



ผลของการอบความร้อนต่อการแพร่ของอะตอมและสมบัติแม่เหล็กในฟิล์มบางอันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร FePd/Ru/CoFe

Effect of annealing on atomic diffusion and magnetic properties in antiferromagnetically coupled FePd/Ru/CoFe thin film

เอกพล แก้วนวม^{1*}, ชัยศักดิ์ อิสโร², ประพนธ์ เลิศลอยปัญญาชัย¹ และวรวิทย์ เมืองรัตน์³

Eakapon Kaewnuam^{1*}, Chaisak Issro², Prapon Lertloypanyachai¹ and Worawut Muangrat³

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

* Correspondent author: Eakapon_9@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร (antiferromagnetic coupling; AFC) ในฟิล์มบางแบบ 3 ชั้น FePd/Ru/CoFe โดยทำการวิเคราะห์ตรวจสอบอิทธิพลของการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์ม และสมบัติทางแม่เหล็กของชั้นฟิล์ม FePd ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ด้วยกระบวนการอบความร้อนแบบไอโซโครนัล จากผลการทดลองพบว่า อันตรกิริยาแบบ AFC ระหว่างชั้นฟิล์มแม่เหล็กแบบเฟอร์โร FePd และ CoFe ปรากฏขึ้นในฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ ค่าคงที่ของความแรงคู่ควบ (coupling strength constant; J) ของอันตรกิริยาแบบ AFC มีค่าลดลงจาก -0.44 mJ/m^2 ไปเป็น -0.24 mJ/m^2 ตามการเพิ่มอุณหภูมิการอบความร้อนจากที่สถานะอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 460°C สำหรับที่อุณหภูมิ 540°C นั้น อันตรกิริยาแบบ AFC เกิดการสลายหายไป และปรากฏเป็นอันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (ferromagnetic coupling; FC) ขึ้นแทนเนื่องจากค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง (Coercivity) ในชั้นฟิล์ม FePd มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของการศึกษาการแพร่กระจายของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค Auger electron spectroscopy (AES) พบว่า ฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe หลังจากถูกนำไปผ่านกระบวนการอบความร้อนนั้น มีการแพร่กระจายตัวของอะตอมระหว่างชั้นฟิล์มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มีอิทธิพลใดๆ ต่อการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC

Abstract

In this Work, the antiferromagnetic coupling (AFC) of FePd/Ru/CoFe trilayer thin film was studied. The influence of interlayer atomic diffusion and magnetic properties of FePd layer on AFC behavior was investigated by isochronal annealing. From the result, the AFC interaction between ferromagnetic FePd and CoFe layer exhibited in the as prepared sample. The AFC coupling strength constant (J) decreased from -0.44 to -0.24 mJ/m^2 with increasing of annealing temperature from room temperature to 460°C . At 540°C , the decay of AFC

interaction was occurred and changed to ferromagnetic coupling (FC) interaction because coercivity in FePd layer was increased. The diffusion of atoms at the interlayer was observed by Auger electron spectroscopy (AES). It was found that the FePd/Ru/CoFe film after annealing process showed a few atomic interlayer diffusion with no influence on the AFC behavior.

คำสำคัญ: อันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร รูทีเนียม เหล็กเพลเลเดียม ค่าคงที่ของความ แรงคู่ควบ

Keywords: Antiferromagnetic coupling, Ru, FePd, Coupling strength constant

1. บทนำ

อันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร (Antiferromagnetic coupling; AFC) เป็นปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางแม่เหล็กและทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ เช่น ถูกนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพในอุปกรณ์ MRAM (Magnetoresistive random access memory) และในหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ นอกจากนี้พบว่า ได้มีการนำอันตรกิริยาแบบ AFC มาใช้เพื่อพัฒนาเสถียรภาพทางความร้อนให้กับชั้นสื่อบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ ทำให้สามารถช่วยเพิ่มการป้องกันข้อมูลสูญหายหรือถูกทำลายเนื่องจากความร้อน วัสดุที่มีอันตรกิริยาแบบ AFC ประกอบไปด้วยชั้นวัสดุแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetism; FM) แทรกด้วยชั้นวัสดุที่ไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก (Non-magnetism; NM) ที่มีความหนาที่เหมาะสม ซึ่งจะ ทำให้แมกนีไตเซชันของชั้นวัสดุ FM ทั้งสองมีทิศที่สวนทางกัน (1) พฤติกรรมของอันตรกิริยาคู่ควบที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น FM ดังกล่าว สามารถพิจารณาได้จากค่าคงที่ของความแรงคู่ควบ (Coupling strength constant; J) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาของชั้น NM และ FM รวมทั้งค่าแมกนีไตเซชันของชั้น FM ทั้งสอง (1,2) โดยในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาค่า J ของฟิล์มบางแบบ 3 ชั้น FM/NM/FM ด้วยการวัดค่าสนามแม่เหล็กอิ่มตัว (Saturation field; H_s) ของชั้นงานดังกล่าว และพบว่า H_s มีการเปลี่ยนแปลงแบบกลับปัดกลับมาตามค่าความหนาของชั้น NM (2-4) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่า J ที่อธิบายไว้ในทฤษฎีแบบ

จำลองบ่อศักย์แบบควอนตัม (Quantum well Model) (5-7) นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Guo และคณะในปี 2010 พบว่า ในกรณีที่ความหนาของชั้น NM มีค่าคงที่สามารถคำนวณหาปริมาณค่า J ได้จากความสัมพันธ์

$$J = -\mu_0 H_s M_{S1} t_1 M_{S2} t_2 / (M_{S1} t_1 + M_{S2} t_2) \quad (1)$$

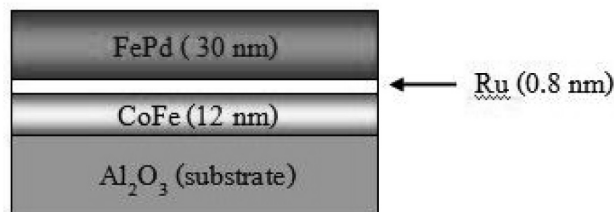
เมื่อ μ_0 คือค่าสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ (Vacuum permeability), $M_{S1, S2}$ คือค่าแมกนีไตเซชันอิ่มตัวของชั้น FM ทั้งสอง และ $t_{1,2}$ คือความหนาของชั้น FM ทั้งสอง (2) ในการนำวัสดุที่มีอันตรกิริยาแบบ AFC ไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นสื่อบันทึกข้อมูลชนิดแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์นั้น วัสดุดังกล่าวต้องมีค่า J ที่เหมาะสม เนื่องจากหากมีขนาดน้อยเกินไปจะทำให้ฮาร์ดดิสก์มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ แต่ถ้ามีขนาดมากเกินไปจะทำให้ต้องจ่ายสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูลสูง (8) ดังนั้น ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า J จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการศึกษาค้นคว้า โดยเฉพาะอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแม่เหล็กของชั้นวัสดุ FM และการแพร่กระจายของอะตอม (Diffusion) ระหว่างชั้นวัสดุ FM กับ NM เนื่องจากผลของพลังงานความร้อน จากการพิจารณาศึกษาพบว่า ฟิล์มโลหะผสม FePd เป็นวัสดุแม่เหล็กที่น่าสนใจและเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นชั้นวัสดุ FM เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า J เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีสมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะทางโครงสร้าง (9,10) โดยค่าสนามแม่เหล็กหักล้าง (Coercivity; H_c) จะมีการแปรผันตามชนิดของโครงสร้างและความเป็นระเบียบของการจัดเรียงตัวของอะตอมในเนื้อวัสดุ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการกำหนดโครงสร้างของ

โลหะผสม FePd คือ สัดส่วนของอะตอม และอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมและการอบความร้อน (11,12) สำหรับชั้นวัสดุ NM นั้น โลหะ Ru เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเนื่องจากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ชั้นอะตอมของ Ru ที่มีความหนาประมาณ 1 nm สามารถทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ในฟิล์มบางแบบหลายชั้น FM/Ru/FM ได้ (2,13-15) แต่ในขณะเดียวกันพบว่า พลังงานความร้อนที่สูงมากพอสามารถก่อให้เกิดการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุ FM กับชั้น Ru ขึ้นได้ (16) ทำให้ความหนาของชั้น Ru เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า J ของอันตรกิริยาแบบ AFC นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำโลหะผสม CoFe ที่มีโครงสร้างแบบ body centered cubic ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมที่เป็นระเบียบ (B2) มาใช้เป็นชั้นวัสดุ FM อีกชั้นหนึ่งเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจากอิทธิพลของความร้อนได้ยาก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสูงกว่า FePd (17)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ในฟิล์มบางแบบ 3 ชั้น FePd/Ru/CoFe โดยมุ่งเน้นทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กของชั้นฟิล์ม FePd รวมทั้งผลของการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม

2. วิธีวิจัย

ฟิล์มบางแบบชั้นเดียว FePd(30nm), CoFe(16 nm) และฟิล์มบางแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ถูกเตรียมขึ้นที่สถาบัน The Institute of Physics and Chemistry of Materials of Strasbourg (IPCMS) ด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริงบนแผ่นวัสดุรองรับอะลูมินา (Al_2O_3) ที่สถานะอุณหภูมิห้อง โดยลักษณะของฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้นที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะชั้นของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ โดยวิธีดีซีและ อาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง

ฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้งหมดถูกนำไปผ่านกระบวนการอบความร้อนแบบไอโซโครนัล (Isochronal) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนที่มีการแปรผันของอุณหภูมิตามช่วงของเวลา ($\Delta T = 20$ K, $\Delta t = 1200$ s) ตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 340, 460 และ 540 °C ตามลำดับ โดยกระบวนการให้ความร้อนดังกล่าวทำในระบบสุญญากาศ เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น ฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd/Ru/CoFe ทั้งที่

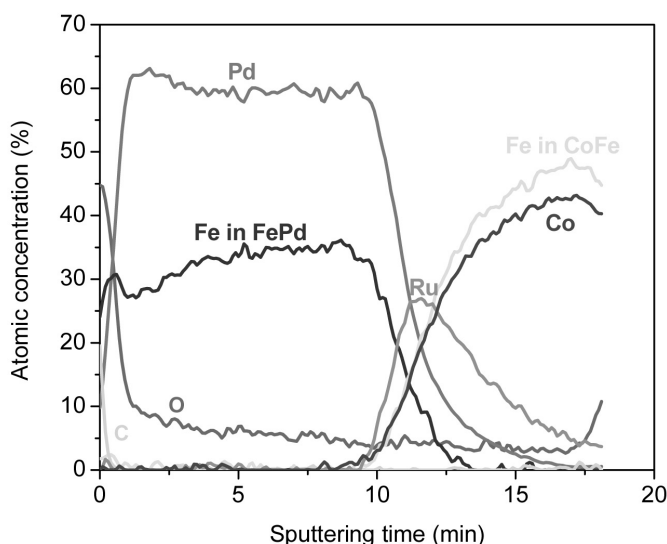
เตรียมได้และที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิต่างๆ ถูกนำไปศึกษาการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มเนื่องจากผลของความร้อนด้วยเทคนิค Auger electron spectroscopy (AES) โดยทำการยิงลำอิเล็กตรอนเข้าไปในฟิล์มตัวอย่าง และวัดพลังงานจลน์ของ Auger electron ที่หลุดออกมา โดยใช้ชุดเครื่องมือ ULVAC, PHI 700 ณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center; TMEC) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลให้อยู่ในรูปของรายละเอียดเชิงความลึก (Depth

profile) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของอะตอมในชั้นฟิล์มกับเวลาที่อิเล็กตรอนถูกยิงเข้าไปในเนื้อฟิล์ม (Sputtering time) ต่อมาฟิล์มแม่เหล็กแบบชั้นเดียว FePd, CoFe และฟิล์มแม่เหล็กแบบ 3 ชั้น FePd/Ru/CoFe ทั้งที่เตรียมได้และที่ผ่านการอบความร้อน ถูกนำไปศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเครื่องแมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนท์แรงสลับ (Alternating Gradient Force Magnetometer; AGFM) รุ่น MicroMag 2009 AGFM ณ สถาบัน IPCMS โดยการผ่านสนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศที่ขนานกับระนาบของแผ่นฟิล์มเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อสมบัติทางแม่เหล็กและลักษณะโครงสร้างของชั้นฟิล์ม FM ทั้งสอง รวมทั้งความแรงคู่ควบของอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้นในฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe

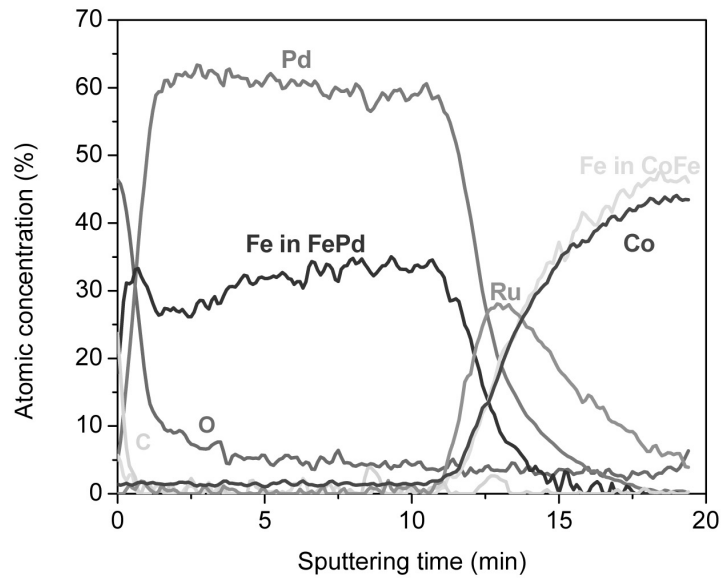
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการวิเคราะห์รายละเอียดเชิงความลึกด้วยเทคนิค AES ของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ แสดงดังรูปที่ 2 โดยเมื่อพิจารณากราฟความเข้มข้นของอะตอม (Atomic concentration)

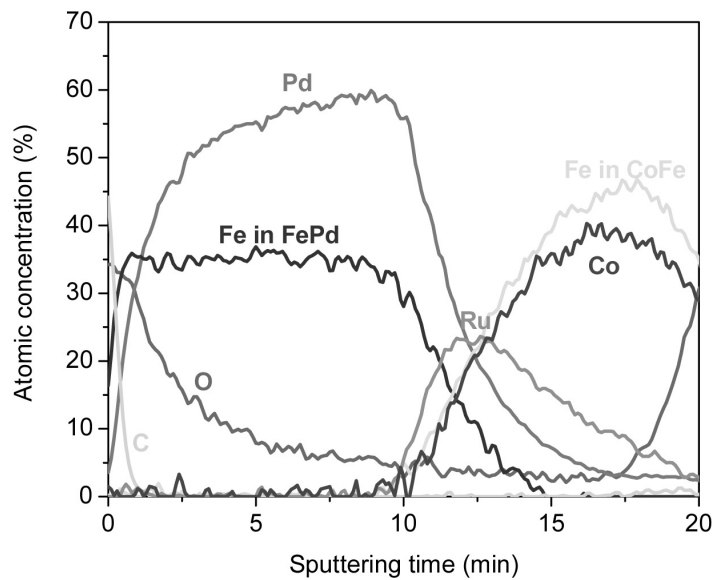
ของ Ru พบว่าปรากฏอยู่ในรูปของพีคที่มีจุดสูงสุดอยู่ที่ค่าความเข้มข้น 26.96% และมีฐานพีคขยายแทรกตัวเข้าไปในพื้นที่ของกราฟความเข้มข้นของอะตอมในชั้นฟิล์ม FePd และ CoFe ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม FePd/Ru/CoFe ที่เตรียมได้มีการแทรกตัวของอะตอมเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม FePd กับ Ru และ Ru กับ CoFe ซึ่งมีปัจจัยที่เป็นสาเหตุสำคัญอยู่ 2 ประการ ปัจจัยแรกเกิดจากการที่ฟิล์มแต่ละชั้นมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยชั้นฟิล์ม FePd, Ru และ CoFe มีโครงสร้างแบบ L1₂ (11,12,18), A3 (hexagonal close-packed) (19) และ B2 (17) ตามลำดับ ทำให้ฟิล์มแบบ 3 ชั้นที่เตรียมได้เกิดความบกพร่อง (defect) ขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น อะตอมบริเวณรอยต่อจึงสามารถเคลื่อนที่แทรกตัวไปยังฟิล์มต่างชั้นได้ในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์ม ปัจจัยที่สองเกิดจากการที่ชั้นฟิล์ม Ru มีความหนาแน่นอย่างมากทำให้อะตอมในชั้นของ FePd และ CoFe บางส่วนสามารถแทรกตัวเข้ามาในชั้นของ Ru ได้ขณะทำการเคลือบฟิล์ม นอกจากนี้พบว่าฟิล์มตัวอย่างมีออกซิเจนปกคลุมบริเวณผิวหน้าฟิล์มและบางส่วนแทรกตัวในเนื้อฟิล์ม สาเหตุอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการอบความร้อน



รูปที่ 2 รายละเอียดเชิงความลึก: ความเข้มข้นของอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์ AES ของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้



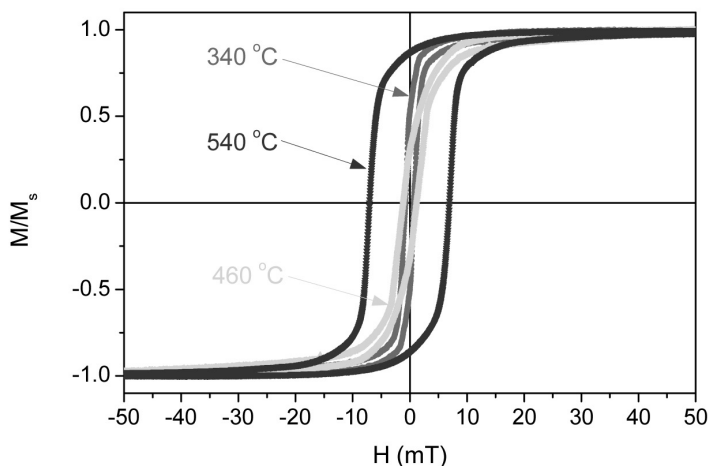
รูปที่ 3 รายละเอียดเชิงความลึก: ความเข้มข้นของอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์ AES ของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/ Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 340 °C



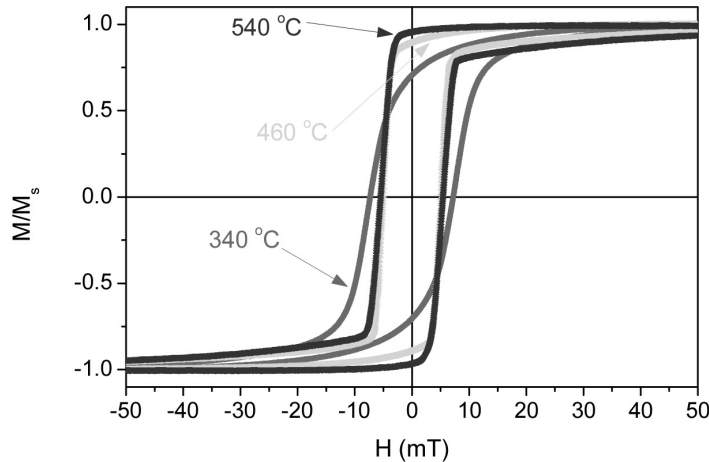
รูปที่ 4 รายละเอียดเชิงความลึก: ความเข้มข้นของอะตอมที่ได้จากการวิเคราะห์ AES ของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/ Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 540 °C

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์รายละเอียดเชิงความลึกของฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe ที่เตรียมได้ (รูปที่ 2) และที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 340 °C (รูปที่ 3) พบว่ามีลักษณะของข้อมูลที่สอดคล้องกัน โดยที่ความเข้มข้นของอะตอม Ru ในฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 340 °C มีจุดสูงสุดอยู่ที่ 28.04% และมีช่วงความกว้างของฐานพีกที่ใกล้เคียงกับค่าของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ ทำให้สามารถระบุได้ว่า การนำฟิล์มตัวอย่างมาอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 340 °C ไม่ส่งผลทำให้เกิดการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มแต่อย่างใด สำหรับฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึง 540 °C นั้น พบว่า จุดสูงสุดของพีกความเข้มข้นของอะตอม Ru มีค่าลดลงเหลือ 23.63% และมีฐานพีกที่ขยายแทรกตัวไปในพื้นที่กราฟข้อมูลของชั้นฟิล์ม CoFe เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 สภาวะก่อนหน้านี้) ดังแสดงในรูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เกิดจากการที่พลังงานความร้อนทำให้ อะตอมของชั้นฟิล์ม Ru บางส่วนแพร่กระจายแทรกตัวเข้าไปในชั้นฟิล์ม CoFe บริเวณรอยต่อ

ระหว่างชั้นฟิล์มทั้งสอง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และมีโอกาสทำให้ความหนาของชั้น Ru เกิดการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมาก นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ 540 °C มีออกซิเจนแทรกตัวเข้ามาอยู่ในชั้นฟิล์ม FePd เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยส่วนใหญ่จะแทรกเข้ามาอยู่ในเนื้อฟิล์มบริเวณผิวหน้าฟิล์ม ทำให้เกิดออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide) เพิ่มขึ้นจากการศึกษารายละเอียดแมกนีไทเซชันเชิงความลึก (Depth magnetization profile) ของ Toney และคณะในฟิล์มบาง CoPtCrB/Ru/CoCr ในปี 2005 พบว่า อันตรกิริยาแบบ AFC มีอิทธิพลต่อแมกนีไทเซชันในชั้นฟิล์ม CoPtCrB บริเวณผิวหน้าฟิล์มน้อยกว่า แมกนีไทเซชันบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น CoPtCrB/Ru และบริเวณตรงกลางชั้นฟิล์ม CoPtCrB (20) ทำให้ผู้วิจัยสามารถระบุได้ว่าการเกิดออกไซด์ของเหล็กในเนื้อฟิล์ม FePd บริเวณผิวหน้าฟิล์มดังกล่าว ไม่เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรม การเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5 วงฮิสเทอรีซิสที่มีการจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวกับระนาบของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 340 °C, 460 °C และ 540 °C



รูปที่ 6 วงฮิสเทอรีซิสที่มีการย้ายสนามแม่เหล็กในทิศที่ขนานกับระนาบของฟิล์มตัวอย่าง CoFe(16 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 340 °C, 460 °C และ 540 °C

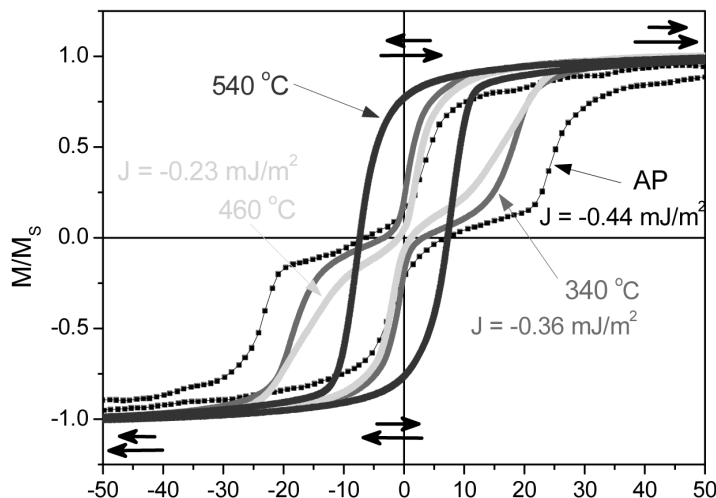
สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กนั้น ฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว FePd ถูกนำไปวัดวงฮิสเทอรีซิสที่มีการให้สนามแม่เหล็กในทิศที่ขนานกับระนาบของแผ่นฟิล์มด้วย AGFM ดังแสดงผลในรูปที่ 5 จากการพิจารณาพบว่า H_C ของฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 340 °C และ 460 °C มีค่า H_C ต่ำอยู่ที่ประมาณ 0.71 mT และ 1.41 mT ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการมีสมบัติทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก โดยที่สถานะอุณหภูมิ 460 °C นั้น H_C มีค่าสูงกว่าที่สถานะอุณหภูมิ 340 °C เล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่สูงขึ้นทำให้อะตอมของ Fe และ Pd บางส่วนเริ่มมีการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น รวมทั้งเกิดการลดความบกพร่องในโครงสร้างของชั้นฟิล์มลงเล็กน้อย แต่สำหรับที่อุณหภูมิ 540 °C นั้น ฟิล์มดังกล่าวมีค่า H_C ประมาณ 6.97 mT ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นมาก โดยสามารถอธิบายได้ว่า พลังงานความร้อนที่สถานะอุณหภูมิดังกล่าว มีค่าสูงมากพอทำให้อะตอมในฟิล์ม FePd ส่วนใหญ่เกิดการเคลื่อนที่ และมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบสูงขึ้นจากเดิมมาก อีกทั้งยังทำให้ความบกพร่องในชั้นฟิล์มลดลง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กเกิดการแมกเนไทซ์ในทิศที่ขนานกับแนวระนาบของแผ่นฟิล์มได้ง่ายขึ้น ฟิล์มดังกล่าวจึงมีค่า Magnetocrystalline anisotropy constant (K_u) สูงขึ้น และจากความสัมพันธ์

