

เครื่องมือวัดความต้านทานทางแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มบาง แบบจีเอ็มอาร์ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ดร. อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ประภรณ์ชัย พลรัตนศักดิ์

นักศึกษาระดับปริญญาโท

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเครื่องมือวัดความต้านทานทางแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มบางแบบจีเอ็มอาร์ (GMR) ซึ่งความต้านทานของแผ่นฟิล์มนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการป้อนสนามแม่เหล็กภายนอก เครื่องมือนี้ได้ออกแบบให้ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ทั้งหมดเพื่อความสะดวกและความเชื่อถือได้ ซึ่งผลของการวัดสัญญาณรบกวนนั้นจะต้องนำมาพิจารณาด้วย

สำหรับแผ่นฟิล์มบางที่ใช้ทดสอบเครื่องมือชุดนี้เป็นแผ่นฟิล์มชนิด Fe/Cr แบบมัลติเลเยอร์ (Fe/Cr Multilayer) โดยในการวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก ได้มีการเปลี่ยนมุมของการวัดตามแกนต่างๆของแผ่นฟิล์มและขนาดของกระแสไบอัส ซึ่งพบว่า เมื่อกระแสไบอัสมีค่าต่ำจะทำให้ค่า GMR(%) มีค่าสูง รวมทั้งพบว่าค่า H_c (coercivity) จะมีค่ามากที่สุดที่มุมของการวัดอยู่ที่มุมศูนย์องศา (easy axis) และความต้านทานทางแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์นั้น จะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของการวัด เครื่องมือนี้ยังสามารถนำไปศึกษาคุณสมบัติอีกหลายด้านของแผ่นฟิล์มได้

Computer Controlled Instrument for Measuring Magnetoresistance of GMR Film

Dr. Apirat Siritaratiwat

Assistant Professor

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Khon Kaen University

Prakornchai Polrutanask

Graduate Degree Student

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Khon Kaen University

Abstract

This paper shows an instrument for measuring magnetoresistance of GMR films that the resistance is changed as a function of an applied magnetic field. This instrument is designed to be controlled by a computer for the convenience and the measurement reliability and so, the noise measurement is also concerned.

A GMR film used for testing this instrument is a *Fe/Cr* multilayer. This is done by measuring the resistance as the angular measurement and the bias current are changed. It is found that when a bias current is lower the percentage of GMR is higher. The coercivity, H_c , reaches its maximum value at the zero degree, or an easy axis, of film measurement. However, this instrument can measure other film properties as well.

บทนำ

ปัจจุบันหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ได้ใช้แผ่นฟิล์มบางแบบจีเอ็มอาร์อย่างแพร่หลายทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของมันที่ตอบสนองเร็วต่อสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องรู้คุณสมบัติในหลายด้านของแผ่นฟิล์มบางชนิดนี้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

คุณสมบัติที่สำคัญของแผ่นฟิล์มบางชนิดนี้คือการเปลี่ยนความต้านทานทางแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอก ดังนั้น เครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อวัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กนี้จึงประกอบด้วยสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนของวงจรควบคุมกระแสเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ และการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก สำหรับส่วนที่สองคือ ส่วนที่สร้างกระแสไฟฟ้าขนาดต่ำเพื่อจ่ายแก่แผ่นฟิล์มและวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาเพื่อใช้คำนวณหาความต้านทานตามวิธีการของวานเดอพอนซ์เทคนิค (Van der Pauw technique)[1] ดังนั้น ในส่วนนี้ต้องการผลของการวัดที่ละเอียดและมีสัญญาณรบกวนต่ำ

เครื่องมือนี้สามารถที่จะวัดคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มอีกหลายด้านด้วยกัน สำหรับแผ่นฟิล์มที่ใช้ทดสอบนี้คือ *Fe/Cr* multiplayer

ทฤษฎีและการศึกษาเบื้องต้น

คุณสมบัติของแผ่นฟิล์มบางแบบจีเอ็มอาร์

แผ่นฟิล์มบางทางแม่เหล็กชนิด Giant Magnetoresistance นั้นจะเรียกโดยทั่วไปว่าแผ่นฟิล์ม GMR โดยเมื่อแผ่นฟิล์มนี้ถูกวางในสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงพอประมาณ แมกนีโตเซชันที่อยู่ในแผ่นฟิล์มจะขนานกันและมีทิศทางเดียวกัน (parallel) ทำให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก (magnetoresistance) มีค่าต่ำ แต่เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์หรือน้อยมาก แมกนีโตเซชันนี้จะหมุนตัวสลับกัน (antiparallel) ทำให้ความต้านทานทางแม่เหล็กมีค่าสูง ค่าGMR (%) [2] คำนวณได้โดย

$$GMR(\%) = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ R_{max} คือ ความต้านทานที่มีค่าสูงสุด (ที่ $H \approx 0$ Oe) และ R_{min} คือ ความต้านทานที่มีค่าต่ำสุดหรือคงตัว (saturated) ภายในช่วงสนามไฟฟ้าที่กำหนด (ที่ $H \gg$)

การวัดความต้านทานโดยวิธี *four point probe*

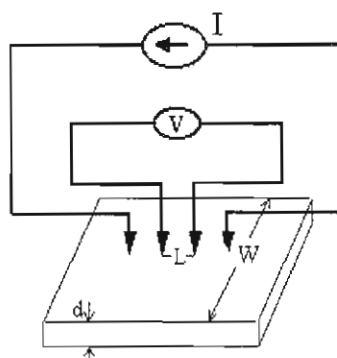
การวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์มบางจะใช้วิธีการของวานเดอพอนซ์ แบบ four point probe ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 จากรูปจะเห็นว่าที่โพรบภายนอกจะใช้สำหรับจ่ายกระแสขนาดต่ำและมีขนาดคงที่ ขณะที่โพรบภายในใช้สำหรับวัดความต่างศักย์ การวัดความต่างศักย์จะวัดโดยดิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิฟายเออร์ (differential amplifier) ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงและมีสัญญาณรบกวนต่ำ

ดังนั้น โดยวิธีการนี้ความต้านทานของโพรบจะไม่มีผลต่อการวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์ม การวัดความต่างศักย์ควรจะอยู่ใกล้ทิศทางของกระแสที่ไหลในแผ่นฟิล์มมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อความถูกต้องของการวัด ดังนั้น จะคำนวณความต่างศักย์ได้จาก[3]

$$v = \rho \frac{L}{Wd} I \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้า W คือ ความกว้างของเส้นทางที่กระแสผ่าน L คือ ความยาวของเส้นทางที่กระแสผ่าน และ d คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม

จากสมการที่ (2) ถ้ากระแสมีค่าคงที่ ความต่างศักย์จะเปลี่ยนเมื่อความต้านทานเปลี่ยนไป



รูปที่ 1 แสดงวิธีการวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์มโดยใช้ four point probe

สนามแม่เหล็กที่ผลิตจากแม่เหล็กไฟฟ้า

การสร้างสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnet) ที่ได้จากการนำขดลวดทองแดงมาพันรอบแกนเหล็กที่มีค่าความซึมซับทางแม่เหล็กสูง (permeability) ซึ่งจะผลิตสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงใน Air Gap ของแม่เหล็กไฟฟ้าตามรูปที่ 2 โดยสมการที่แสดงค่าของความซึมสนามแม่เหล็กที่ได้จากวงจรแม่เหล็กตาม Ampere's Law[4] สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\oint H dL = NI \quad (3)$$

$$H_i l_i + H_g l_g = NI \quad (4)$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{\psi}{A_g \mu_0} \quad (5)$$

$$H_i = \frac{B_i}{\mu} = \frac{\psi}{A_i \mu} \quad (6)$$

$$\psi = \frac{NI}{\frac{l_i}{A_i \mu} + \frac{l_g}{A_g \mu_0}} \quad (7)$$

ดังนั้น ค่าความซึมสนามแม่เหล็กใน Air Gap มีค่าเป็น

$$H_g = \frac{NI}{\left(\frac{l_i}{A_i \mu} + \frac{l_g}{A_g \mu_0} \right) A_g \mu_0} \quad (8)$$

