

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



247338



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : สมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์
ทินออกไซด์ที่มีโลหะทรานซิชันเป็นตัวเติม สำหรับเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์
Room Temperature Ferromagnetic in Transition metal dope Tin Oxides
Semiconductors: Toward Spintronic Technology

โดย ดร. ทวีศักดิ์ สุธยอดสุข

กรกฎาคม 2553

600852148

247338

สัญญาเลขที่ MRG4880056

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : สมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์
ทินออกไซด์ที่มีโลหะทรานซิชันเป็นตัวเติม สำหรับเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์
Room Temperature Ferromagnetic in Transition metal dope Tin Oxides
Semiconductors: Toward Spintronic Technology

ผู้วิจัย สังกัด

ดร. ทวีศักดิ์ สุดยอดสุข ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG4880056

ชื่อโครงการ : สมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์
ทินออกไซด์ที่มีโลหะทรานซิชันเป็นตัวเติม สำหรับเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์

ชื่อนักวิจัย : ดร.ทวีศักดิ์ สุตยอดสุข
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ระยะเวลาโครงการ: 1 ปี

ศัพท์สำคัญ : สารกึ่งตัวนำแม่เหล็กแบบเจือจาง / ออโตคอมบัสชัน / โลหะทรานซิชัน /
ทินออกไซด์ / อนุภาคนาโน

ได้เตรียมผงอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ เมื่อ TM คือ Cr และ Co มี $x \leq 0.015$ เมื่อ TM คือ Fe มี $x \leq 0.30$ โดยเทคนิคออโตคอมบัสชัน อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ ทุกตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของทินออกไซด์ ไม่มีโครงสร้างของโลหะออกไซด์อื่นเจือปน มีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5 - 20 nm อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ ทุกตัวอย่างแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแถบช่องว่างแบบตรง มีพลังงานแถบช่องว่างอยู่ระหว่าง 3.2 eV ถึง 3.8 eV โลหะทรานซิชัน TM ทุกอะตอมเข้าไปแทนที่โลหะ Sn ในโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของทินออกไซด์ โดยโลหะ Cr โลหะ Co และโลหะ Fe มีเลขออกซิเดชัน +4, +2 และ +3 ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิห้อง อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อน และอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ เฝ้าแคลไซน์ที่ 600 °C มีความเป็นเฟอร์โรแมกเนติกดี มีค่าเมกเนไทเซชันอิ่มตัวเท่ากับ 0.039 μ_B/Cr ขณะที่อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิห้องได้ดีเมื่อเฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C อนุภาคนาโนทินออกไซด์เจือด้วยโลหะ Fe เมื่อปริมาณโลหะ Fe มากกว่า 0.015 atomic% ส่วนมากแสดงสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เฉพาะ $\text{Sn}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_{2-\delta}$ เท่านั้นที่แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิห้อง โดยอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{0.995}\text{Fe}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ เฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C แสดงสมบัติเหล็กดีที่สุด มีค่าเมกเนไทเซชันอิ่มตัวเท่ากับ 0.256 μ_B/Fe

ABSTRACT

Project Code: MRG4880056

Project TITLE: Room Temperature Ferromagnetic in Transition metal dope Tin Oxides
Semiconductors: Toward Spintronic Technology

Investigator: TAWEESEK SUDYOADSUK, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Project Period: 1 year

KEYWORDS : DILUTED MAGNETIC SEMICONDUCTOR / AUTOCOMBUSTION /
TRANSITION METAL / TIN OXIDE / NANOPARTICLES

The $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticles samples (TM = Cr and Co with $x \leq 0.015$ and Fe with $x \leq 0.30$) were prepared by the autocombustion technique. All samples exhibit a single SnO_2 rutile phase without any trace of an impurity phase. The average crystallite size is in range of 5 - 20 nm. They are the direct transition semiconductor with the band gap energy of 3.2 - 3.8 eV. The oxidation state of the doped transition metals in the SnO_2 matrix is +4, +2, and +3 for Cr, Co, and Fe, respectively. The $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticles show weak ferromagnetic-like behavior at room temperature. The magnetization of $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticles calcined at 600 °C exhibited a saturation magnetization of 0.039 μ_B/Cr . While the $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ sample show good ferromagnetism when calcined at 700 °C. Almost the high level dope Fe ($x > 0.015$) samples show a superparamagnetic characteristic. Only $\text{Sn}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticle exhibited ferromagnetism at room temperature. The $\text{Sn}_{0.995}\text{Fe}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticle calcined at 500 °C has good magnetic properties with high saturation magnetization of 0.256 μ_B/Fe .