$H_C \approx 2K_u / M_s$ (21) ทำให้ที่อุณหภูมิ 540 °C ฟิล์มโลหะผสม FePd จึงมีค่า H_C ที่เพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ผลการเพิ่มขึ้นของค่า H_C เนื่องจากอะตอมในฟิล์ม FePd มีความเป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น และโครงสร้างฟิล์มมีความบกพร่องลดลง สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ความเป็นระเบียบของอะตอมด้วยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าตกค้าง (Residual resistivity; REST) และการศึกษา H_C ด้วยการวัดวงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มบาง FePd ที่ผ่านการอบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ในงานวิจัยของ Issro และคณะก่อนหน้านี้ (9) สำหรับฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว CoFe นั้น เมื่อนำไปวิเคราะห์ฮิสเทอรีซิสด้วย AGFM ดังแสดงผลในรูปที่ 6 ทำให้ทราบได้ว่าอิทธิพลของความร้อนไม่มีผลกระทบต่อลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มตัวอย่างดังกล่าว เนื่องจากค่า H_C ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิการอบความร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ในการศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีผลต่ออันตรกิริยาแบบ AFC ของฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd/Ru/CoFe ทั้งที่เตรียมได้ และที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิต่างๆ นั้น เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวัดวงฮิสเทอรีซิสที่มีการให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศที่ขนานกับระนาบของแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยเครื่อง AGFM ดังแสดงผลในรูปที่ 7 พบว่าอันตรกิริยาแบบ

AFC มีการปรากฏขึ้นในฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ (AP) รวมทั้งฟิล์มตัวอย่างที่ถูกนำไปผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 340 °C และ 460 °C โดยสังเกตได้จาก

ลักษณะของวงฮิสเทอรีซิสที่มีรอยหยักเสมือนขึ้นบันได แต่ที่อุณหภูมิ 540 °C นั้น ไม่มีการปรากฏของฮิสเทอรีซิสแบบ AFC ขึ้นในฟิล์มตัวอย่าง



รูปที่ 7 วงฮิสเทอรีซิสที่มีการจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศที่ขนานกับระนาบของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ (AP) และที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 340 °C, 460 °C และ 540 °C

การอธิบายพฤติกรรมการเกิดฮิสเทอรีซิสแบบ AFC จากวงฮิสเทอรีซิสในภาพที่ 6 นั้น ได้กำหนดให้สัญลักษณ์ลูกศรสั้นและลูกศรยาวแทนการจัดวางตัวของแมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม FePd (M_1) และชั้นฟิล์ม CoFe (M_2) ตามลำดับ ขณะที่สนามแม่เหล็กจากภายนอก (H) จ่ายให้กับฟิล์มตัวอย่างมีค่าประมาณ 55 mT (สำหรับฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้; AP), 45 mT (สำหรับฟิล์มที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 340 °C) และ 30 mT (สำหรับฟิล์มที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 460 °C) นั้น ฮิสเทอรีซิสแบบ AFC จะถูกทำให้หมดค่าดังลง ซึ่ง M_1 และ M_2 จะขนานกันและมีทิศทางเดียวกับทิศของ H ทำให้แมกนีโตเซชันรวมของฟิล์มตัวอย่างมีค่าอิมิต์ และเรียกสนามแม่เหล็กที่ให้จากภายนอกแล้วทำให้ฟิล์มตัวอย่างมีแมกนีโตเซชันอิมิต์ว่า H_{ex1} ต่อมาเมื่อลดค่า H ลงไปจนถึงค่า Exchange field ของชั้น FePd (H_{ex1}) พบว่า ค่าแมกนีโตเซชันรวมของชั้นงานตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการสลับ

ทิศทางของ M_1 ไปในทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศของ M_2 และ H อย่างฉับพลัน ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของฮิสเทอรีซิสแบบ AFC ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น FePd และ CoFe ต่อมาเมื่อทำการลดสนาม H ที่ให้กับชั้นงานตัวอย่างไปที่ 0 mT พบว่า M_1 และ M_2 ยังคงมีทิศทางสวนทางกันเนื่องจากฮิสเทอรีซิสแบบ AFC และเมื่อทำการจ่ายสนาม H ให้มีทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศทางเดิมไปจนถึงค่า Exchange field ของชั้น CoFe (H_{ex2}) พบว่า M_2 จะมีการสลับทิศทางไปจากเดิมทำให้มีทิศทางเดียวกันกับ M_1 ซึ่งสังเกตได้จากการที่ค่าแมกนีโตเซชันรวมของชั้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นในทางลบอย่างรวดเร็ว และจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ H มีค่าประมาณ -55 mT (AP), -45 mT (340 °C) และ -30 mT (460 °C) หลังจากนั้น เมื่อทำการลดสนาม H กลับไปที่ 0 mT และจ่าย H ไปในทิศทางเดิมจนมีค่าถึง 55 mT (AP), 45 mT (340 °C) และ 30 mT (460 °C) อีกครั้ง พบว่า วงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวิเคราะห์มีลักษณะคล้ายกับขึ้นบันได ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดฮิสเทอรีซิสแบบ AFC

ขึ้นในฟิล์มตัวอย่างดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มตัวอย่างด้วย AES ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่า ความหนาของชั้น Ru มีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการอบความร้อนได้น้อยมาก ทำให้สามารถใช้สมการที่ (1) พิจารณาคำนวณค่า J ของอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้น (แสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณดังตารางที่ 1) ได้เท่ากับ -0.44 mJ/m^2 (AP), -0.36 mJ/m^2 (340°C) และ -0.24 mJ/m^2 (460°C) ตามลำดับ ซึ่งมีขนาด