โดยที่ H_g คือ ความซึมสนามแม่เหล็กใน Air Gap H_i คือ ความซึมสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก l_g คือ ความยาวใน Air Gap l_i คือ ความยาวของเส้นทางที่สนามแม่เหล็กผ่านในแกนเหล็ก A_g คือ พื้นที่ใน Air Gap A_i คือ พื้นที่แกนเหล็กที่สนามแม่เหล็กวิ่งผ่าน B_g คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กใน Air Gap B_i คือความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก μ_0 คือ permeability ใน Air Gap μ คือ permeability ในแกนเหล็ก I คือ กระแสที่จ่ายให้กับแม่เหล็กไฟฟ้า N คือ จำนวนขดลวดรอบแกนเหล็ก และ ψ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก

ส่วนประกอบของวงจรและการทำงานของระบบ

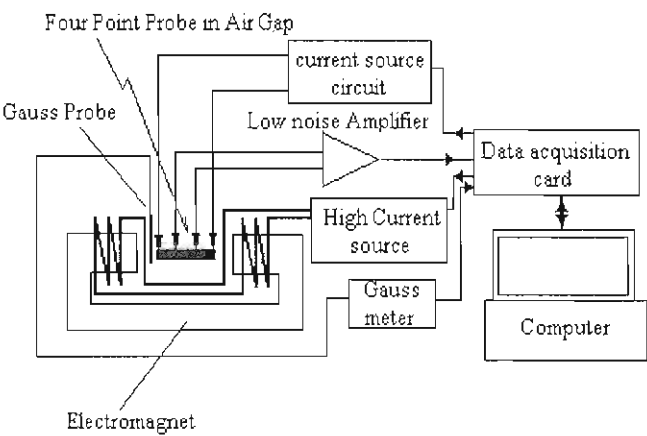
เครื่องมือนี้มีส่วนประกอบคือ ส่วนของการวัดความต้านทานทางแม่เหล็กที่ประกอบด้วย วงจรสร้างกระแสคงที่ที่มีความเสถียรภาพสูงและสามารถจ่ายกระแสสูงสุด 1.5 mA โดยวงจรจะถูกควบคุมโดยการป้อนโปรแกรมผ่าน DAQ เพื่อป้องกันการเกิดกระแสไปค์ (spike current) ในช่วงเริ่มต้นซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นฟิล์ม วงจรสร้างกระแสนี้จึงถูกออกแบบให้จ่ายกระแสเพิ่มขึ้นแบบสเต็ป ครึ่งละ 0.15 mA/sec จนถึงกระแสสูงสุด 1.5 mA

ในส่วนของการวัดความต่างศักย์จะใช้วงจรขยายสัญญาณแบบมีสัญญาณรบกวนต่ำ และมี Common Mode Rejection Ratio (CMRR) สูง สำหรับวงจรนี้เลือกอัตราการขยายที่ 100 เท่า สัญญาณที่ได้จากเอาพุตของวงจรขยายสัญญาณจะต่อเข้ากับ 12-bit ADC ของ DAQ เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป

ส่วนที่สองคือ ส่วนที่สร้างกระแสสูงเพื่อจ่ายให้แก่แม่เหล็กไฟฟ้า นั้น จะสามารถจ่ายกระแสที่มีความเสถียรภาพได้ โดยสามารถจ่ายกระแสคงที่สูงสุดในช่วง -1.5 ถึง $+1.5$ A ซึ่ง จะสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ $-2,000$ ถึง $2,000$ Oe การวัดสนามแม่เหล็กนั้นจะวัดจาก Analog Gauss Meter ที่ให้สัญญาณเป็นคลื่นไซน์ (sine wave output) และมีแอมป์ลิจูดเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็ก

ส่วนของภาคการรับและส่งข้อมูลนั้นจะเป็นการเชื่อมต่อระหว่างวงจรและคอมพิวเตอร์โดยใช้ DAQ card (data acquisition card) ขนาด 12-bit ADC 200 kS/sec 2 channel สำหรับวัดความต่างศักย์โดยจะรับข้อมูลมาประมวลผลทีละ 1,000 จุด และการควบคุมจะใช้ DAC 12-bit 2 channel เพื่อควบคุมวงจรสร้างกระแสทั้งสองดังแสดงไว้ในรูปที่ 2

ในส่วนสุดท้ายคือคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลและควบคุมสัญญาณจะเป็นการพัฒนาจากโปรแกรม National Instruments LabVIEW Evaluation ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความคล่องตัวและสะดวกในการพัฒนา

