

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์ที่เตรียมโดยเทคนิคการสปาร์ค

Electrical Properties of Nickel Oxide Nanoparticle Thin Films Using Sparking Process

รุจิภาส เหลือมสีจันทร์¹, บุปผชาติ ต่อบุญสูง^{1*}
Rujipas Lueamsijun¹, Buppachat Toboosung^{1*}

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์เตรียมโดยเทคนิคการสปาร์คระหว่างปลายลวดโลหะนิกเกิล โดยใช้ลวดโลหะนิกเกิลต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง ใช้เวลาในการสปาร์ค 1–4 ชั่วโมง หลังการสปาร์คฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจกสไลด์ถูกนำไปวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นโดยใช้เครื่องวัดแบบสี่จุดและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองพบอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์บนแผ่นกระจกสไลด์ และความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นมีค่า 0.004–0.2 mΩ และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.004 mΩ ที่ระยะเวลาในการสปาร์ค 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300–400 °C ผลการทดลองพบว่ามีค่าความต้านทานเชิงแผ่นต่ำสุดเท่ากับ 2.62 mΩ ที่อุณหภูมิ 400 °C และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นก่อนการอบอ่อนมีค่าความต้านทานน้อยกว่าหลังการอบอ่อน

คำสำคัญ : นิกเกิลออกไซด์ กระบวนการสปาร์ค

Abstract

Nickel oxide nanoparticle thin films prepared by sparking technic between the nickel metal wires. The two wires were connected to the anode and cathode of the high voltage power supply and prepared the sparking time of 1-4 hr. The coating thin films on glass slide were measured the electrical sheet resistance by a four point probe and analyzed the thin film surface by a scanning electron microscope. The results showed that the nickel oxide nanoparticles were coated on a glass plate. An electric sheet resistance was in the range of 0.004-0.2 mΩ , which had the lowest at 0.004 mΩ for the preparation of 2 hr. The lowest electrical sheet resistance of thin films was annealed at the temperature range of 300-400 °C. The results showed that the lowest electrical sheet resistance was 2.62 mΩ at the annealing temperature of 400 °C. It also found that the electrical sheet resistance decreased with increasing the annealing temperature. However, the resistance-oriented sheet before annealing with less resistance after annealing.

Keywords : nickel oxide, sparking process

บทนำ

ปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีล้วนต้องเกี่ยวข้องกับวัสดุ อยู่เสมอ ทั้งในเชิงของการผลิตและการควบคุมกระบวนการผลิต ตลอดจนการออกแบบทั้งในรูปแบบ องค์ประกอบและ โครงสร้างต่างๆ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมถูกต้อง จึงได้มีการค้นคว้าวัสดุใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติพิเศษขึ้น ทำให้เกิดความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีหลากหลาย ด้าน เช่น ชีววิทยาการแพทย์ ทางอิเล็กทรอนิกส์ และนาโน

เป็นต้น โดยเฉพาะนาโนเทคโนโลยี กำลังได้รับความสนใจเป็น อย่างมากเพราะว่า สามารถนำไปประยุกต์ ใช้ได้กับเทคโนโลยี ด้านต่างๆ¹ การพัฒนาฟิล์มบางเป็นสารโปร่งแสงที่มีคุณสมบัติ ในการนำไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาทางด้าน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็น ขั้วไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดต่างๆ อย่างแพร่หลาย² จึงส่งผลให้มีการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์โครงสร้างวัสดุและการเตรียม ฟิล์มบางในระดับนาโนหลากหลายวิธี เช่น ดีซี สปีดเตอริง

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² โปรแกรมวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา



(DC Sputtering)³ อาร์เอฟสปัตเตอริง (RF Sputtering)⁴ วิธีการตกสะสมไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD)⁵ วิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvo Thermal)⁶ วิธีระเหยลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation)⁷ วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)⁸ วิธีระบบอาร์เอฟแมกเนตรอน สปัตเตอริง (Radio Frequency Magnetron Sputtering)⁹ และวิธีการสปาร์ค¹⁰ เป็นต้น วัสดุที่ใช้สำหรับการเตรียมโครงสร้างระดับนาโนก็มีหลากหลายยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ คาร์บอน และโลหะออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเมื่อสารดังกล่าวอยู่ในระดับนาโนจะมีสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง สมบัติเชิงกล และ สมบัติทางแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น ซึ่งนาโนเกิลมีคุณสมบัติทางแสง¹¹ ทางไฟฟ้า^{12,13} และสามารถใช้ในการผลิตแบตเตอรี่¹⁴ ทูตียภูมิ สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีแบบย้อนกลับได้ และเหมาะสมกับการใช้งานในระบบเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่¹⁵ จากคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ¹⁶ และความหลากหลายในการประยุกต์ใช้ของวัสดุในระดับนาโนของนาโนเกิลออกไซด์ จึงสนใจที่จะเตรียมวัสดุโลหะออกไซด์ของนาโนเกิลและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอนุภาคนาโนนาโนเกิลออกไซด์โดยเทคนิคการสปาร์คระหว่างปลายลวดนาโนเกิล¹⁷ ด้วยไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง¹⁸ ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นโดยวิธีโพรบพอยท์โพรบจากนั้นได้นำฟิล์มไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสม 300 – 400 องศาเซลเซียส¹⁹ และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางที่เกิดโครงสร้างเป็นผลึก (Crystal Structure)²⁰ จากกระบวนการสปาร์คด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโนนาโนเกิลออกไซด์ด้วยวิธีการ สปาร์ค ทำโดยตัดกระจกสไลด์เป็นแผ่นรองรับให้มีขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ล้างกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนโดยสิ้นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกและล้างด้วยเมทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 30 นาที นำกระจกไปทำให้แห้งสนิทโดยการเป่าลมร้อน การ สปาร์คฟิล์มบางอนุภาคนาโนนาโนเกิลออกไซด์ทำโดยการตัดลวดนาโนเกิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตรใส่ลงในขั้วไฟฟ้าเครื่องจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง วางกระจกสไลด์บนแท่นเลื่อน xy¹⁰ โดยจัดให้ลวดนาโนเกิลมีระยะห่างปลายลวด และระยะความสูงของปลายลวดกับกระจก 1 มิลลิเมตร ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 5 กิโลโวลต์¹⁹ ระยะเวลาการสปาร์คลวดโลหะนาโนเกิล (Ni) ใช้เวลา 1–4 ชั่วโมง และนำฟิล์มบางไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์ฟิล์มบางนาโนเกิลออกไซด์ทำโดยวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นด้วยเครื่องวัดแบบสี่จุด (Four Points Probe) และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 50,000 เท่าของฟิล์มบางอนุภาคนาโนนาโนเกิลออกไซด์ โดยใช้ระยะเวลา 0 – 4 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มบางอนุภาคนาโนนาโนเกิลออกไซด์มีลักษณะเป็นการรวมกันของเม็ดอนุภาคขนาดเล็กรวมตัวกันจนเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางขึ้นบนแผ่นกระจก ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบางมีผลต่อโครงสร้างเป็นผลึก (Crystal Structure) และปริมาณในการตกสะสมของอนุภาคนาโนนาโนเกิลออกไซด์ และ Figure 1 (c) จะเห็นว่าภาพที่เกิดจากการสปาร์คโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง มีลักษณะของฟิล์มเป็นผลึกบางค่อนข้างสม่ำเสมอที่สุด

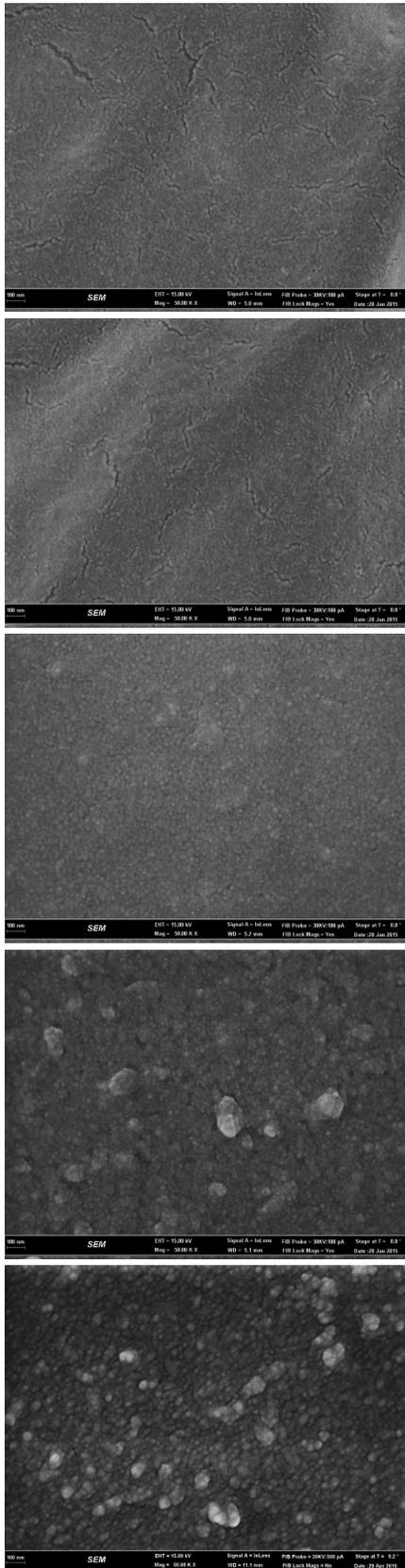


Figure 1 SEM image of a thin film nano-nickel oxide particles (a) 0 hr. , (b) 1 hr. , (c) 2 hr. , (d) 3 hr. and (e) 4 hr.

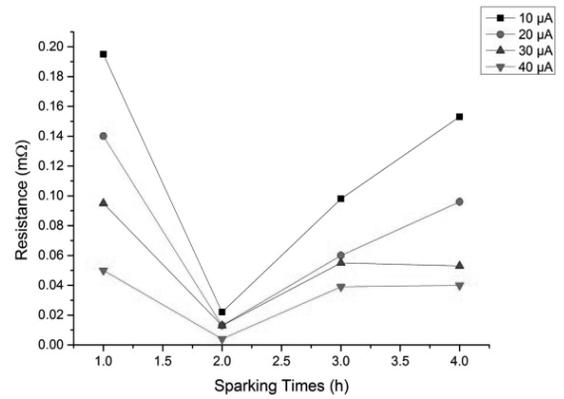


Figure 2 Graph oriented electrical sheet resistance of a thin film of nickel oxide nanoparticles. When an electric current 10 μA- 40 μA duration Park at 1-4 hours.

ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์มบางอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์ เมื่อให้กระแสไฟฟ้า 10 μA- 40 μA ระยะเวลาการสปาร์คที่เวลา 1 - 4 ชั่วโมง ดังภาพที่ 2 พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นมีค่า 0.004 – 0.2 mΩ และค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.004 mΩ ที่ระยะเวลาในการสปาร์ค 2 ชั่วโมง และเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานเชิงแผ่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย การให้กระแสไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางนิกเกิลออกไซด์ในขณะที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดแบบสี่จุด พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ 40 μA จะให้ค่าวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นที่น้อยที่สุด

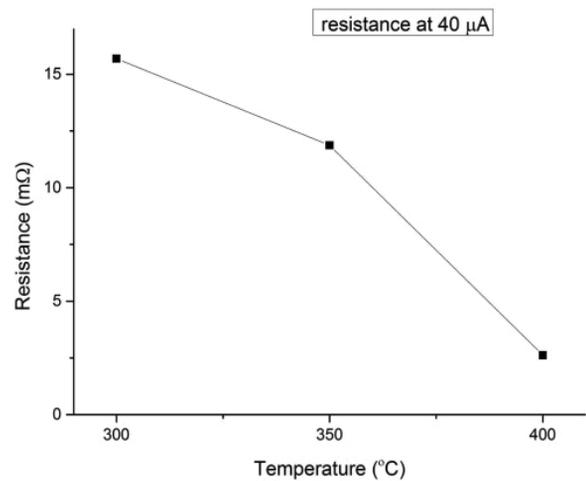


Figure 3 Graph oriented electrical sheet resistance of a thin film of nickel oxide nanoparticles take the Park at 2 hours, 40 μA power after annealing at 300, 350, and 400 ° C.



ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์มบางอนุภาคนาโน निकเกิลออกไซด์ ระยะเวลาการสปาร์ค 2 ชั่วโมง โดยให้กระแสไฟฟ้า 40 μA หลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 ,350 และ 400 $^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาอบอ่อน 2 ชั่วโมง ให้กระแสไฟฟ้า 40 μA ดังภาพที่ 3 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นในการสปาร์ค 2 ชั่วโมงอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 $^{\circ}\text{C}$ ที่มีค่าสูงสุด 15.69 $\text{m}\Omega$ ที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ ค่าความต้านทานมีค่าต่ำสุด 2.62 $\text{m}\Omega$ และพบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบอ่อน

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ฟิล์มบางอนุภาคนาโน निकเกิลออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการสปาร์ค เมื่อ วิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย พบว่าที่ระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบาง 2 ชั่วโมง มีลักษณะพื้นผิวเม็ดขนาดเล็กกระจายตัวสม่ำเสมอที่สุด ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นการ สปาร์คที่เวลา พบว่าเวลาในการสปาร์ค 2 ชั่วโมง และการให้กระแสไฟฟ้า 40 μA ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นมีค่าต่ำสุด และหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 300 ,350 และ 400 $^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาอบอ่อน 2 ชั่วโมง ใช้การ สปาร์ค 2 ชั่วโมง และทดสอบโดยใช้กระแสไฟฟ้า 40 μA พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการอบอ่อน และที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}\text{C}$ ค่าความต้านทานเชิงแผ่นมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 2.62 $\text{m}\Omega$ ดังนั้นจากการวิจัยในครั้งนี้สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอนุภาคนาโน निकเกิลออกไซด์ โดยการวิเคราะห์ค่าความต้านทานเชิงแผ่น พบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเตรียมฟิล์มบางอนุภาคนาโน निकเกิลออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างผลึก(Crystal Structure) ของฟิล์มบางโดยปกติค่าของ (Lattice constants) กับรัศมีอะตอมของโลหะ निकเกิลที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ที่อุณหภูมิห้อง 0.352 nm. และค่า Atomic radius R 0.125 nm. และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนซึ่งมีผลต่อโครงสร้างผลึก(Crystal Structure)ที่มีความเป็นผลึกสูงตามเงื่อนไขเวลา สปาร์คส่งผลต่อค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางอนุภาคนาโน निकเกิลออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการสปาร์ค

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโปรแกรมวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป ศูนย์วิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่สนับสนุนการทำวิจัยและให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.บุปผชาติ ต่อบุณสูง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้โอกาสทำงานวิจัยได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ พร้อมทั้งชี้แนะหลักการต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอตลอดมาตั้งแต่ต้นจนสำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. จุฑาธิป คุณาสุวรรณค์. รายงานการสืบค้นข้อมูลความก้าวหน้าและสถานภาพเทคโนโลยีวัสดุเพื่อการพัฒนาและการผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกาประจำปีงบประมาณ 2554 (ธันวาคม 2553 - พฤศจิกายน 2554). สำนักงานปลัดกระทรวง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สำนักงานที่ปรึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประจำกระทรวงชิงตัน ดี.ซี.); 2554. หน้า 4 -19.
2. ธวัช แพรกทอง. สมบัติทางแสงและไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ตกสะสมบนแผ่นแก้วโดยเทคนิคการสปาร์ค. ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2553.
3. นันทนัช วัฒนสุภิญญา. สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียมเตรียมโดยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง. ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2553.
4. เกษรรัตน์ อักษรรัตน์. ฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้า ZnO(AI) เตรียมโดยอาร์เอฟและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแบบตามลำดับ. ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์. บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2545.
5. วิชาญ เตชิตธีระ และวราวุฒิ เถาลัดดา. การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่ไมโครเวฟ. ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพและคณิตศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กระทรวงศึกษาธิการ; 2554.
6. K. Anandan , V. Rajendran. Morphological and size effects of NiO nanoparticles via solvothermal process and their optical properties. Journal Contents lists available at ScienceDirect. Materials Science in Semiconductor Processing. 2011 Jan 15;14:43– 47.



7. D.Y. Jiang , J.M. Qin , X. Wang , S. Gao , Q.C. Liang, J.X. Zhao. Optical properties of NiO thin films fabricated by electron beam evaporation. Journal Contents lists available at SciVerse ScienceDirect. Vacuum. 2011 Apr 13; 86:1083-1086.
8. Bing Zhao, Jinsong Song, Tao Fang, Peng Liu, Zheng Jiao, Haijiao Zhang, Yong Jiang. Hydrothermal method to prepare porous NiO nanosheet. Journal Contents lists available at SciVerse ScienceDirect. Materials Letters. 2011 Jul 10;67:24–27.
9. T.F. Chen, A.J. Wang, B.Y. Shang, Z.L. Wu, Y.L. Li, Y.S. Wang. Property modulation of NiO films grown by radio frequency magnetron Sputtering. Contents lists available at ScienceDirect. Journal of Alloys and Compounds. 2015 Feb 11;643:167–173.
10. พิเศษ สึงหีใจ. การพัฒนาเครื่องสังเคราะห์อนุภาคนาโนและฟิล์มบางของโลหะออกไซด์บางชนิดโดยกระบวนการสปาร์ค. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) 2555.
11. A. Sawaby, M.S. Selim, S.Y. Marzouk, M.A. Mostafa, A. Hosny. Structure, optical and electrochromic properties of NiO thin films. Journal Contents lists available at ScienceDirect Physica B. Physica B. 2009 Sep 30;405:3412–3420.
12. ศูนย์เทคโนโลยีแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช.), กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. นานาเทคโนโลยี งานวิจัยนาโนเทคโนโลยีของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: ศูนย์นาโนเทคโนโลยี; 2551.
13. S.M.A. Shibli, G.J. Harikrishnan, Anupama V.R., K.S. Chinchu, B.N. Meena. Development of nano NiO incorporated nickel–phosphorus coatings for electrocatalytic applications. Journal Contents lists available at ScienceDirect Surface & Coatings Technology. 2014 Oct 28;262:48–55.
14. Hamid Dalvand, Gholam Reza Khayati, Esmaeel Darezereshki, Ahmad Irannejad. A facile fabrication of NiO nanoparticles from spent Ni–Cd batteries. Journal Contents lists available at ScienceDirect. Materials Letters. 2014 Feb 26;130:54-56.
15. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานการประยุกต์ใช้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ปี 2552:3-22.
16. N.M. Deraz. Magnetic behavior and physicochemical properties of Ni and NiO nano-particles. