

บทความวิจัย

ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อการส่งผ่านสปีน ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่คิดผลของรอยต่อ

ชนิตา บุตรรัตน์, พรรณวดี จุริมาศ* และ เจษฎา จุริมาศ

บทคัดย่อ

พฤติกรรมของการส่งผ่านสปีนซึ่งแสดงถึงความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกและรอยต่อแบบแพร่กระจายที่เกิดจากการผสมกันของไอออนระหว่างวัสดุที่อยู่ติดกัน งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการศึกษาการส่งผ่านสปีนโดยศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและผลของรอยต่อด้วยรูปแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปีนร่วมกับแบบจำลองบริเวณรอยต่อซึ่งสามารถจำลองได้โดยอาศัยกฎของฟิคค์ ความเข้มข้นของไอออนต่อตำแหน่งภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กถูกนำไปใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์การส่งผ่านสปีนซึ่งสามารถนำไปคำนวณการสะสมสปีนและความต้านทานแม่เหล็กได้โดยความต้านทานแม่เหล็กคำนวณมาจากการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปีน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการส่งผ่านสปีนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นซึ่งประกอบด้วยโคบอลต์กับทองแดงโดยพิจารณาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกและความกว้างของบริเวณรอยต่อ จากผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปีน อัตราส่วนของความต้านทานแม่เหล็กมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอก นอกจากนี้ความกว้างของบริเวณรอยต่อยังส่งผลต่ออัตราส่วนของความต้านทานแม่เหล็กโดยเมื่อความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการกระเจิงของการสะสมสปีนที่บริเวณรอยต่อแบบเรียบ

คำสำคัญ: ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมาก รอยต่อแบบแพร่กระจาย การสะสมสปีน

The Effect of Current Density for Spin Transport in Magnetic Bilayer with Diffuse Interface

Chanita Burattana, Phanwadee Chureemart* and Jessada Chureemart

ABSTRACT

The spin transport behaviour representing giant magnetoresistance (GMR) is influenced by the injected current density and the diffuse interface between layers. The diffuse interface arising from the intermixing of ions of the adjacent materials becomes significant factor on spin transport. In this work, we propose the theoretical approach to investigate the effect of the electrical current density and diffuse interface via the generalised spin accumulation model coupled with the interface model. The spin accumulation model can be used to describe the spin transport for noncollinear configuration. Meanwhile, the diffuse interface is modeled following Fick's law. The spatial concentration of magnetic ion is used to consider the spin transport parameters which are required for spin accumulation calculation and magnetoresistance. The magnetoresistance is calculated from the gradient of spin accumulation. The bilayer system of Co/Cu is considered here. The effect of electric current density and the width of interface region are studied. We found that the current density significantly affects to the spin transport behaviour. The MR ratio increases with increasing the electrical current density. In addition, the thickness of interface also influences to the MR ratio. MR ratio is likely to increase with decreasing interface thickness. This is due to scattering of spin accumulation of atomically sharp interface.

Keyword: Giant magnetoresistance, Diffuse interface, Spin accumulation

บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับสปินของอิเล็กตรอนได้รับความนิยมนอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถนำคุณสมบัติของสปินมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเช่นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive, HDD) และหน่วยความจำเข้าถึงแบบสุ่ม (magnetic random access memory, MRAM) [1-3] การพัฒนาอุปกรณ์สปินทรอนิกส์ (spintronic) อาศัยการศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมาก (giant magnetoresistance, GMR) ซึ่งเกิดจากการกระเจิงของสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โครงสร้างของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีส่วนประกอบหลักคือโครงสร้างสำหรับการวัดสัญญาณที่เรียกว่าสปินวาล์ว (spin valve) ซึ่งเป็นโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสามชั้นโดยประกอบด้วยชั้นเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic material, FM) สองชั้นที่ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก (nonmagnetic, NM) [4-7] วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชั้นแรกถูกเรียกว่าชั้นพิน (pinned layer) เนื่องจากแมกนีไทเซชันในชั้นนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางซึ่งอาศัยปรากฏการณ์การไบอัสแลกเปลี่ยน (exchange bias) [8, 9] ในขณะที่ชั้นเฟอร์โรแมกเนติกชั้นที่สองถูกเรียกว่าชั้นอิสระ (free layer) เนื่องจากแมกนีไทเซชันสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางไปในทิศทางใดๆ ได้โดยมีทิศทางขึ้นอยู่กับทิศทางเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอก การทำงานของหัวอ่านข้อมูลอาศัยการวัดความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการส่งผ่านสปิน (spin transport) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยปริมาณที่สำคัญสองปริมาณได้แก่ กระแสสปิน (spin current) [10, 11] และการสะสมของสปิน (spin accumulation) [12-14] เมื่อกระแสไฟฟ้าภายนอกถูกป้อนเข้าสู่โครงสร้างสปินวาล์วจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสปินของกระแสที่มีทิศทางใดๆ กับแมกนีไทเซชันในชั้นพินซึ่งถูกเรียกว่าอันตรกิริยาการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นระดับพลังงานเอสและดี (s-d exchange interaction) ส่งผลให้เกิดแรงบิดสปินหรือสปินทอร์ค (spin torque) กระทำต่อแมกนีไทเซชันในชั้นนี้และจะเกิดแรงบิดกระทำต่อสปินของอิเล็กตรอนตัวนำซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม สปินของอิเล็กตรอนตัวนำจะมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางของแมกนีไทเซชันในชั้นพินเรียกว่ากระแสสปินโพลารไรซ์ (spin-polarised current) โดยกระแสสปินเป็นปริมาณที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอก จากนั้นกระแสสปินนี้จะเคลื่อนที่ต่อไปในชั้นอิสระและเกิดอันตรกิริยาระหว่างกระแสสปินกับแมกนีไทเซชันในชั้นอิสระอีกครั้ง แรงบิดที่กระทำต่อสปินของอิเล็กตรอนตัวนำทำให้สปินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปตามทิศทางของแมกนีไทเซชันของชั้นอิสระโดยทำให้เกิดการสะสมสปินซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจำนวนของสปินขึ้น (spin up) และสปินลง (spin down) เมื่อสปินเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อ เนื่องจากการสะสมสปินมีแนวโน้มการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก ดังนั้นทิศทางของแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจึงส่งผลต่อการส่งผ่านสปิน ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากพิจารณาจากความต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance) ของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในสองกรณีคือกรณีที่แมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกทั้งสองชั้นในโครงสร้างสปินวาล์วมีทิศทางเดียวกันและมีทิศทางตรงข้ามกัน [4, 7] เมื่อแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระมีทิศทางเดียวกัน ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากจะมีค่าน้อยเนื่องจากสปินเกิดการกระเจิงน้อย ในขณะที่ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากมีค่ามากที่สุดเมื่อแมกนีไทเซชันในชั้นพินและชั้นอิสระมีทิศทางตรงข้ามกันเนื่องจากสปินเกิดการกระเจิงมาก การทำงานของหัวอ่านข้อมูลอาศัยการวัดค่าความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากเมื่อ

