johnson, B. L., & Camley, R. E. (1991). Theory of giant magnetoresistance effects in Fe/Cr multilayers: spin-dependent scattering from impurities. *Physical Review B*, 44(18), 9997.
19. Valet, T., & Fert, A. (1993). Theory of the perpendicular magnetoresistance in magnetic multilayers. *Physical Review B*, 48(10), 7099.
20. Sato, J., Oogane, M., Naganuma, H., & Ando, Y. (2011). Large magnetoresistance effect in epitaxial Co₂Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si/Ag/Co₂Fe_{0.4}Mn_{0.6}Si devices. *Applied Physics Express*, 4(11), 113005.
21. Nagasaka, K. (2009). CPP-GMR technology for magnetic read heads of future high-density recording systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 321(6), 508-511.
22. Bailey, W. E., Russek, S. E., Zhang, X. G., & Butler, W. H. (2005). Experimental separability of channeling giant magnetoresistance in Co/Cu/Co. *Physical Review B*, 72(1), 012409.

23. Tekgöl, A., Alper, M., & Kockar, H. (2017). Simple electrodepositing of CoFe/Cu multilayers: effect of ferromagnetic layer thicknesses. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 421, 472-476.
24. Nakatani, T. M., Hase, N., Goripati, H. S., Takahashi, Y. K., Furubayashi, T., & Hono, K. (2012). Co-based Heusler alloys for CPP-GMR spin-valves with large magnetoresistive outputs. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(5), 1751-1757.
25. Jung, J. W., Sakuraba, Y., Sasaki, T. T., Miura, Y., & Hono, K. (2016). Enhancement of magnetoresistance by inserting thin NiAl layers at the interfaces in Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5}/Ag/Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5} current-perpendicular-to-plane pseudo spin valves. *Applied Physics Letters*, 108(10), 102408.
26. Chureemart, P., Cuadrado, R., D'Amico, I., & Chantrell, R. W. (2013). Modeling spin injection across diffuse interfaces. *Physical Review B*, 87(19), 195310.
27. Chureemart, P., D'Amico, I., & Chantrell, R. W. (2015). Model of spin accumulation and spin torque in spatially varying magnetisation structures: limitations of the micromagnetic approach. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27(14), 146004.
28. Fert, A., & Jaffres, H. (2001). Conditions for efficient spin injection from a ferromagnetic metal into a semiconductor. *Physical Review B*, 64(18), 184420.
29. Bass, J., & Pratt Jr, W. P. (2007). Spin-diffusion lengths in metals and alloys, and spin-flipping at metal/metal interfaces: an experimentalist's critical review. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 19(18), 183201.
30. Baker, A. A., Figueroa, A. I., Collins-McIntyre, L. J., Van Der Laan, G., & Hesjedal, T. (2015). Spin pumping in ferromagnet-topological insulator-ferromagnet heterostructures. *Scientific Reports*, 5, 7907.
31. Huang, H. L., Tung, J. C., & Guo, G. Y. (2015). Anomalous hall effect and current spin polarization in Co₂FeX Heusler compounds (X = Al, Ga, In, Si, Ge, and Sn): A systematic ab initio study. *Physical Review B*, 91(13), 134409.
32. Nakatani, T. M., Furubayashi, T., Kasai, S., Sukegawa, H., Takahashi, Y. K., Mitani, S., & Hono, K. (2010). Bulk and interfacial scatterings in current-perpendicular-to-plane giant magnetoresistance with Co₂Fe(Al_{0.5}Si_{0.5}) Heusler alloy layers and Ag spacer. *Applied Physics Letters*, 96(21), 212501.
33. Chureemart, J., Cuadrado, R., Chureemart, P., & Chantrell, R. W. (2017). Multiscale modeling of spin transport across a diffuse interface. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 443, 287-292.
34. Dieny, B., Humbert, P., Speriosu, V. S., Metin, S., Gurney, B. A., Baumgart, P., & Lefakis, H. (1992). Giant magnetoresistance of magnetically soft sandwiches: dependence on temperature and on layer thicknesses. *Physical Review B*, 45(2), 806.