

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ดำนที่ศนศาสตร์แม่เหล็ก

ปริญญาานิพนธ์

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กุมภาพันธ์ 2551

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

ปริญญาานิพนธ์

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กุมภาพันธ์ 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ดำนัทศาสตร์แม่เหล็ก

บทคัดย่อ

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กุมภาพันธ์ 2551

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร. (2551). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ตันด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก. ปรินซ์นิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ดร. วิชุดา บุญยรัตกลิน, ผศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล.

ปรินซ์นิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายที่จะออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ตันด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กเพื่อใช้วัดและตรวจสอบคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กตามแนวระนาบและนอกระนาบของผิวของสารแม่เหล็ก ระบบการวัดประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน โพลาริเซอร์ควบคุม โพลาริเซอร์วิเคราะห์ ตัววัดแสง และแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังแบบสองขั้ว แหล่งจ่ายกำลังและตัววัดแสงต่อประสานเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางแผงวงจรรีไฟโอปี ช่องทางขนาน และชุดคำสั่งแลบวิว เพื่อควบคุมค่าสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าและบันทึกข้อมูลค่ากำลังแสงเลเซอร์ในเวลาเดียวกัน เครื่องมือวัดถูกจัดวางเป็นสองรูปแบบเพื่อวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ตันด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามยาวและแบบเชิงขั้ว

เพื่อให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กตามที่ต้องการเราได้ใช้ชุดคำสั่งเรเดียสร้างแบบจำลองของแม่เหล็กไฟฟ้า คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก และสร้างพื้นผิวสามมิติ ทั้งนี้ได้ออกแบบขั้วแม่เหล็กเป็นสองรูปแบบคือ รูปร่างสี่เหลี่ยมและรูปร่างสามเหลี่ยม จากการคำนวณสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กทั้งสองแบบพบว่ามีความแตกต่างจากการวัดด้วยหัววัดฮอลล์ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

ระบบที่สร้างขึ้นนี้ถูกนำไปทดสอบในเบื้องต้นโดยการสร้างวงฮิสเทอรีซิสของผลึกเดี่ยวนิเกิลระนาบ (111) เหล็ก โคบอลต์บริสุทธิ์ และฟิล์มของเหล็ก วงฮิสเทอรีซิสจากการทดสอบที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องสโอมิกและวีเอสเอ็ม โดยที่ระบบสโอมิกใช้หัววงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มนิเกิลบนแพลทินัมระนาบ (111) และฟิล์มโคบอลต์บนแพลทินัมระนาบ (111) ในขณะที่เครื่องวีเอสเอ็มใช้หัววงฮิสเทอรีซิสของเหล็กและฟิล์มเหล็ก ซึ่งพบว่ารูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่องมือดังกล่าว

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE MAGNETO-OPTIC KERR EFFECT (MOKE)
MEASUREMENT SYSTEM

AN ABSTRACT
BY
SURACHET RATTANASUPORN

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
February 2008

Surachet Rattanasuporn. (2008). *Design and Construction of the Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE) Measurement System*. Master Thesis, M.S. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor committee: Wichuda Boonyaratgalin, Assist. Prof. Prayoon Songsiriritthigul.

This thesis aimed to design and construct a magneto-optic Kerr effect measurement system, which was used to measure and examine the characteristic of in-plane and out of plane magnetization of magnetic material. The measurement system consisted of a He-Ne laser source, a controlled polarizer, an analyzer polarizer, a photodetector and an electromagnet that was connected to a bipolar power supply. The power supply and the photodetector were interfaced with a computer via GPIB card, RS-232 port and LabView software so that the magnetic field of the electromagnet could be controlled and the laser power data can be recorded simultaneously. The instruments were set up into two configurations to measure the longitudinal and the polar magneto-optic Kerr effects.

In order to achieve the desired magnetic field, the electromagnet was designed using Radia code which simulated the model of electromagnet, calculated magnetic field and built 3D surface of the magnetic field. The magnet poles were designed in two different shapes, square and triangular. For both of them, the magnetic fields obtained from the calculation differ from the measured values via Hall probe by 3%.

The measurement system was primarily tested on Ni(111) single crystal, iron, pure cobalt and iron films. The resulting hysteresis loops for these materials were compared with those obtained from SMOKE and VSM. SMOKE was used for measuring 7.4 ML Ni/Pt(111) films and 6.5 ML Co/Pt(111) films, while VSM was used for measuring bulk Fe and 7000 Å Fe films. The shapes of the hysteresis loops resulted from the constructed system shown good agreement with those attained by the existing measurement systems.

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ดำนทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่.....เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน)

(อาจารย์ ดร.สุพจน์ มุศิริ)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล)

(อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร ไอสถจันทร์)

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุน

จาก

ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งสิทธิ์ทิฏกุล ที่ได้ให้โอกาสให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และได้ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการพัฒนาระบบ ผู้วิจัยซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุพจน์ มุศิริ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร โอสถจันทร์ ที่ให้ความกรุณาในการเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติที่ได้ให้ทุนวิจัย สนับสนุนงานปริญญาานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ Dr.Hideki Nakajima ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการพัฒนาระบบเสมอมา และขอขอบคุณ คุณสำเร็จ ดั่งวงนิล และเจ้าหน้าที่ส่วนงานผลิตชิ้นงานของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนในการจัดทำอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับระบบ MOKE

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติทุกคน ที่ได้คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ตลอดมา ขอขอบคุณ คุณ จูติพงศ์ เครือหงส์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือดำเนินการในเรื่องต่างๆ จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอขอบคุณพี่สาวและน้องชาย ที่ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนการศึกษาและการทำปริญญาานิพนธ์ของผู้เขียนตลอดมา

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 นิยามศัพท์.....	3
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 ปรัชญาการณัฐศาสตร์แม่เหล็ก.....	5
2.1.2 ปรัชญาการณัฐศาสตร์ของฟาราเดย์.....	5
2.1.3 ปรัชญาการณัฐศาสตร์ของเคอร์ด้านทฤษฎีแม่เหล็ก.....	6
2.1.4 รูปแบบของปรัชญาการณัฐศาสตร์ของเคอร์ด้านทฤษฎีแม่เหล็ก.....	7
2.1.5 อิลลิปโซเมทรี.....	8
2.1.6 วงฮิสเทอรีซิส.....	10
2.1.7 ฐานนิยมมหรรณัฐศาสตร์ของปรัชญาการณัฐศาสตร์ของเคอร์ด้านทฤษฎีแม่เหล็ก.....	12
2.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.2.1 งานวิจัยของบาเดอร์ มูก และคิว.....	33
2.2.2 งานวิจัยของแฮมตัน อัลเบอริโตและอบรรณา.....	36
2.2.3 งานวิจัยของลีและคณะ.....	40
2.2.4 งานวิจัยของเชิร์นและคณะ.....	42
3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 ข้อกำหนดความต้องการของระบบ.....	48
3.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบ.....	49
3.2.1 การออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	49
3.2.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดมุมการหมุนของเคอร์.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
3.2.3 การออกแบบการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด L-MOKE และ P-MOKE..	53
3.3 การดำเนินงานพัฒนาระบบ MOKE.....	55
3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับระบบการวัด MOKE.....	55
3.3.2 การสร้างแม่เหล็กไฟฟ้า.....	58
3.3.3 การติดตั้งและต่อประสานระบบการวัด MOKE.....	59
3.3.4 การวัดทดสอบระบบ.....	59
4 ผลการวิจัย.....	60
4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณสนามแม่เหล็กระหว่างแบบจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า โดยชุดคำสั่งเรเดียกับผลการวัดโดยหัววัดฮอลล์.....	60
4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับค่ากระแส.....	69
4.3 การสร้างวงฮิสเทอรีซิสและวัดมุมการหมุนของเคอร์.....	73
4.3.1 การสร้างวงฮิสเทอรีซิส.....	75
4.3.2 การวัดมุมการหมุนของเคอร์โดยการปรับมุมโพลาริเซชันวิเคราะห์.....	83
5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	87
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	88
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	93
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	105

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ทิศของสนามแม่เหล็กที่ให้กับสารตัวอย่างของปรากฏการณ์ของเคอร์ดำน ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (a) แบบเชิงขั้ว (b) แบบตามยาว และ (c) แบบตามขวาง.....	8
2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของอิลลิปโซมิเตอร์.....	9
3 วงฮิสเทอรีซิสที่แสดงค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างและค่าสนามลบล้างแม่เหล็กในสาร....	11
4 องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงเส้น องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงกลม องค์ประกอบ การโพลาไรซ์เชิงวงรี การหมุนของเคอร์ และความรีของเคอร์.....	15
5 คลื่นตกกระทบ คลื่นหักเห และคลื่นสะท้อนบริเวณรอยต่อของตัวกลางสองชนิด.....	18
6 กราฟแสดงค่าการหมุนของเคอร์จากผลการทดลองและจากทฤษฎีสำหรับเอสและพี โพลาไรซ์ บน (a) Cu/Co แบบหลายชั้น (multilayer) ในรูปแบบตามยาว และ (b) Co/Pd แบบหลายชั้นในรูปแบบเชิงขั้ว.....	31
7 ค่าการหมุนของเคอร์และความรีของเคอร์ที่แปรกับมุมตกกระทบจากทฤษฎีเมื่อ เปลี่ยนค่าดัชนีหักเห (n) และค่าคงที่ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (Q).....	32
8 วงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวัด SMOKE ของฟิล์ม Fe บนผลึก Au(100) โดย (a) วัดที่ อุณหภูมิ 60 °C (b) วัดที่อุณหภูมิ 65 °C และ (c) วัดที่อุณหภูมิ 104 °C.....	33
9 องค์ประกอบและการจัดชุดระบบการวัด SMOKE ของคิวและบาเดอร์.....	34
10 วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ที่ได้จากการวัดฟิล์ม 6 ML Fe/Ag(100).....	36
11 รูปแบบการจัดวางเครื่องมือสำหรับวัดสัญญาณ SMOKE แบบตามยาวของแฮมตัน อัลเบอร์โตและอบรูนา.....	37
12 แม่เหล็กสำหรับระบบ SMOKE โดยมีสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง X เป็น 500 Oe และ ที่ตำแหน่ง Y เป็น 400 Oe ที่กระแส 4 A.....	38
13 วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามแบบ ของฟิล์มโคบอลต์บนควอตซ์.....	39
14 แผนภาพแสดงระบบการวัด SMOKE ทั้งสามรูปแบบของลีและคณะ.....	40
15 วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามรูปแบบที่แปรค่าตามความหนาของ ฟิล์ม Co เมื่อปลูกบน Pd(111) glass และ 200 Å Pd/glass.....	41
16 แผนภาพแสดงการติดตั้งระบบการวัด MOKE ของเชิร์นและคณะ.....	43
17 วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม Ni/Pt(111) วัดโดยเทคนิค MOKE แบบเชิงขั้ว.....	44