แมกนีไทเซชันในชั้นอิสรระถูกเหนี่ยวนำให้มีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูล การอ่านข้อมูลเกิดขึ้นได้ในสองกรณีโดยกรณีแรกคือแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลมีทิศทางเดียวกันกับแมกนีไทเซชันในชั้นพิน หัวอ่านจะบันทึกค่าบิต (bit) ที่อ่านได้เป็น 0 เนื่องจากความต้านทานที่วัดได้มีค่าน้อย กรณีที่สองคือเมื่อแมกนีไทเซชันในแผ่นบันทึกข้อมูลเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันในชั้นอิสรระมีทิศทางตรงกันข้ามกับชั้นพิน หัวอ่านจะบันทึกค่าบิตเป็น 1 เนื่องจากกรณีนี้ความต้านทานภายในโครงสร้างที่วัดได้มีค่ามาก

เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของหัวอ่านในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการส่งผ่านของสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ลักษณะของบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุภายในโครงสร้างแม่เหล็กเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านของสปินและค่าความต้านทานของแม่เหล็กปริมาณมาก ในทางปฏิบัติกระบวนการสร้างโครงสร้างวัสดุหลายชั้นจะทำให้เกิดรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุที่มีความขรุขระ (diffuse interface) เนื่องจากการแพร่กระจายระหว่างไอออนของธาตุต่างชนิดกัน [15] ในงานวิจัยทางทฤษฎีที่ผ่านมาส่วนมากจะจำลองโครงสร้างวัสดุหลายชั้นโดยกำหนดให้มีรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุแบบอุดมคติ (ideal interface) โดยไม่มีพิจารณาการแพร่กระจายของไอออนของวัสดุในชั้นที่ติดกันทำให้รอยต่อมีลักษณะเรียบซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายและไม่ใกล้เคียงกับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจริง [16, 17] นอกจากนี้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอก (electric current density) ที่ป้อนสู่โครงสร้างวัสดุยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านของสปิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกและผลของบริเวณรอยต่อที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านของสปินและความต้านทานแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

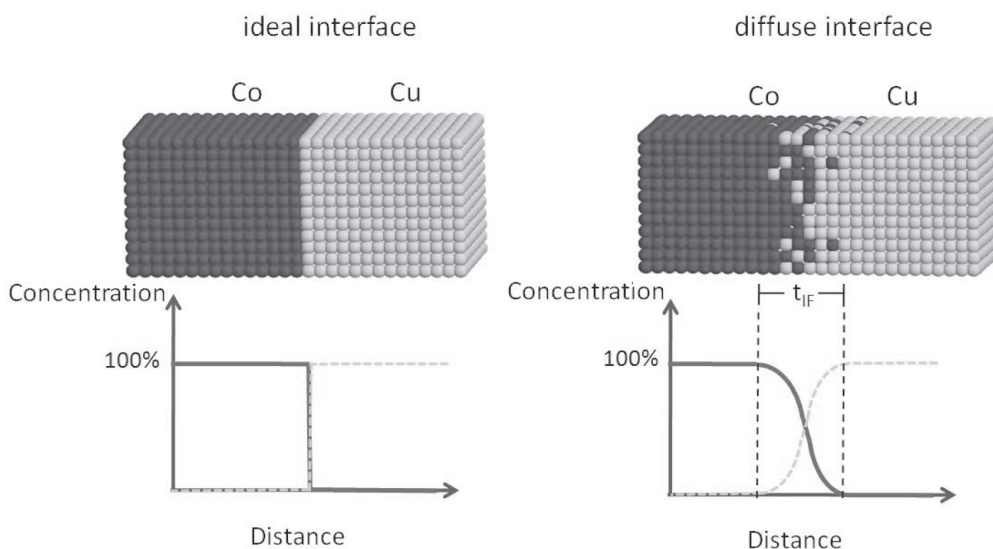
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการส่งผ่านสปินของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กด้วยรูปแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน (generalised spin accumulation model) และรูปแบบจำลองบริเวณรอยต่อ (interface model) [18, 19] โดยรูปแบบจำลองของการสะสมสปินสามารถใช้ในการพิจารณาการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่แมกนีไทเซชันที่มีทิศทางใดๆ ด้วยวิธีการแปลงเมตริก (transformation matrix) และสามารถพิจารณาผลของบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุได้ นอกจากนี้รูปแบบจำลองบริเวณรอยต่อจะใช้การพิจารณาความเข้มข้นของไอออนของวัสดุที่ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างด้วยกฎของฟิคค์ (Fick's law) ค่าความเข้มข้นของไอออนจะนำมาใช้ในการพิจารณาพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณการสะสมสปินและกระแสสปิน เพื่อความสะดวกในการศึกษางานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นจากการพิจารณาโครงสร้างวัสดุสองชั้นซึ่งประกอบด้วยโคบอลต์ (Cobalt) และทองแดง (Copper) ซึ่งเป็นโครงสร้างวัสดุที่ให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากที่มีค่าสูง [20] จากนั้นจะศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กและผลของรอยต่อที่มีต่อพฤติกรรมกรรมการส่งผ่านสปินซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาความต้านทานแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุได้และทำให้เข้าใจกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์การบันทึกข้อมูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและผลของบริเวณรอยต่อที่มีต่อการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก การศึกษาการส่งผ่านสปินสามารถทำได้โดยเริ่มจากการจำลองโครงสร้างวัสดุที่ต้องการศึกษาเพื่อพิจารณาผลของรอยต่อซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการคำนวณความเข้มข้นของไอออนของวัสดุแต่ละชนิดภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ใช้ในการจำลองบริเวณรอยต่อ จากนั้นจะอธิบายถึงการคำนวณการส่งผ่านสปินด้วยรูปแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปินที่ประกอบด้วยกระแสสปินและการสะสมสปิน การเปลี่ยนแปลงการสะสมสปินสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาความต้านทานแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุได้โดยจะกล่าวถึงเป็นลำดับสุดท้าย

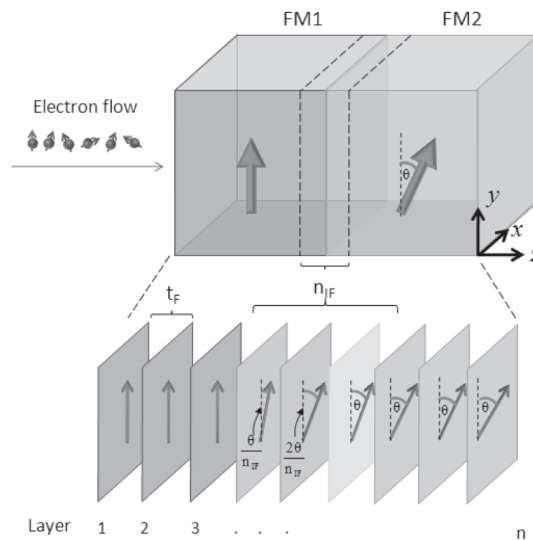
รูปแบบจำลองบริเวณรอยต่อ

การพิจารณาการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจะเริ่มต้นจากการจำลองโครงสร้างที่ต้องการศึกษา แบบจำลองโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในงานวิจัยทั่วไปจะพิจารณาให้บริเวณรอยต่อเป็นแบบอุดมคติ เนื่องจากเป็นกรณีที่ยากต่อการพิจารณาการส่งผ่านสปิน [16, 17] ความเข้มข้นของไอออนวัสดุแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นเช่น โครงสร้างวัสดุที่ประกอบด้วยโคบอลต์ (Co) กับทองแดง (Cu) ซึ่งมีรอยต่อแบบอุดมคติจะมีค่าคงที่ในชั้นวัสดุแม่เหล็ก จากนั้นความเข้มข้นของไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็วในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุตั้งรูปที่ 1 (ซ้าย) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงบริเวณรอยต่อในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กเกิดการแพร่กระจายของไอออนวัสดุในชั้นที่ติดกันส่งผลให้เกิดบริเวณรอยต่อแบบแพร่กระจายซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กตั้งรูปที่ 1 (ขวา) โดยจะพบว่าความเข้มข้นของไอออนจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 1 (ซ้าย) รอยต่อแบบอุดมคติซึ่งไม่พิจารณาการแพร่ของอะตอมระหว่างโคบอลต์ (Co) และทองแดง (Cu) ที่บริเวณรอยต่อทำให้ความเข้มข้นของไอออนมีค่าไม่ต่อเนื่อง (ขวา) รอยต่อที่เกิดการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างโคบอลต์และทองแดงทำให้ความเข้มข้นของไอออนเกิดความต่อเนื่อง ซึ่งแสดงถึงการผสมกันระหว่างอะตอมภายในโครงสร้างวัสดุ

ในการจำลองบริเวณรอยต่อของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นสามารถทำได้โดยแบ่งโครงสร้างออกเป็นชั้นบางๆ หลายชั้นโดยแต่ละชั้นมีความหนา t_F ดังรูปที่ 2 เพื่อพิจารณาความเข้มข้นของไอออนแต่ละชนิดต่อตำแหน่งในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก แมกนีไทเซชันจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงจากทิศทางของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกชั้นแรกไปยังทิศทางของวัสดุชั้นที่สองซึ่งมีลักษณะคล้ายการเปลี่ยนทิศทางของแมกนีไทเซชันในกำแพงโดเมน (Domain wall) ภายในบริเวณรอยต่อจะเกิดการผสมกันระหว่างไอออนของวัสดุถ้าพิจารณาโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วยวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกกับวัสดุอนแมกเนติกหรือวัสดุที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กแมกนีไทเซชันในบริเวณรอยต่อจะมีขนาดค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ในชั้นวัสดุอนแมกเนติก



รูปที่ 2 โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นที่แบ่งออกเป็นชั้นบางๆ หลายชั้นโดยแมกนีไทเซชันซึ่งแทนด้วยลูกศรมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางทีละน้อยที่บริเวณรอยต่อ

การพิจารณาผลของรอยต่อสามารถทำได้โดยพิจารณาความเข้มข้นของไอออนในแต่ละตำแหน่งของโครงสร้างด้วยกฎของฟิกค์ ความกว้างของบริเวณรอยต่อสามารถกำหนดได้ด้วยตัวแปรการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างวัสดุ (x_0) โดยจะส่งผลต่อความเข้มข้นของไอออนในโครงสร้างวัสดุชั้นที่ตำแหน่ง x_0 ซึ่งมีความหนา t_F โดยที่ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของอะตอมซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ [18, 19]

$$C(x, t; T) = \frac{t_F C_0}{\sqrt{\pi x_0}} \cdot \exp[-(x/x_0)^2] \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) พบว่าความเข้มข้นของไอออนในชั้นวัสดุมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรการแพร่ซึ่งแปรผันตรงกับอุณหภูมิและเวลาโดยที่ $x_0 = 2\sqrt{D_{ion} t}$ เมื่อ D_{ion} คือค่าคงที่การแพร่ของไอออนที่ขึ้นกับอุณหภูมิในระบบ และ t คือเวลาที่ใช้ในการแพร่ การกำหนดการแพร่กระจายแปรผันตรงกับความกว้างของบริเวณรอยต่อ (interface thickness, t_F) หากความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่ามากแสดงว่าโครงสร้างวัสดุนั้นเกิดการ

แพร่กระจายของธาตุระหว่างวัสดุมากเช่นเดียวกันจึงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินมีค่าลดลง ความเข้มข้นของไอออนในโครงสร้างวัสดุที่ตำแหน่งต่างๆ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปิน (spin transport parameter) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในโครงสร้างวัสดุถึงความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$P(x) = P_{FM,1}C(x)_{FM,1} + P_{FM,2}C(x)_{FM,2} \quad (2)$$

เมื่อ $P(x)$ เป็นค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ตำแหน่ง x โดยที่ $P_{FM,1}$ กับ $P_{FM,2}$ คือค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินในวัสดุบัลค์ (Bulk) และ $C(x)_{FM,1}$ กับ $C(x)_{FM,2}$ คือค่าความเข้มข้นของไอออนของวัสดุชนิดแรกและชนิดที่สองที่ตำแหน่งต่างๆตามลำดับ การส่งผ่านสปินมีค่าขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุ ดังนั้นการพิจารณาผลของรอยต่อจึงส่งผลต่อการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

รูปแบบจำลองทั่วไปของการสะสมสปิน

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการสะสมสปิน (\mathbf{m}) ที่เคลื่อนที่แบบหมุนรอบแมกนีไทเซชันและจะเข้าสู่สถานะเสถียรด้วยเวลาที่สปินใช้ในการกลับทิศทาง (spin relaxation time, τ_{sf}) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ [18, 19]

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} + (J/\hbar)\mathbf{m} \times \mathbf{M} = -\frac{\mathbf{m} - \mathbf{m}_\infty}{\tau_{sf}} \quad (3)$$

เมื่อ J คือ ค่าการแลกเปลี่ยนพลังงาน (exchange energy) ของการสะสมสปินกับแมกนีไทเซชัน

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ คือ ค่าคงที่ลดรูปของของพลังค์

\mathbf{M} คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแมกนีไทเซชันที่มีทิศทางใดๆ $\mathbf{M} = M_x\hat{e}_x + M_y\hat{e}_y + M_z\hat{e}_z$

\mathbf{m}_∞ คือ การสะสมสปินที่สถานะเสถียรโดย $\mathbf{m}_\infty \equiv n_{eq}^\uparrow - n_{eq}^\downarrow$

นอกจากนั้นสามารถพิจารณากระแสสปินได้จากกระแสไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนเข้าไปในโครงสร้างวัสดุอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการส่งผ่านสปินของวัสดุดังสมการ

$$\mathbf{j}_m = \beta j_e \mathbf{M} - 2D_0 \left[\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} - \beta \beta' \mathbf{M} \left(\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial x} \right) \right] \quad (4)$$

เมื่อ j_e คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก β และ β' คือพารามิเตอร์โพลาไรเซชันของสปิน (spin polarisation) สำหรับความนำไฟฟ้าและสำหรับค่าคงที่การแพร่ของสปิน จากนั้นทำการพิจารณาผลเฉลยของการสะสมสปินจากสมการที่ (4) และ (5) โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขตการสะสมของสปินซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่ขนาน (\mathbf{m}_\parallel) และตั้งฉาก (\mathbf{m}_\perp) กับทิศทางของแมกนีไทเซชันซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
\mathbf{m}_{\parallel}(x) &= [\mathbf{m}_{\parallel}(\infty) + [\mathbf{m}_{\parallel}(0) - \mathbf{m}_{\parallel}(\infty)]e^{-x/\lambda_{sdl}}] \hat{\mathbf{b}}_1 \\
\mathbf{m}_{\perp,2}(x) &= 2e^{-k_1 x} [u \cos(k_2 x) - v \sin(k_2 x)] \hat{\mathbf{b}}_2 \\
\mathbf{m}_{\perp,3}(x) &= 2e^{-k_1 x} [u \sin(k_2 x) + v \cos(k_2 x)] \hat{\mathbf{b}}_3
\end{aligned} \tag{5}$$

เมื่อ $k_1 \pm ik_2 = \sqrt{\lambda_{sf}^{-2} \pm i\lambda_J^{-2}}$ โดยที่ $\lambda_{sf} = \sqrt{2D_0\tau_{sf}}$, $\lambda_J = \sqrt{2\hbar D_0 / J}$ และ $\lambda_{sdl} = \sqrt{1 - \beta\beta'} \lambda_{sf}$ ค่าคงที่ $m(0)$, u และ v สามารถพิจารณาได้จากเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณรอยต่อโดยกำหนดให้กระแสสปินมีความต่อเนื่องที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นบางๆ ในวัสดุ

หลังจากคำนวณการสะสมสปินและกระแสสปินภายในโครงสร้างวัสดุแล้วสามารถคำนวณหาความต้านทานในแต่ละตำแหน่งได้จากการเปลี่ยนแปลงการสะสมสปิน (gradient of spin accumulation, $\Delta\mathbf{m}$) ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของโครงสร้างวัสดุโดยที่ $\Delta\mathbf{m} = \mathbf{m}_{i+1} - \mathbf{m}_i$ คือผลต่างของการสะสมสปินของชั้นวัสดุที่อยู่ติดกัน เมื่อ i คือลำดับชั้นในโครงสร้างวัสดุ นอกจากนั้นความต้านทานของแต่ละตำแหน่งสามารถคำนวณหาได้จากค่าคงที่แลตทิซ (a) และกระแสสปินของชั้นที่พิจารณา (j_m) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณความต้านทานแม่เหล็กได้ดังสมการ

$$R_i = \frac{|\Delta\mathbf{m}_{\parallel}| ak_B T}{j_m e^2} \tag{6}$$

จากนั้นพิจารณาความต้านทานแม่เหล็กรวมภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กจากผลรวมของค่าเฉลี่ยความต้านทานแม่เหล็กในแต่ละชั้นวัสดุกล่าวคือ $MR = \bar{R}_{FM} + \bar{R}_{IF} + \bar{R}_{NM}$ [21] โดยที่ \bar{R}_{FM} , \bar{R}_{IF} และ \bar{R}_{NM} คือค่าเฉลี่ยของความต้านทานในชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ความต้านทานที่บริเวณรอยต่อและความต้านทานในชั้นวัสดุนอนแมกเนติกตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของความต้านทานในแต่ละชั้นวัสดุสามารถพิจารณาได้จากความต้านทานแม่เหล็กในแต่ละชั้นบางๆ เช่น ค่าเฉลี่ยของความต้านทานในชั้นวัสดุ

เฟอร์โรแมกเนติกซึ่งพิจารณาจาก $\bar{R}_{FM} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_{FM}} R_i}{N_{FM}}$ โดยที่ N_{FM} คือจำนวนของชั้นบางๆ ในบริเวณที่

เป็นชั้นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากซึ่งแสดงด้วยอัตราส่วนของความต้านทานแม่เหล็ก (magnetoresistance ratio, MR ratio) สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

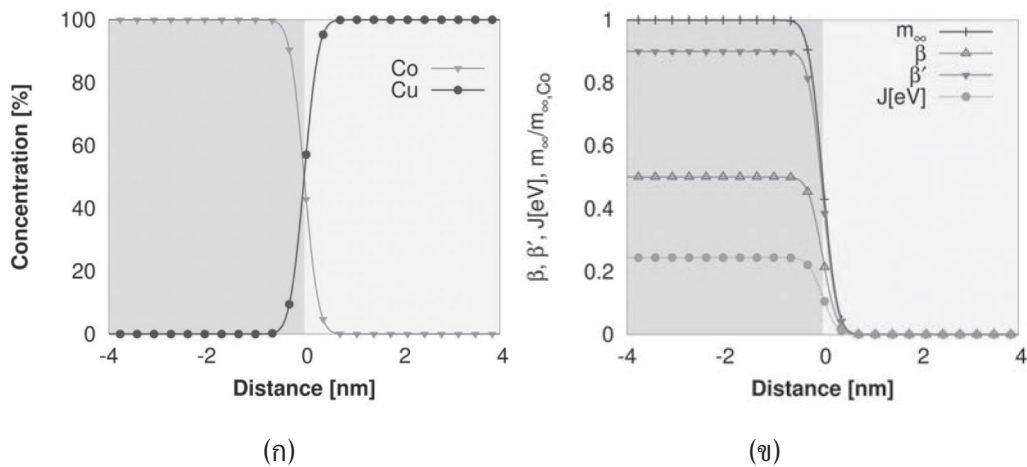
$$MR \text{ ratio}(\%) = \frac{|\text{MR}_{AP} - \text{MR}_P|}{\text{MR}_P} \tag{7}$$

โดยที่ MR_P และ MR_{AP} คือความต้านทานแม่เหล็กรวมในกรณีที่แมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กมีทิศทางเดียวกัน (parallel, P) และตรงข้ามกัน (anti-parallel, AP) ตามลำดับ

ผลการทดลอง

ผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันที่มีต่อความต้านทานแม่เหล็ก

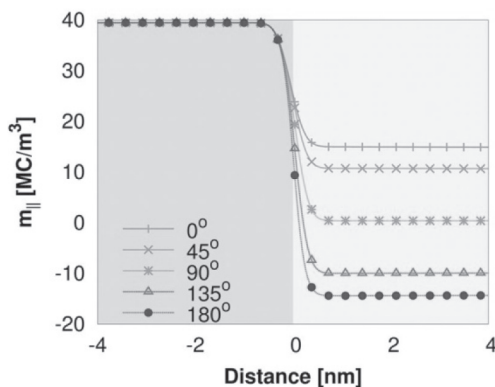
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุสองชั้นที่ประกอบด้วยโคบอลต์กับทองแดง Co(4nm)/Cu(4nm) โดยกำหนดให้แมกนีไทเซชันในชั้นโคบอลต์มีทิศทางการเรียงตัวไปตามทิศทางแกน y และที่บริเวณรอยต่อแมกนีไทเซชันจะเริ่มเปลี่ยนแปลงทิศทางไปที่มุมใดๆ บนระนาบ yz (yz plane) จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าสู่โครงสร้างในทิศทางตามแกน z ซึ่งตั้งฉากกับโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งออกเป็นชั้นบางๆ หลายชั้นโดยแต่ละชั้นหนา t_F ซึ่งมีความหนา 0.0346 อังสตรอม (Å)



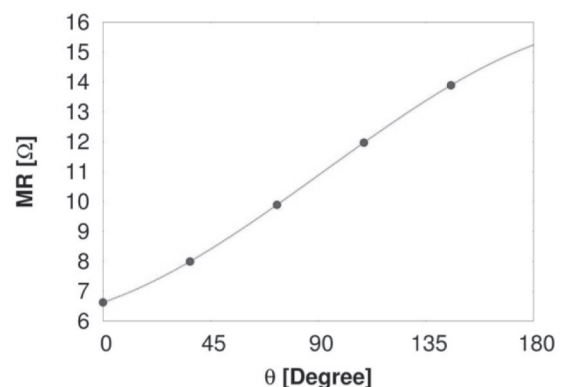
รูปที่ 3 (ก) ความเข้มข้นของไอออนภายในโครงสร้างวัสดุ (ข) พารามิเตอร์การส่งผ่านสปินในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ประกอบด้วยโคบอลต์กับทองแดงโดยกำหนดให้ความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่าเท่ากับ 1 นาโนเมตร