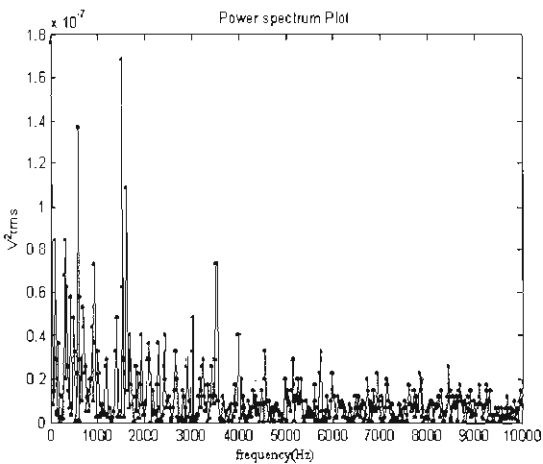


รูปที่ 2 แสดงการทำงานของวงจรทั้งหมด

ผลการทดลอง

การวิเคราะห์สัญญาณรบกวนในระบบและ **SNR** (Signal to Noise Ratio)

เครื่องมือวัดนี้สามารถที่จะตรวจสอบสัญญาณรบกวนก่อนทำการวัดจริง โดยในที่นี้จะเป็นการวัดสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่แผ่นฟิล์มให้ผลดังรูปที่ 3

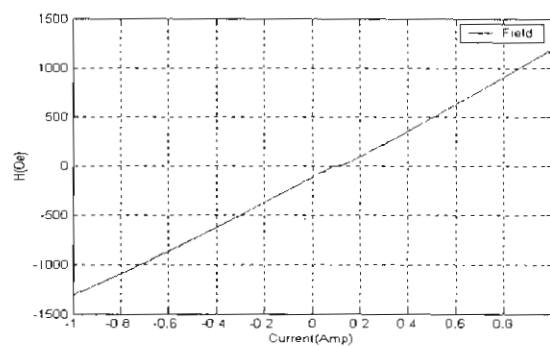


รูปที่ 3 แสดง Power spectrum ของสัญญาณรบกวนบนช่วงความถี่ 10 kHz

จากรูปที่ 3 แสดงผลการวัด Power spectrum ของสัญญาณรบกวน จะเห็นได้ว่า เมื่อความถี่ของสัญญาณรบกวนมากขึ้นขนาดของสัญญาณรบกวนจะน้อยลง ดังนั้น สามารถบอกได้ว่า แหล่งของสัญญาณรบกวนที่รับเข้ามานี้ประมาณเป็นแบบ $1/f$ (flicker noise)

ผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากการวัดสนามแม่เหล็กภายนอกนั้นจะต้องวัดจาก Analog Gauss Meter และขนาดสัญญาณของสนามแม่เหล็กที่ได้จาก Analog Gauss Meter เป็นคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 1 kHz ผสมกับสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงต้องการนำตัวกรองความถี่แบบแบนด์พาสฟิลเตอร์ (band pass filter) เข้ามาใช้เพื่อกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการออกแล้วจึงเปรียบเทียบเป็นค่าขนาดของสนามแม่เหล็ก ผลที่ได้คือสนามแม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับกระแสตามรูปที่ 4[5]

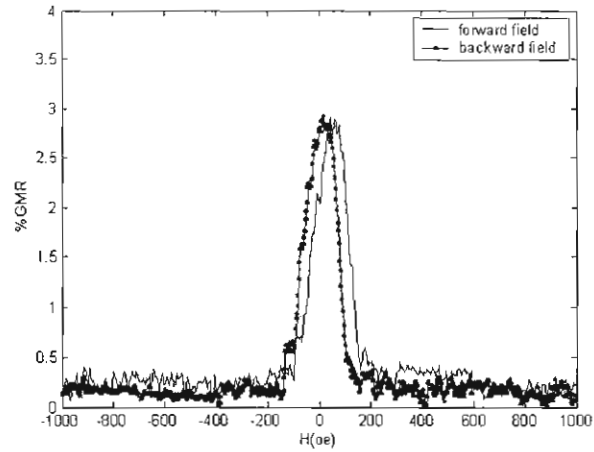


รูปที่ 4 แสดงผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแส

ผลการวัดความต้านทานทางแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มบางแบบจีเอ็มอาร์ (GMR curve)