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เซมิคอนดักเตอร์เจือสารแม่เหล็ก (Dilute Magnetic Semiconductor, DMS) กำลังได้รับความสนใจศึกษาอย่างมาก ในช่วง 4-5 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากวัสดุ DMS สามารถแสดงสมบัติได้ทั้งเซมิคอนดักเตอร์และเฟอร์โรแมกเนติกในตัวเดียวกัน ซึ่งจะใช้เป็นองค์ประกอบสำคัญของเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่ ที่อาศัยสปินของพาหะ (charge carriers spin) ในการควบคุมลอจิก (logic) และพร้อมกันนั้นสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่เกิดจากจัดเรียงตัวของสปิน ภายใต้การกระตุ้นจากสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้า หรือว่าแสง สำหรับเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูล เทคโนโลยีที่เรารู้จักกันในนาม “สปินทรอนิกส์ (spintronic)” ซึ่งจะเป็นความหวังใหม่สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกัน สำหรับข้อดีของไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบบสปินทรอนิกส์ คือ สามารถถ่ายโอน ประมวลผล และจัดเก็บข้อมูล ได้หลายล้านบิตพร้อมกัน ภายในอุปกรณ์ชิ้นเดียวกัน ทำให้อุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ใช้พลังงานต่ำ ในขณะที่ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน มีส่วนที่ถ่ายโอน ประมวลผล ซึ่งใช้หลักการของการไหลของอิเล็กตรอน และส่วนจัดเก็บข้อมูล เป็นคนละชนิดกัน หรือแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการทำงาน อีกทั้งตามกฎของมัวร์ (Moore's Law) ที่กล่าวไว้ว่าจำนวนของทรานซิสเตอร์ (ที่ใช้หลักการของการไหลของอิเล็กตรอน) ในคอมพิวเตอร์ชิป จะเพิ่มขึ้นสองเท่า ในทุกๆ 18 เดือน กำลังจะถึงจุดที่อิ่มตัว เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีการขีดเส้นลวดบาง (photolithography) ก็กำลังจะถึงขีดสุดของเทคโนโลยีนี้ ทำให้ไม่สามารถเพิ่มจำนวนของทรานซิสเตอร์ลงไปอีกได้ตามกฎของมัวร์ ส่งผลให้ไม่สามารถพัฒนาหรือเพิ่มขีดความสามารถของการประมวลผลของไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้มากไปกว่านี้เท่าไรนัก เป็นผลให้ในปัจจุบันได้มีการหันมาสนใจศึกษา เพื่อหาเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถเพิ่มขีดความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชิป โดยมุ่งเน้นไปที่ไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบบสปินทรอนิกส์ ที่มีวัสดุ DMS เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งก่อนที่จะสามารถนำเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบบสปินทรอนิกส์มาใช้งานได้จริง จะต้องทำการพัฒนาหรือค้นคว้าวัสดุ DMS ที่สามารถแสดงสมบัติได้ทั้งเซมิคอนดักเตอร์และเฟอร์โรแมกเนติก ที่มีอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature, T_c) สูงกว่าอุณหภูมิห้อง และจะต้องเข้าใจฟิสิกส์ของสมบัติที่วัสดุ DMS แสดงทั้งหมดให้ได้ก่อน วัสดุที่กำลังได้รับความสนใจมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ (1) กลุ่มอสังฐานเซมิคอนดักเตอร์แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) หรืออินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs) และ (2) กลุ่มสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ เช่น ZnO, TiO_2 หรือ SnO_2 ซึ่งทั้งสองกลุ่มนี้เป็นสารเซมิคอนดักเตอร์ที่รู้จักกันดี แนวทางที่จะทำให้อาร์เซไนด์ทั้งสองกลุ่มนี้แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ทำได้โดยการแทนที่โลหะหลักในสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ ด้วยโลหะทรานซิชันอนุกรมที่ 1 (TM) เช่น Co, Mn, หรือ Fe เป็นต้น โดยแทนที่ในปริมาณที่เจือจาง วัสดุ DMS กลุ่มแรก มีการศึกษาต่อเนื่องมาก่อนหน้ากลุ่มสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ หลายปี แต่พบว่ายังมีอุณหภูมิคูรี T_c ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องอยู่มาก อีกทั้งการขึ้นรูปให้อยู่ในรูปของฟิล์มบาง (เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง) ยังทำได้ยากและต้นทุนสูง รวมทั้งยังมีปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอาร์เซไนด์เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต จึงทำให้มีการหันมาสนใจศึกษาสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์อย่างจริงจัง ซึ่งสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์กลุ่มนี้มีการผลิตจริงแล้วในอุตสาหกรรม ทำให้การพัฒนาเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์แบบสปินทรอนิกส์มีความเป็นไปได้ง่ายมากขึ้น โดยการอาศัยองค์ความรู้เดิมด้านเทคโนโลยีออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ ที่มีอยู่แล้วรวมเข้ากับองค์ความรู้ใหม่เทคโนโลยีสปินทรอนิกส์ที่กำลังได้รับการพัฒนาขึ้นมา อีกทั้งจากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่าวัสดุ DMS กลุ่มสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ มีอุณหภูมิคูรีสูงกว่าอุณหภูมิห้อง สำหรับวัสดุ DMS กลุ่มสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ที่ได้รับการสนใจศึกษาเป็นกันอย่างมากมายก่อนหน้านี้ ในช่วง 2 – 3 ปี คือ ระบบ TM-doped ZnO และ TM-doped TiO_2 ซึ่งมีการรายงานทั้งที่พบและไม่พบสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิห้องหรือเหนือกว่าอุณหภูมิห้อง แต่ในกลุ่มที่พบสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกก็ยังคงมีความสับสนเกิดขึ้น กล่าวคือ สมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่พบนั้น อาจไม่ได้เกิดจากวัสดุ DMS ที่เตรียมได้ แต่อาจเนื่องมาสิ่งเจือปนจากการที่โลหะ TM ที่ไม่สามารถเข้าไปแทนที่

โลหะหลักในโครงสร้างได้ โดยที่โลหะ TM อาจอยู่ในรูปอะตอมเดี่ยวหรืออยู่เป็นกลุ่มคลัสเตอร์ (cluster) ทั้งนี้ เนื่องจากการเตรียมสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ ที่มีการแทนที่ด้วยโลหะ TM ให้ความบริสุทธิ์ (มีโครงสร้างผลึกชนิดเดียว) ยังมีข้อจำกัดอยู่ และที่ผ่านมา ระบบ TM-doped SnO_2 ยังมีการศึกษากันอยู่น้อยมาก (น้อยกว่า 5 เรื่อง) ทั้งที่สารประกอบ SnO_2 แสดงสมบัติเซมิคอนดักเตอร์ที่ดี และมีความเป็นไปได้ในเชิงอุตสาหกรรมสูง จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการเตรียมและการแสดงสมบัติสมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่า อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ระบบ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.05$) ที่มีโครงสร้างผลึกชนิดเดียว (single phase) เพื่อให้ได้องค์ประกอบของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.05$) ที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุหลักในเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์ เทคนิคที่เลือกใช้สำหรับเตรียมสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 คือ โซลเจล ข้อดีของเทคนิคโซลเจลที่เลือกใช้ เมื่อเทียบกับเทคนิค solid-state reaction คือ สามารถเตรียมสารประกอบให้มียุทธศาสตร์และโครงสร้างผลึกตามที่ต้องการได้ดีกว่า โดยใช้อุณหภูมิอบผืน (sintering temperature) ต่ำกว่า ($< 1000^\circ\text{C}$) อีกทั้งขนาดของอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร และมีลักษณะสม่ำเสมอ

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเตรียมสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.05$) โดยเทคนิคโซลเจล ให้ได้โครงสร้างผลึกชนิดเดียว (single phase)
2. เพื่อศึกษาการแสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ที่อุณหภูมิห้องหรือเหนือกว่าอุณหภูมิห้อง และอธิบายเหตุผลของการแสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกของสารประกอบสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.05$) ที่เตรียมได้

3. ระเบียบวิธีวิจัย

1. เตรียมสารประกอบเตรียมสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.02$) โดยเทคนิคโซลเจล โดยเริ่มต้นจากสารละลายของสารประกอบเกลือคลอไรด์ ไนเตรต หรืออะซิเตตของโลหะ (โซล) แล้วทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแห (เจล) โดยใช้กรดซิตริก (Citric acid) และเอทิลีน ไกลคอล (ethylene glycol) เป็นลิแกนด์ และตัวเชื่อม ตามลำดับ จากนั้นจึงเผาอบผืนเจลที่เตรียมได้ ที่อุณหภูมิประมาณ 500°C เพื่อกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ต้องการออกไป และเพื่อให้เกิดโครงสร้างผลึกของสารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ที่ต้องการ
2. ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.02$) ที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Powder X-ray Diffraction, PXRD) และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิค Rietveld refinement
3. ทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.02$) ที่เตรียมได้โดยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) และ Transmission electron microscope (TEM) และศึกษาองค์ประกอบของสารประกอบที่เตรียมได้ โดยใช้เทคนิค Energy X-ray dispersive spectroscopy (EDS) ซึ่งสามารถทำได้พร้อมกับทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค
4. ทำการศึกษสมบัติแม่เหล็กของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ TM-doped SnO_2 ($\text{TM}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$, TM = Co, Mn, Fe, and Cr, $x < 0.02$) ที่เตรียมได้โดย (ก) วัฏจักรฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่อง Vibrating sample magnetometer (VSM) (ข) วัฏสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกโดยใช้เครื่อง Ferromagnetic resonance spectrometer (FMR) และ (ค) ศึกษาสมบัติแม่เหล็กในช่วงอุณหภูมิมระหว่าง $5 - 300\text{ K}$ โดยใช้เครื่อง Superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer

4. แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการในระยะเวลา 1 ปี

แผนการดำเนินงาน	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature survey)												
เตรียมสารประกอบเป้าหมาย												
ศึกษาโครงสร้างผลึก												
ศึกษาโครงสร้างจุลภาค												
วิเคราะห์องค์ประกอบ												
ศึกษาสมบัติแม่เหล็ก												
เขียนรายงานตีพิมพ์												
ตีพิมพ์												

5. ผลงาน/หัวข้อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์: Room Temperature Ferromagnetism in Transition Metal Doped Tin Oxide Nanoparticles.

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. (impact factor 0.910)
สำนักพิมพ์ Elsevier

6. งบประมาณโครงการ

	ปีที่ 1 (บาท)
1. หมวดค่าตอบแทน	
- ค่าตอบแทนหัวหน้าโครงการ (อัตรา 10,000 บาท × 12 เดือน)	120,000
รวม	120,000
2. หมวดค่าวัสดุ	
- ค่าสารเคมีและเครื่องแก้ว	50,000
- ค่าเบ้าเผาสาร (crucible)(อัตรา 1,000 บาท × 10 ชุด)	10,000
- ค่า sample holder สำหรับเครื่อง VSM (อัตรา 8,000 บาท × 1 ชุด)	8,000
- ค่าวัสดุสำนักงาน	2,000
รวม	70,000
3. หมวดค่าใช้สอย	
- ค่าบริการวิเคราะห์สาร	40,000
- ค่าเดินทางไปวิเคราะห์สาร (อัตรา 1,500 บาท × 6 ครั้ง)	9,000
- ค่าจัดทำเอกสาร	1,000
รวม	50,000
รวมงบประมาณโครงการ	240,000

รายละเอียดโครงการ

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): สมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์ทินออกไซด์ที่มีโลหะทรานซิชันเป็นตัวเติม สำหรับเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์
(ภาษาอังกฤษ): Room Temperature Ferromagnetic in Transition Metal Doped Tin Oxide Semiconductors: Toward Spintronic Technology.

ชื่อหัวหน้าโครงการ (ภาษาไทย): นายทวีศักดิ์ สูดยอดสุข
(ภาษาอังกฤษ): Mr. Taweesak Sudyoadsuk
(ตำแหน่งวิชาการ): อาจารย์ ดร.

ระยะเวลาดำเนินงาน : 1 ปี

เวลาทำงานวิจัยในโครงการประมาณสัปดาห์ละ 20 ชั่วโมง

สถานที่ติดต่อ :

ที่ทำงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ถ.วาริน-เดชอุดม อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
โทรศัพท์ (045) 288 400-3 ต่อ 4131
โทรสาร (045) 433 113
โทรศัพท์มือถือ 06-708 7539
e-mail tsudyoadsuk@yahoo.com

ชื่อนักวิจัยที่ปรึกษา (ภาษาไทย): นายพงศ์ทิพย์ วิน้อย
(ภาษาอังกฤษ): Mr. Pongtip Winotai
(ตำแหน่งวิชาการ): รศ. ดร.

สถานที่ติดต่อ :

ที่ทำงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ถ. พระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400
โทรศัพท์ (02) 201 5156
โทรสาร (02) 354 7151
โทรศัพท์มือถือ -
e-mail scpwn@mucc.mahidol.ac.th

ชื่ออธิการบดี

ศ. ดร. ประกอบ วิโรจน์

การเปิดบัญชีโครงการ

ชื่อบัญชีโครงการ	MRG48-ทวีศักดิ์ สดุดอดสุข
เลขที่บัญชี	583-2 45517-0
ธนาคาร	ไทยพาณิชย์ จำกัด (มหาชน)
สาขา	วารินชำราบ
ผู้มีอำนาจสั่งจ่าย	1. นายทวีศักดิ์ สดุดอดสุข (หัวหน้าโครงการ) 2. นายวินิจ พรหมอรัญ (อาจารย์ภาควิชาเคมี) 3. นางสาวสายสมร ล้าลอง (อาจารย์ภาควิชาเคมี)

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนทุนวิจัยจาก ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย รหัสโครงการ MRG4880056 ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ. ดร. พงษ์ทิพย์ วิโนทัย ผู้ล่งลับ นักวิจัยที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี นางสาวกมลวรรณ รินทรมณี นางสาวสุรัตดา ศรีสุวรรณ นายวิวัฒน์ ชันติวงศ์ นายศักดิ์ชัย วงศ์เพ็ง และนางสาวมาลี ประจวบสุข ที่ร่วมโครงการวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อเครื่อง UV-3101PC UV-VIS-NIR spectrophotometer SHIMADZU และเครื่อง vibrating sample magnetometer, VSM 7403, LakeShore ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและบริการจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อให้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยเครื่อง TEM JEOL JSM 2010

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่เอื้อเฟื้อเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่อำนวยความสะดวกเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนสถานที่สำหรับทำวิจัย

ดร. ทวีศักดิ์ สุดยอดสุข

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG4880056

ชื่อโครงการ : สมบัติเฟอร์โรแมกเนติก ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบเซมิคอนดักเตอร์
ทินออกไซด์ที่มีโลหะทรานซิชันเป็นตัวเติม สำหรับเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์

ชื่อนักวิจัย : ดร.ทวีศักดิ์ สุตยอดสุข
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ระยะเวลาโครงการ: 1 ปี

ศัพท์สำคัญ : สารกึ่งตัวนำแม่เหล็กแบบเจือจาง / ออโตคอมบัสชัน / โลหะทรานซิชัน /
ทินออกไซด์ / อนุภาคนาโน

247338

ได้เตรียมผงอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ เมื่อ TM คือ Cr และ Co มี $x \leq 0.015$ เมื่อ TM คือ Fe มี $x \leq 0.30$ โดยเทคนิคออโตคอมบัสชัน อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ ทุกตัวอย่างที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของทินออกไซด์ ไม่มีโครงสร้างของโลหะออกไซด์อื่นเจือปน มีขนาดผลึกเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5 - 20 nm อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ ทุกตัวอย่างแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแถบช่องว่างแบบตรง มีพลังงานแถบช่องว่างอยู่ระหว่าง 3.2 eV ถึง 3.8 eV โลหะทรานซิชัน TM ทุกอะตอมเข้าไปแทนที่โลหะ Sn ในโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ของทินออกไซด์ โดยโลหะ Cr โลหะ Co และโลหะ Fe มีเลขออกซิเดชัน +4, +2 และ +3 ตามลำดับ

ณ อุณหภูมิห้อง อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกแบบอ่อน และอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ เฝ้าแคลไซน์ที่ 600 °C มีความเป็นเฟอร์โรแมกเนติกดี มีค่าเมกเนไทเซชันอิ่มตัวเท่ากับ 0.039 μ_B/Cr ขณะที่อนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิห้องได้ดีเมื่อเฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C อนุภาคนาโนทินออกไซด์เจือด้วยโลหะ Fe เมื่อปริมาณโลหะ Fe มากกว่า 0.015 atomic% ส่วนมากแสดงสมบัติซูเปอร์พาราแมกเนติก เฉพาะ $\text{Sn}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_{2-\delta}$ เท่านั้นที่แสดงสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกที่อุณหภูมิห้อง โดยอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{0.995}\text{Fe}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ เฝ้าแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 °C แสดงสมบัติเหล็กดีที่สุด มีค่าเมกเนไทเซชันอิ่มตัวเท่ากับ 0.256 μ_B/Fe

ABSTRACT

Project Code: MRG4880056

Project TITLE: Room Temperature Ferromagnetic in Transition metal dope Tin Oxides
Semiconductors: Toward Spintronic Technology

Investigator: TAWEESEK SUDYOADSUK, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Project Period: 1 year

KEYWORDS : DILUTED MAGNETIC SEMICONDUCTOR / AUTOCOMBUSTION /
TRANSITION METAL / TIN OXIDE / NANOPARTICLES

247338

The $\text{Sn}_{1-x}\text{TM}_x\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticles samples (TM = Cr and Co with $x \leq 0.015$ and Fe with $x \leq 0.30$) were prepared by the autocombustion technique. All samples exhibit a single SnO_2 rutile phase without any trace of an impurity phase. The average crystallite size is in range of 5 - 20 nm. They are the direct transition semiconductor with the band gap energy of 3.2 - 3.8 eV. The oxidation state of the doped transition metals in the SnO_2 matrix is +4, +2, and +3 for Cr, Co, and Fe, respectively. The $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticles show weak ferromagnetic-like behavior at room temperature. The magnetization of $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticles calcined at 600 °C exhibited a saturation magnetization of 0.039 μ_B/Cr . While the $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ sample show good ferromagnetism when calcined at 700 °C. Almost the high level dope Fe ($x > 0.015$) samples show a superparamagnetic characteristic. Only $\text{Sn}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticle exhibited ferromagnetism at room temperature. The $\text{Sn}_{0.995}\text{Fe}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ nanoparticle calcined at 500 °C has good magnetic properties with high saturation magnetization of 0.256 μ_B/Fe .

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	iii
บทคัดย่อ (ไทย).....	iii
บทคัดย่อ (อังกฤษ).....	iv
สารบัญ.....	vi
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	xi
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. การตรวจเอกสาร.....	4
2.1 ทิน (IV) ออกไซด์ (SnO_2).....	4
2.2 วัสดุ DMS.....	5
3 วิธีการทดลอง.....	9
4. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	12
4.1 สารประกอบ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$	12
4.2 สารประกอบ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$	22
4.3 สารประกอบ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$	32
5. สรุปผลการทดลอง.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก.....	51

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	รัศมีไอออนของโลหะทรานซิชันในสนามออกตะฮีดรอล..... 4
2.2	สารประกอบออกไซด์เซมิคอนดักเตอร์ที่มีโลหะทรานซิชันเจืออยู่..... 7
4.1	ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกและค่าเฟคเตอร์คอนเวอร์เจนซ์จากการวิเคราะห์ข้อมูล XRD ด้วยเทคนิค Rietveld refinement ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ 15
4.2	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวณจากภาพ TEM 17
4.3	ค่า E_g ของสารประกอบ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ เผาที่อุณหภูมิต่างๆ..... 19
4.4	ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกและค่าเฟคเตอร์คอนเวอร์เจนซ์จากการวิเคราะห์ข้อมูล XRD ด้วยเทคนิค Rietveld refinement ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ เผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ 25
4.5	ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกและค่าเฟคเตอร์คอนเวอร์เจนซ์จากการวิเคราะห์ข้อมูล XRD ด้วยเทคนิค Rietveld refinement ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ ($x = 0.005, 0.010$ and 0.015) 36
4.6	ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างผลึกและค่าเฟคเตอร์คอนเวอร์เจนซ์จากการวิเคราะห์ข้อมูล XRD ด้วยเทคนิค Rietveld refinement ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ ($x = 0.10, 0.20$ and 0.30)..... 37