กรณีศึกษาแรกจะทำการพิจารณาผลของมุมที่มีต่อค่าความต้านทานแม่เหล็กโดยกำหนดให้บริเวณรอยต่อมีความกว้าง 1 นาโนเมตรโดยความเข้มข้นของไอออนจะเกิดการผสมกันที่บริเวณรอยต่อ ดังรูปที่ 3 (ก) จากนั้นทำการคำนวณพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในโครงสร้างวัสดุซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3 (ข) พารามิเตอร์การส่งผ่านสปินสำหรับโคบอลต์ที่ตำแหน่งที่ห่างจากรอยต่อหรือ บัลค์ได้แก่ การสะสมสปินที่สภาวะเสถียร (m_∞) มีค่าเท่ากับ $39.45 MC/m^3$ กระแสสปินที่มีขั้วสำหรับความนำไฟฟ้า (β) มีค่าเท่ากับ 0.5 กระแสสปินมีขั้วสำหรับการแพร่ของสปิน (β') มีค่าเป็น 0.9 และพลังงานการแลกเปลี่ยน (J) มีค่าเป็น 0.245 eV สำหรับทองแดงค่าพารามิเตอร์การส่งผ่านสปินทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก พารามิเตอร์การส่งผ่านสปินมีค่าต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเข้มข้นของไอออนที่เกิดจากการผสมกันระหว่างวัสดุสองชนิดที่บริเวณรอยต่อ [22] จากนั้นทำการพิจารณาผลของมุมระหว่างแมกนีไทเซชันในวัสดุสองชั้นซึ่งมีค่า 0° 45° 90° 135° และ 180° โดยป้อนกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ $50 MA/cm^2$ เมื่อคำนวณการสะสมสปินด้วย

สมการที่ (3) ได้ผลดังรูปที่ 4 (ก) โดยพบว่ากระแสสมสปีนตามยาวซึ่งเป็นการสมสปีนในทิศทางที่ขนานกับทิศทางของแมกนีไทเซชันมีขนาดลดลงที่บริเวณรอยต่อเนื่องจากที่บริเวณนี้มีคุณสมบัติของการส่งผ่านสปีนที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นเมื่อมุมระหว่างแมกนีไทเซชันมีค่ามากขึ้นการสมสปีนมีค่าเปลี่ยนแปลงที่บริเวณรอยต่อมากขึ้นเนื่องจากการสมสปีนมีแนวโน้มจัดเรียงตัวไปในทิศทางของแมกนีไทเซชันเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสปีนของอิเล็กตรอนตัวนำกับแมกนีไทเซชันในชั้นวัสดุ เมื่อมุมระหว่างแมกนีไทเซชันมีค่ามากขึ้นส่งผลให้อันตรกิริยามีค่าน้อยลงทำให้สปีนเรียงตัวไปตามทิศทางของแมกนีไทเซชันได้มากขึ้นจากนั้นได้คำนวณความต้านทานแม่เหล็กในแต่ละตำแหน่งของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กพบว่าค่าความต้านทานแม่เหล็กที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสูงสุดเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของการสมสปีนและค่าความต้านทานแม่เหล็กรวมของโครงสร้างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมมีขนาดเพิ่มขึ้นซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [4] กรณีที่แมกนีไทเซชันมีทิศทางตรงกันข้ามความต้านทานแม่เหล็กที่บริเวณรอยต่อจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่แมกนีไทเซชันเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันเนื่องจากเกิดการกระเจิงของสปีนที่บริเวณรอยต่อในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กดังแสดงได้ในรูปที่ 4 (ข)



(ก)



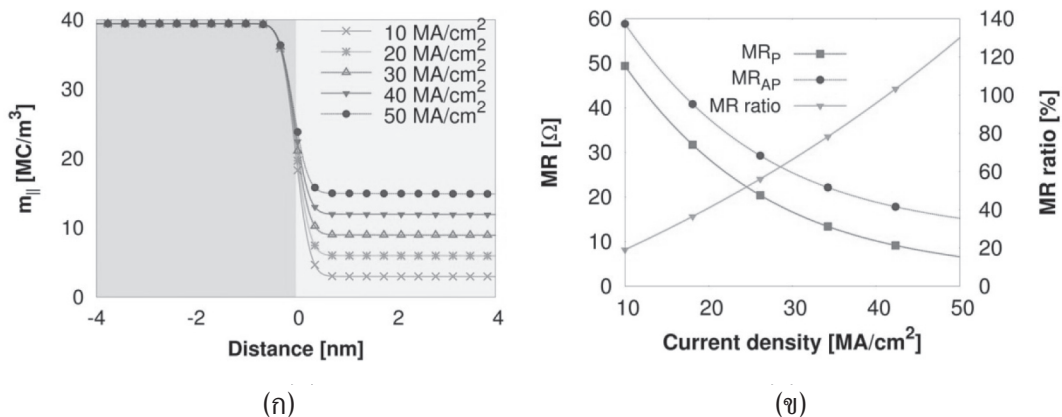
(ข)

รูปที่ 4 (ก) การสมสปีนตามยาวและ (ข) ความต้านทานแม่เหล็กเมื่อพิจารณามุมใดๆ ระหว่างแมกนีไทเซชันในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อความต้านทานแม่เหล็ก

ในลำดับถัดไปจะทำการพิจารณาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อการส่งผ่านสปีนในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กข้างต้นโดยพิจารณาที่บริเวณรอยต่อที่มีความกว้าง 1 นาโนเมตรและป้อนกระแสไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กซึ่งปรับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 10 MA/cm^2 ถึง 50 MA/cm^2 โดยเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกครั้งละ 10 MA/cm^2 เพื่อความง่ายต่อการพิจารณาในกรณีนี้จะพิจารณากรณีที่แมกนีไทเซชันมีทิศทางเดียวกันหรือมุมระหว่างแมกนีไทเซชันมีค่าเป็นศูนย์องศาเนื่องจากการสมสปีนจะมีเฉพาะส่วนประกอบตามยาวเท่านั้นในขณะที่การสมสปีนตามขวางจะมีค่าเป็นศูนย์ จากการคำนวณพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ

กระแสสปินจะทำให้การสะสมสปินมีค่าเพิ่มมากขึ้นในบริเวณรอยต่อกล่าวคือการสะสมสปินถูกขับเคลื่อนให้ออกจากสภาวะสมดุล (Equilibrium value) และมีการส่งผ่านสปินมากขึ้นเนื่องจากที่สภาวะสมดุลค่าการสะสมสปินตามยาวของทองแดงมีค่าเป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความต้านทานรวมในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กในกรณีที่มีทิกเซชันมีทิศทางเดียวกันและตรงข้ามกัน การศึกษาผลความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกแสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินมีแนวโน้มที่จะมีค่าลดลงโดยส่งผลให้ความต้านทานแม่เหล็กมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกให้ผลเช่นเดียวกันกับการเพิ่มระยะการแพร่ของสปิน (spin diffusion length) ซึ่งทำให้การสะสมสปินเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ช้า [23] นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกส่งผลต่อค่าความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากโดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทำให้ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการกระเจิงของสปินมากขึ้นที่บริเวณรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา [24, 25]

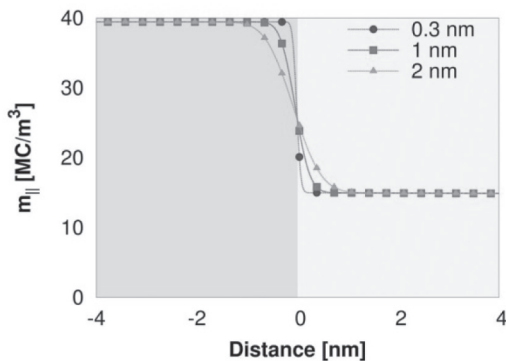


รูปที่ 5 (ก) การสะสมสปินตามยาวในแต่ละตำแหน่งของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กและ (ข) ความต้านทานแม่เหล็กในกรณีเมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอก

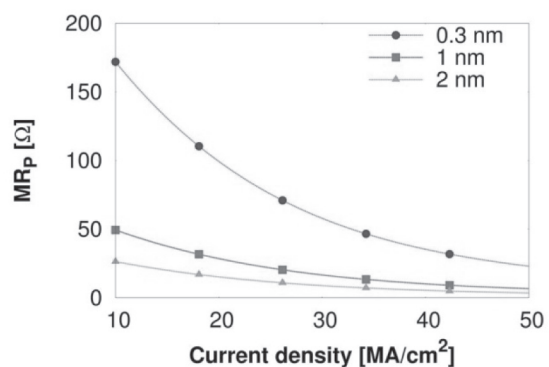
ผลของรอยต่อที่มีต่อการส่งผ่านสปิน

ความกว้างของบริเวณรอยต่อเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการส่งผ่านสปินซึ่งจะทำการศึกษาในลำดับสุดท้าย งานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของรอยต่อโดยศึกษาผลของการแพร่ของอะตอมในบริเวณรอยต่อภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโดยกำหนดให้ความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่าเป็น 0.3, 1 และ 2 นาโนเมตร การสะสมสปินตามยาวมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันเมื่อพิจารณาผลของความกว้างบริเวณรอยต่อซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6 (ก) เมื่อความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่ามากการสะสมสปินจะมีค่าต่อเนื่องเมื่อเทียบกับความกว้างของบริเวณรอยต่อที่มีค่าน้อยหรือรอยต่อแบบอุดมคติเนื่องจากการสะสมสปินมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางทีละน้อยไปตามทิศทางของแมกนีไทเซชันโดยมีลักษณะคล้ายกับแมกนีไทเซชันในกำแพงโดเมน ในขณะที่โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่มีรอยต่อแบบอุดมคติการสะสมสปินจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณรอยต่อซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กที่คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของ

การสะสมสปินมีค่าสูง เนื่องจากแมกนีไทเซชันภายในรอยต่อที่แคบจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและขนาดอย่างรวดเร็วส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินมีค่ามากซึ่งแสดงว่าสปินเกิดการกระเจิงอย่างมากที่บริเวณรอยต่อโดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 (ก) อย่างไรก็ตาม เมื่อความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่ามากขึ้นจะเกิดความต่อเนื่องของการสะสมสปินทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กกรรมมีค่าน้อยกว่ากรณีรอยต่อแบบอุดมคติ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าความต้านทานแม่เหล็กกรรมของโครงสร้างทั้งกรณีที่มีแมกนีไทเซชันมีการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันและทิศทางตรงกันข้ามจะมีค่าน้อยลงเมื่อความกว้างของรอยต่อมากขึ้น ผลการศึกษาที่ได้นี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา [19, 26] ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าความกว้างของบริเวณรอยต่อซึ่งถูกควบคุมโดยความร้อนและระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์มส่งผลอย่างมากต่อค่าความต้านทานแม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปิน



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 (ก) การสะสมสปินตามยาวซึ่งพิจารณาผลของรอยต่อเมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกมีค่าเท่ากับ 50 MA/cm^2 (ข) ความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากเมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าภายนอกและพิจารณาผลของรอยต่อ

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกและผลของบริเวณรอยต่อที่ส่งผลต่อความต้านทานในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโดยสามารถนำไปคำนวณหาความต้านทานแม่เหล็กปริมาณมากซึ่งเป็นปริมาณสำคัญที่สามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล การศึกษาความต้านทานในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กทำได้โดยพิจารณาพฤติกรรมการส่งผ่านสปิน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โครงสร้างวัสดุแม่เหล็กสองชั้นซึ่งประกอบด้วยโคบอลต์กับทองแดง ในกรณีศึกษาแรก ได้ทำการพิจารณาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกที่มีต่อความต้านทานแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กโดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการสะสมสปินที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่วัดความต้านทานในสปินวาล์วแบบคู่ (Dual spin valves) [25] เนื่องจากกระแสสปินภายในโครงสร้างวัสดุมีค่าแปรผันตรงกับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกโดยกระแสสปินที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก

มากขึ้นซึ่งส่งผลให้ความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยลง นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของรอยต่อซึ่งเกิดจากการผสมกันระหว่างอะตอมของธาตุที่ต่างชนิดกัน เมื่อพิจารณาให้ความกว้างของบริเวณรอยต่อระหว่างสองวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นความต้านทานแม่เหล็กจะมีค่าลดลง เนื่องจากในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่ความกว้างของบริเวณรอยต่อมีค่ามากการสะสมสปินมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางทีละน้อยไปตามทิศทางของแมกนีไทเซชันทำให้เกิดการกระเจิงของสปินน้อย จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าความต้านทานในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กนอกจากจะมีค่าขึ้นอยู่กับทิศทางของแมกนีไทเซชันและชนิดของวัสดุความต้านทานแม่เหล็กยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าภายนอกและลักษณะของบริเวณรอยต่อที่เกิดจากกระบวนการปลูกฟิล์มซึ่งส่งผลโดยตรงกับการส่งผ่านสปินภายในโครงสร้างวัสดุแม่เหล็ก วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบหัวอ่านสปินวาล์วในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้มีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 และขอขอบคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์ที่มอบทุนนักวิจัยใหม่ ประจำปี พ.ศ. 2558

เอกสารอ้างอิง

1. Cardoso S., Freitas P.P., de Jesus C., Wei P. and Soares J.C. 2000. Spin-tunnel-junction thermal stability and interface interdiffusion above 300°C. *Applied Physics Letters*. 76: 610-612.
2. Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A., Daughton J.M., von Molnar S., Roukes M.L., et al. 2001. Spintronics: A spin-based electronics vision for the future. *Science*. 294(5546): 1488-1495.
3. Zutic I., Fabian J. and Das Sarma S. 2004. Spintronics: Fundamentals and applications. *Reviews of Modern Physics*. 76(2): 323-410.
4. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petroff F., Etienne P., et al. 1988. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Physical Review B*. 61(21): 2472-2475.
5. Binasch G., Grunberg P., Saurenbach F. and Zinn F. 1989. Enhanced magneto-resistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physical Review B*. 39(7): 4828-4830.
6. Daughton J.M. 1999. GMR applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 192(2): 334-342.
7. Thompson D.A. and Best J.S. 2000. The future of magnetic data storage technology. *IBM Journal of Research and Development*. 44(3): 311-322.

8. Nogués J. and Schuller I.K. 1999. Exchange bias. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 192(2): 203-232.
9. O'grady K., Fernandez-Outon L. and Vallejo-Fernandez G. 2010. A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 322(8): 883-899.
10. Grollier J., Cros V., Hamzic A., George J.M., Jaffres H., Fert A., et al. 2001. Spin-polarized current induced switching in Co/Cu/Co pillars. *Applied Physics Letters*. 78(23): 3663-3665.
11. Katsura H., Nagaosa N. and Balatsky A.V. 2005. Spin current and magnetoelectric effect in noncollinear magnets. *Physical Review Letters*. 95(5): 057205.
12. Ebels U., Radulescu A., Henry Y., Piraux L. and Ounadjela K. 2000. Spin accumulation and domain wall magnetoresistance in 35 nm Co wires. *Physical review letters*. 84(5): 983.
13. Jedema F.J., Nijboer M.S., Filip A.T. and van Wees B.J. 2003. Spin injection and spin accumulation in all-metal mesoscopic spin valves. *Physical Review B*. 67(8): 085319.
14. Simanek E. 2001. Spin accumulation and resistance due to a domain wall. *Physical Review B*. 63(22): 224412.
15. Schwickert M., Coehoorn R., Tomaz M., Mayo E., Lederman D., O'Brien W., et al. 1998. Magnetic moments, coupling, and interface interdiffusion in Fe/V (001) superlattices. *Physical Review B*. 57(21): 13681.
16. Eid K., Fonck R., Darwish M.A., Pratt Jr W. and Bass J. 2002. Current-perpendicular-to-plane-magnetoresistance properties of Ru and Co/Ru interfaces. *Journal of applied physics*. 91(10): 8102-8104.
17. Julliere M. 1975. Tunneling between ferromagnetic films. *Physics letters A*. 54(3): 225-226.
18. Chureemart P. 2013. Models of spin torque using self-consistent solutions of the magnetisation and spin accumulation. *PhD Thesis*. Department of Physics. University of York.
19. Chureemart P., Cuadrado R., D'Amico I. and Chantrell R.W. 2013. Modeling spin injection across diffuse interfaces. *Physical Review B*. 87(19): 195310.
20. Thompson S.M. 2008. The discovery, development and future of GMR: The Nobel Prize 2007. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 41(9): 093001.
21. Bass J. 2015. CPP Magnetoresistance of Magnetic Multilayers: A critical review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 408: 244-320.
22. Shpiro A., Levy P.M. and Zhang S. 2003. Self-consistent treatment of nonequilibrium spin torques in magnetic multilayers. *Physical Review B*. 67(10): 104430.
23. Chureemart P., D'Amico I. and Chantrell R. 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.
24. Jung J., Jin Z., Shiokawa Y. and Sahashi M. 2015. Effect of spin-dependent interface resistance at (001)-oriented Fe/Ag interface on giant magnetoresistance effect. *Applied Physics Express*. 8(7): 073005.
 25. BalázP. and Barnas J. 2010. Nonlinear magnetotransport in dual spin valves. *Physical Review B*. 82(10): 104430.
 26. Read J., Nakatani T., Smith N., Choi Y.-S., York B., Brinkman E., et al. 2015. Current-perpendicular-to-the-plane giant magnetoresistance in spin-valves with AgSn alloy spacers. *Journal of Applied Physics*. 118(4): 043907.

ได้รับบทความวันที่ 27 พฤษภาคม 2559
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 9 สิงหาคม 2559