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
18 วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม Ni/Pt(111) วัดโดยเทคนิค MOKE แบบตามยาว ที่มุมเอซิมัทเป็น (a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90° (e) 120° (f) 150° (g) 180°	45
19 สัญญาณของเคอร์เทียบกับสนามแม่เหล็กและความหนาของฟิล์ม Co บน (a) Pt (111) และ (b) Sputtered Pt (111).....	47
20 เส้นโค้งของความเป็นแม่เหล็กแบบกระแสดตรงสำหรับวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	50
21 รูปร่างและขนาดของแม่เหล็กที่ออกแบบในมุมมองด้านหน้าและด้านข้าง.....	50
22 ขั้วแม่เหล็กด้านหน้าและด้านข้าง (a) รูปแบบที่ 1 และ (b) รูปแบบที่ 2.....	51
23 ขดลวดโซเลนอยด์และสนามแม่เหล็กของขดลวดโซเลนอยด์.....	52
24 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด L-MOKE	54
25 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2..	55
26 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน และแหล่งจ่ายกำลัง.....	56
27 (a) โพลาริเซอร์แบบกลาน-เทเลอร์ และ (b) ตัวหมุนแบบละเอียด	56
28 แหล่งจ่ายกำลังกระแสดตรง BOP 20-20M ที่ติดตั้งแผ่นวงจรต่อประสาน BIT 4886 ไว้ใน.....	57
29 ตัววัดแสงชนิดโฟโตไดโอดแบบซิลิกอนและชุดควบคุม.....	58
30 ภาพจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบโดยใช้ชุดคำสั่งเรเดียสำหรับใช้ในระบบ MOKE โดย (a) ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ (b) ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	60
31 แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นซึ่งมีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบที่ 2.....	61
32 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วย หัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	62
33 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วย หัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	63
34 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณจากชุดคำสั่งเรเดียเทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	64

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วยหัววัดฮอลล์เทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1	64
36 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณจากชุดคำสั่งเรเดียเทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2	65
37 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วยหัววัดฮอลล์เทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2	65
38 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	67
39 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	67
40 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206$ mm ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	68
41 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการคำนวณองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	68
42 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	69
43 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	70

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
44 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	71
45 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	72
46 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด L-MOKE.....	73
47 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2	74
48 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมแลปวิว.....	75
49 วงฮิสเทอรีซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 7.4ML Ni/Pt(111) ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	76
50 วงฮิสเทอรีซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับค่าความรีของเคอร์ซของฟิล์ม Ni/Pt(111).....	77
51 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับความรีของเคอร์ซของฟิล์ม Ni/Pt(111).....	78
52 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของเหล็กแบบปริมาตรเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้จากเครื่อง VSM.....	79
53 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของเหล็ก.....	79
54 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 6.5 ML Co/Pt(111).....	80
55 วงฮิสเทอรีซิสของปรากฏการณ์ของเคอร์ดาน์ที่ค้นศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงขั้วของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%).....	81
56 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å เปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่อง VSM ของฟิล์มเหล็กหนา 7000 Å.....	82
57 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å.....	82

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
58 การเปลี่ยนแปลงของกำลังแสงเลเซอร์ที่ตกบนโฟโตไดโอดแปรค่าตามการเปลี่ยนแปลงมุมของโพลาริเซอริวเคราะห์ เมื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก ให้สนามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ 5 A และให้สนามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ -5 A ของเหล็ก.....	83
59 แสดงองค์ประกอบการโพลาริเซชันแนวเอสและพี เมื่อเกิดการหมุนของเคอร์.....	88
60 วงฮิสเทอรีซิสจาก L-MOKE ของโคบอลต์เมื่อวัดซ้ำ 4 รอบ.....	89
61 กำลังแสงเลเซอร์ที่แปรค่าตามเวลา เมื่อเปิดเครื่องเลเซอร์ทันที เวลาผ่านไป 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	89