ที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในส่วนของฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 540°C นั้น พบว่าไม่ปรากฏอันตรกิริยาแบบ AFC ขึ้นแต่จะแสดงอันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetic coupling; FC) แทน โดยแมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม FePd และ CoFe มีการวางตัวอยู่ในทิศทางเดียวกัน สังเกตได้จากวงฮิสเทอรีซิสที่มีความเรียบไม่ปรากฏรอยหักแบบขึ้นบันได ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่า J ของฟิล์มตัวอย่างที่สภาวะต่างๆ

T	H_S		M_{S1}		M_{S2}		J (mJ/m ²)
	(mT)	(A/m)	(emu/cm ³)	(A/m)	(emu/cm ³)	(A/m)	
AP	54.3189	4.3226×10^4	562.5277	5.6253×10^5	1,289.8321	1.2898×10^6	-0.44
340°C	45.3609	3.6097×10^4	555.4324	5.5543×10^5	1,283.8138	1.2838×10^6	-0.36
460°C	29.4770	2.3457×10^4	535.4989	5.3550×10^5	1,286.0130	1.2860×10^6	-0.23

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ J/A}^2\text{m}$$

$$t_1 = 30 \text{ nm}, t_2 = 12 \text{ nm}$$

$$\text{หมายเหตุ} : 1 \text{ T} = 1 \times 10^4 \text{ Oe และ } 1 \text{ Oe} = \frac{1 \times 10^3}{4\pi} \text{ A/m ดังนั้น } 1 \text{ T} = \frac{1 \times 10^7}{4\pi} \text{ A/m}$$

$$: 1 \text{ emu/cm}^3 = 10^3 \text{ A/m}$$

เมื่อนำผลการทดลองทั้งหมดมาพิจารณาทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ความร้อนทำให้การแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม Ru กับชั้นฟิล์ม FM ทั้งสองเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่มีผลกระทบต่ออันตรกิริยาแบบ AFC เนื่องจากความหนาของชั้น Ru มีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมาก สำหรับอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างของชั้นวัสดุ FM เนื่องจากผลของความร้อนนั้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบความร้อนมีค่าสูงมากพอ ทำให้อะตอมในชั้นฟิล์ม FePd เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ชั้นฟิล์มดังกล่าวจะมีค่า H_C เพิ่มขึ้น การที่ชั้นฟิล์ม FePd มีค่าสนามแม่เหล็กหักล้างที่สูงขึ้นนั้น ส่งผลให้แมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม FePd เกิดการต้านทานต่อการเหนี่ยวนำจากอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้น โดยอันตรกิริยาดังกล่าวสามารถเหนี่ยวนำให้แมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม FePd มีทิศทางที่สวนทางกับแมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม CoFe ได้น้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกทำให้แมกนีโตเซชันโดยรวม

ของฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe เกิดการอ้อมตัวได้ง่ายขึ้น (H_S มีค่าลดลง) หลังจากผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 340°C และ 460°C จากความสัมพันธ์ $|J| \propto H_S$ ที่สังเกตได้จากสมการที่ (1) ทำให้ค่า J ที่คำนวณได้มีขนาดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบความร้อน อันแสดงให้เห็นถึงการลดลงของความแรงคู่ควบของอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิ 540°C นั้น การที่ชั้นโลหะผสม FePd มีค่า H_C สูงขึ้นจากเดิมมาก ทำให้อันตรกิริยาแบบ AFC หดกำลังลง โดยไม่สามารถเหนี่ยวนำให้แมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม FePd มีทิศทางที่สวนทางกับแมกนีโตเซชันของชั้นฟิล์ม CoFe ได้อีกต่อไป และปรากฏอันตรกิริยาคู่ควบแม่เหล็กแบบ FC ขึ้นแทน

4. สรุป

ฟิล์มแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้นั้น เกิดความบกพร่องในเนื้อ

ฟิล์มชั้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น เนื่องจากฟิล์มในแต่ละชั้นมีโครงสร้างที่แตกต่างกันและชั้นฟิล์ม Ru มีความหนาที่น้อยมาก โดยมีการปรากฏของอันตรกิริยาแบบ AFC ขึ้นในฟิล์มตัวอย่างดังกล่าว ซึ่งมีค่า J เท่ากับ -0.44 mJ/m^2 เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบไอโซโครนัล ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$, $\Delta t = 1200 \text{ s}$) พบว่าพลังงานความร้อนมีผลทำให้เกิดการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม Ru กับชั้นฟิล์ม CoFe ขึ้นเพียงเล็กน้อย และไม่มีผลกระทบต่อการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC แต่ในขณะเดียวกันพลังงานความร้อนส่งผลให้โครงสร้างของชั้นฟิล์ม FePd เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอะตอมมีการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งมีความบกพร่องในเนื้อฟิล์มลดลง ส่งผลให้ชั้นฟิล์มดังกล่าวมีค่า H_C เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าว มีอิทธิพลทำให้อันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้นมีความแรงคู่ควบลดลง โดยสังเกตได้จากการที่ค่า J ของฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe หลังจากผ่านกระบวนการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 340°C และ 460°C มีค่าเท่ากับ -0.36 mJ/m^2 และ -0.24 mJ/m^2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การที่ชั้นฟิล์ม FePd มีค่า H_C เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้อันตรกิริยาแบบ AFC สามารถเหนี่ยวนำให้แมกนีไทเซชันของชั้นฟิล์ม FePd มีทิศทางที่สวนทางกับแมกนีไทเซชันของชั้นฟิล์ม CoFe ได้น้อยลง และเมื่อทำการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 540°C ไม่พบว่ามีอันตรกิริยาแบบ AFC เกิดขึ้นเนื่องจากชั้นฟิล์ม FePd มีค่า H_C ที่เพิ่มสูงขึ้นมาก โดยปรากฏอันตรกิริยาแบบ FC ขึ้นแทน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยและพัฒนา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงที่ให้ทุนและสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Fullerton EE, Margulies DT, Schabes ME, Carey M, Gurney B, Moser A, et al. Antiferromagnetically coupled magnetic media layers for thermally stable high-density recording. *Applied Physics Letters*. 2000;77(23):3806-3808.
- (2) Guo ZB, Zong BY, Qiu JJ, Luo P, An LH, Meng H, et al. Tuning exchange coupling by replacing CoFe with amorphous CoFeB in the CoFe/Ru/CoFe synthetic antiferromagnetic structure. *Solid State Communications*. 2010;150:45-48.
- (3) Jiang J, Tezuka N, Inomata K. Indirect exchange spring between FePt and Fe with a Ru interlayer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006;302:40-46.
- (4) Chen SY, Yao YD, Wu JM. Magnetoresistance and interlayer coupling studies in FePt/Os/FePt thin films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;310:1914-1916.
- (5) A. Kaiser. *Magnetization Dynamics in Magnetically Coupled Heterostructures*. Berlin: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek Verlag; 2009.
- (6) Mills DL, Bland JAC, *Nanomagnetism: Ultrathin films, Multilayers and Nanostructures*. Amsterdam: Elsevier B.V.; 2006.
- (7) Ortega JE, Himpsel FJ, Mankey GJ, Willis RF. Quantum-well states and magnetic coupling between ferromagnets through a noble-metal layer. *Physical Review B*. 1993;47(3):1540-1552.
- (8) Richter HJ, Member IEEE, Girt E. How Antiferromagnetic Coupling Can Stabilize Recorded Information. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002;38(5):1867-1872.

- (9) Issro Ch, Pußschl W, Pfeiler W, Rogl PF, Soffa WA, Acosta M, et al. Temperature-driven changes of order and magnetism in FePd thin films and thin foil. *Scripta Materialia*. 2005;53: 447–452.
- (10) Perez-Landazabal JJ, Gomez-Polo C, Recarte V, Vergara J, Ortega RJ, Madurga V. Effect of the decomposition process in the magnetic properties of disordered FePd alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1999;196-197:179-181.
- (11) Cohen-Karni T, Vlassak JJ, Sugimura Y. Fe-Pd Alloy Ferromagnetic Shape Memory Thin Films, 2003.
- (12) Burzo E, Vlaic P. Magnetic properties of iron-palladium solid solutions and compounds. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2010;12(9):1869-1878.
- (13) Gavrilă H. New solutions for improving recording performance of magnetic recording media. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2004;6(3):891-903.
- (14) Hu XF, Liang Q, Li HQ, He XX, Wang X, Zhang W. Superlattice CoCrPt/Ru/CoFe structure fabricated by pulsed laser deposition, *Applied Surface Science*, 2006, 252, 4625-4627.
- (15) Qiu JJ, Li KB, Han GC, Zheng YK, Guo ZB, Wu YH. Synthetic $\text{Co}_{50}\text{Pt}_{50}/\text{Ru}/\text{CoFe}$ hard-soft trilayer in spin valves. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006;303:e179-e179.
- (16) Wang F, Xu XH, Liang Y, Zhang Jing, Zhang Jun. Perpendicular $\text{L1}_0\text{-FePt/Fe}$ and $\text{L1}_0\text{-FePt/Ru/Fe}$ graded media obtained by post-annealing. *Materials Chemistry and Physics*. 2011;126:843-846.
- (17) Kubaschewski O. *Iron-Binary Phase Diagrams*. Dusseldorf: Springer-Verlag; 1982. p. 28.
- (18) Wang CF, Kuo KM, Lin CY, Chern G. Magnetic anisotropy in $\text{Fe}_x\text{Pd}_{1-x}$ ($x = .30, .44, .55, .67$ and $.78$) alloy film grown on $\text{SrTiO}_3(001)$ and $\text{MgO}(001)$ by molecular beam epitaxy. *Solid State Communications*. 2009;149:1523-1526.
- (19) Thambidurai C, Kim YG, Stickney JL. Electrodeposition of Ru by atomic layer deposition (ALD). *Electrochimica Acta*. 2008;53:6157–6164.
- (20) Toney MF, Borchers JA, O'Donovan KV, Majkrzak CF, Margulies DT, Fullerton EE. Magnetization profile in antiferromagnetically coupled recording media. *Applied Physics Letters*. 2005;86:162506.
- (21) Buschow KHJ, de Boer FR. *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*, New York: Kluwer Academic Publishers; 2003. p. 112.