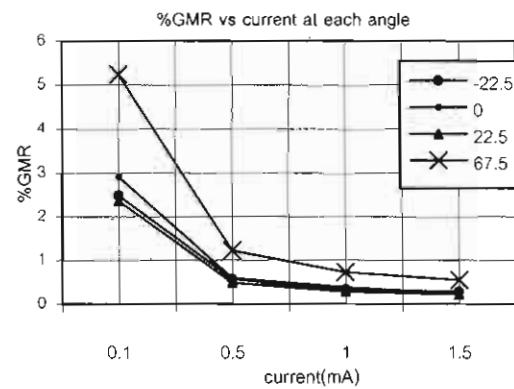
การทดลองใช้แผ่นฟิล์มแบบ Fe/Cr multilayer โดยวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อกระแสไบอัสที่จ่ายแก่แผ่นฟิล์มมีขนาดเท่ากับ 0.1 mA และจ่ายกระแสในระนาบของแผ่นฟิล์ม (current in plane: CIP) โดยผลของการวัดความต่างศักย์นี้ นำมาพล็อตเป็นจุดโดยแต่ละจุดบนเส้นโค้งได้จากการหาค่าเฉลี่ยของค่าที่อ่านที่เวลาใดๆ เพื่อช่วยในการลดสัญญาณรบกวนลง

แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณเป็นค่า GMR (%) ตามสมการที่ (1) ดังนั้น สามารถคำนวณผลของการวัดแล้วแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 5



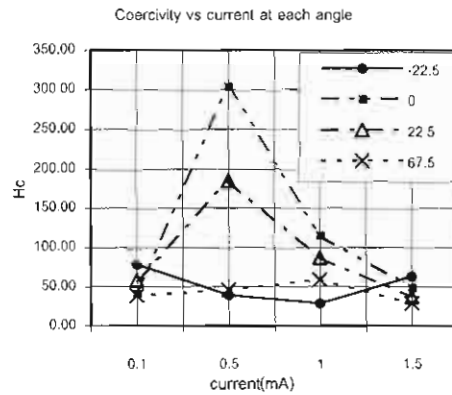
รูปที่ 5 แสดงผลการวัด GMR ของแผ่นฟิล์มบางชนิด Fe/Cr มัลติเลเยอร์

จากรูปที่ 5 พบว่าค่า GMR (%) สูงสุดประมาณ 3% ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มากนักและสิ่ง ที่สังเกตได้คือเกิด Hysteresis ขึ้นเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากการวัดที่ easy axis และการไม่ขนาน กันอย่างสมบูรณ์ของแมกนีโตเซชัน และจากผลของการวัดนี้ทำให้เราสามารถประมาณค่า H_c (coercivity) ได้ประมาณ 42 Oe ที่ความต้านทานของแผ่นฟิล์มที่ค่าสูงสุดประมาณ 43 โอห์ม



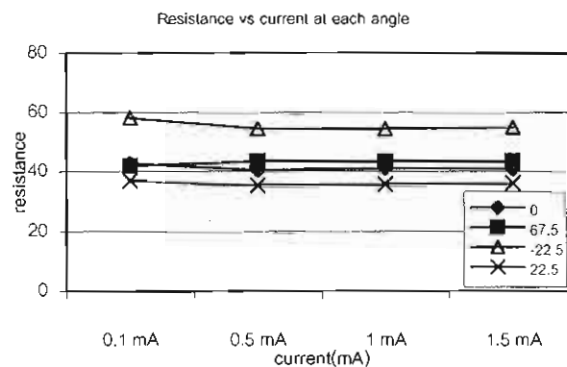
รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ GMR (%) ที่กระแสไบอัสต่างกันและมุมต่างกัน

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสไบอัส (bias current) ที่จ่ายให้แผ่นฟิล์มมีค่าลดลงจะทำให้ค่า GMR (%) มีค่าสูงขึ้น โดยที่เมื่อมุมของการวัดเป็น 67.5 องศา (ใกล้กับ hard axis) จะให้ค่า GMR (%) สูงสุดซึ่งคาดว่าจะจะเป็นผลของ AMR ในแผ่นฟิล์มแบบมัลติเลเยอร์ [6]