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลรูไทล์	3
4.1	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ $\text{Sn}_{0.085}\text{Cr}_{0.015}\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่ อุณหภูมิต่างๆ	12
4.2	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่ 700 °C.....	13
4.3	การเปลี่ยนความเข้มของสเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ระนาบ (110) ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$	13
4.4	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากการทดลอง (exp) และจาก Rietveld refinement (calc) (a) $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ (b) $\text{Sn}_{0.990}\text{Cr}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$ และ (c) $\text{Sn}_{0.985}\text{Cr}_{0.015}\text{O}_{2-\delta}$ แคลไซน์ที่ 700 °C	14
4.5	ขนาดผลึกเฉลี่ยของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวณจากสมการ Scherrer.....	16
4.6	ขนาดผลึกเฉลี่ยของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวณโดยเทคนิค Williamson–Hall Plot method.....	17
4.7	ภาพ TEM และขนาดอนุภาคของ $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.015}\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่ 700 °C	17
4.8	สเปกตรากการดูดกลืนแสง Kubelka–Munk ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่อุณหภูมิ 600 °C.....	18
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $(f(R)h\nu)^2$ และ $h\nu$ ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่อุณหภูมิ 600 °C.....	19
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชัน (M) และสนามแม่เหล็ก (H) ณ อุณหภูมิห้อง ของ $\text{Sn}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ รูปเล็ก: ความเป็นไดอะแมกเนติกของ ภาชนะบรรจุตัวอย่างเทฟลอน.....	20
4.11	วงอีเตอร์ซิส ณ อุณหภูมิห้อง ของอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{0.990}\text{Cr}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$	21
4.12	วงอีเตอร์ซิส ณ อุณหภูมิห้อง ของอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{0.985}\text{Cr}_{0.015}\text{O}_{2-\delta}$	21
4.13	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่ 600 °C.....	22
4.14	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ $\text{Sn}_{0.990}\text{Co}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$	22
4.15	ความสูงของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (110) ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากการทดลอง (exp) และจาก Rietveld refinement (calc) ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่อุณหภูมิ 700 °C 24
4.17	ขนาดผลึกของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวนจากสมการ Scherrer..... 26
4.18	ขนาดผลึกของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวนโดยเทคนิค Williamson–Hall Plot method..... 26
4.19	(a) ภาพ TEM และ (b) ขนาดอนุภาคของ $\text{Sn}_{0.990}\text{Co}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$ เเผแคลไซต์ที่ 700 °C 27
4.20	สเปกตรา Kubelka-Munk ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่ 600 °C 28
4.21	ค่าพลังงานแถบช่องว่างของตัวอย่าง $\text{Sn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{2-\delta}$ 28
4.22	วงฮีสเตอร์ซิส ณ อุณหภูมิห้อง ของ $\text{Sn}_{0.995}\text{Co}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ 29
4.23	วงฮีสเตอร์ซิส ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบ $\text{Sn}_{0.910}\text{Co}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$ เเผแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 600 °C และ 700 °C 30
4.24	วงฮีสเตอร์ซิส ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบ $\text{Sn}_{0.985}\text{Co}_{0.015}\text{O}_{2-\delta}$ เเผแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 600 °C และ 700 °C 31
4.25	วงฮีสเตอร์ซิส ณ อุณหภูมิห้อง ของสารประกอบ $\text{Sn}_{0.990}\text{Co}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$ เเผแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 °C 31
4.26	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ $\text{Sn}_{0.090}\text{Fe}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่อุณหภูมิต่างๆ 32
4.27	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ เมื่อ $(0 \leq x \leq 0.015)$ เเผที่ 700 °C 33
4.28	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ เมื่อ $(0.10 \leq x \leq 0.30)$ เเผที่ 700 °C 33
4.29	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (110) ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ 34
4.30	ความเข้มของสเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งระนาบ (110) ของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31	สเปกตรากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากการทดลอง (exp) และจาก Rietveld refinement (calc) (a) $\text{Sn}_{0.990}\text{Fe}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$, (b) $\text{Sn}_{0.90}\text{Fe}_{0.10}\text{O}_{2-\delta}$ and (c) $\text{Sn}_{0.80}\text{Fe}_{0.20}\text{O}_{2-\delta}$ เเผที่อุณหภูมิ 700 °C 35
4.32	ขนาดผลึกเฉลี่ยของสารประกอบ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวณโดยใช้สมการ Scherrer รูปเล็ก: ขนาดผลึกเฉลี่ยของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ เมื่อ $x \leq 0.015$ 38
4.33	ขนาดผลึกเฉลี่ยของสารประกอบ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวณโดยใช้เทคนิค Williamson–Hall plot รูปเล็ก: ขนาดผลึกเฉลี่ยของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ เมื่อ $x \leq 0.015$ 39
4.34	(a) ภาพ TEM และ (b) การกระจายตัวของขนาดอนุภาค $\text{Sn}_{0.900}\text{Fe}_{0.100}\text{O}_{2-\delta}$ เเผแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 700 °C..... 40
4.35	สเปกตรา Kubelka–Munk ของอนุภาคนาโน $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ เเผแคลไซต์ที่ 600 °C..... 41
4.36	ค่าพลังงานแถบช่องว่างของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ คำนวณจากสเปกตรา Kubelka–Munk..... 41
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กของ $\text{Sn}_{0.995}\text{Fe}_{0.005}\text{O}_{2-\delta}$ 42
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กของ $\text{Sn}_{0.990}\text{Fe}_{0.010}\text{O}_{2-\delta}$ 43
4.39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กของ $\text{Sn}_{0.985}\text{Fe}_{0.015}\text{O}_{2-\delta}$ 43
4.40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2\delta}$ ($0.10 \leq x \leq 0.30$) เเผแคลไซต์ที่ 500 °C..... 44
4.41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2\delta}$ ($0.10 \leq x \leq 0.30$) เเผแคลไซต์ที่ 600 °C..... 44
4.42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเมกเนไทเซชันและสนามแม่เหล็กของ $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2\delta}$ ($0.10 \leq x \leq 0.30$) เเผแคลไซต์ที่ 700 °C..... 45

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a.u.	=	Arbitrary units
D , $\langle D \rangle$	=	Average crystallite size
DMS	=	Diluted magnetic semiconductor
DW-stat	=	Durbin-Watson statistic
EDS	=	Energy dispersive X-ray spectroscopy
E_g	=	Band gap energy
eV	=	Electron volt
FWHM	=	Full width at the half maximum
H_C	=	Coercive field
H	=	Magnetic field
JCPDS	=	the Joint Committee on Powder Diffraction Standards
K	=	Kelvin
M	=	Magnetization
MBE	=	Molecular beam epitaxy
MOCVD	=	Metalorganic chemical vapor deposition
M_R	=	Magnetic remanence
M_S	=	Saturation magnetization
NIR	=	Near Infrared
Oe	=	Oersted
OPA-MBE	=	Oxygen-plasma-assisted molecular-beam epitaxy
PLD	=	Pulsed laser deposition
R_B	=	Bragg Factor
R_{exp}	=	Expected R value
R_F	=	Crystallographic Factor
R_P	=	Profile Factor
R_{WP}	=	Weighted Profile Factor
SQUID	=	Superconducting quantum interference device

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T	=	Absolute temperature
T	=	Tesla
T_C	=	Currie temperature
TEM	=	Transmission electron microscopy
Temp.	=	Temperature
TM	=	Transition metals
T_N	=	Néel temperature
UV	=	Ultra violet
VIS	=	Visible
VSM	=	vibrating sample magnetometer
WHP	=	Williamson–Hall Plot
XPS	=	X-ray photoelectron spectroscopy
XRD	=	X-ray diffraction
$y_i (calc)$	=	The net intensity calculated at point i
$y_i (bgnd)$	=	The background intensity calculated at point i
$y_i (obs)$	=	The observed intensity at point i
χ	=	Magnetic susceptibility
μ_B	=	Bohr magnetons