รูปที่ 7 แสดงการแปรเปลี่ยนของ H_c (coercivity) ที่กระแสไบอัสต่างกันและมุมต่างกัน

จากรูปที่ 7 จะพบว่า H_c จะมีค่าสูงสุดที่มุมของการวัดเป็นศูนย์องศาและค่า H_c มีค่าน้อยที่สุดที่มุมการวัดเป็น 67.5 องศา ซึ่งเป็นผลของการสวิตช์ซึ่งของแมกนีโตเรชัน อีกสิ่งหนึ่งที่พบคือเมื่อค่ากระแสไบอัสมากขึ้นค่า H_c จะมีค่าน้อยลง (ไม่คิดผลที่กระแส 0.1 mA) ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแผ่นฟิล์มเมื่อกระแสมากขึ้น [7]



รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนของความต้านทานที่กระแสไบอัสต่างกันและมุมต่างกัน

จากรูปที่ 8 จะพบว่า ความต้านทานทางแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นศูนย์นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของการวัด โดยที่มุมของการวัดเป็น -22.5° องศาจะมีค่าความต้านทานสูงสุด และมุมของการวัดเป็น 22.5° องศาจะมีค่าความต้านทานน้อยที่สุด

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เครื่องมือที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้สามารถที่จะวัดค่าความต้านทานทางแม่เหล็กของแผ่นฟิล์มบางแบบจีเอ็มอาร์และจากการทดลองผลที่น่าเชื่อถือได้คือช่วงกระแสไบอัสเท่ากับ $0.5 - 1.5$ mA จากผลการทดลองจะเห็นถึงความผิดพลาดจากการวัดซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวนและความจำกัดของ DAQ ในการรับข้อมูลที่ระดับสัญญาณเล็กๆ

เครื่องมือนี้ได้ถูกสร้างให้มีจุดประสงค์เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวัด *GMR curve* และพยายามที่จะสร้างให้มีหลายทางเลือกในการที่จะใช้วัดคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์ม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกเช่น ขนาดของสนามแม่เหล็กภายนอกที่สร้างยังมีค่าน้อย ดังนั้น ถ้านำไปใช้วัดแผ่นฟิล์มบางประเภทอื่นอาจไม่สามารถทำได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติตามหมายเลข CO-B-06-44-12-301 และทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รวมทั้งขอขอบคุณ Mr.Oliver Schwoebken (Ruhr University Bochum, Germany) ที่จัดหาแผ่นฟิล์มบางแบบจีเอ็มอาร์สำหรับการทดสอบเครื่องมือนี้

Acknowledgments

This research is financially supported by National Science and Technology Development Agency (NSTDA) under the grant number CO-B-06-44-12-301 and partially supported by Graduate School, Khon Kaen University.

The authors would like to express the greatest thankfulness to Mr.Oliver Schwoebken, Ruhr University Bochum, Germany, for contribution of GMR films for the measurement.

เอกสารอ้างอิง

- [1] N.T.Holliday and E.W.Hill, "An Intelligent Instrument for GMR sensor Evaluation", **2nd European Conference on Magnetic Sensors&Actuator**, Sheffield, UK, 1998.
- [2] A.Siritaratiwat, "Magnetic Thin Films", **Mahanakorn University Engineering Transactions**, vol.3, No.1, pp. 63-66, Jan-Apr 2000
- [3] Adir Bar-Lev, **Semiconductors and Electronic Devices**, 3th Edition , Prentice-Hall, 1993.
- [4] William H. Hayt, JR, **Engineering Electromagnetics**, 5th Edition, Mcgraw-Hill Inc., 1989.
- [5] A.Siritaratiwat, P.Polrutanajak, S.Hungasutra, R.Ung-arunyawee and C.Puprichitkun, "Intelligence instrument for GMR film measurement", **Euro-Asian Symposium : Trends in Magnetism**, Ekaterinburg, Russia, February 27 - March 2, 2001.
- [6] Akira Kouchiyama, Teiichi Miyauchi and Kenjiro watanabe, "Highly Sensitive Giant Magnetoresistance in NiFe/(Ni/Fe/Cu)_n/NiFe Thin Films, **IEEE Tran. On Magnetics**, vol.30, No.6, November 1994.
- [7] F.G.Monzon, Mark Johnson and M.L.Roukes, "Strong Hall voltage modulation in hybrid ferromagnet/semiconduct or micro-structurees", **Appl. Phys. Lett.**, vol. 71, No. 24, November 1997.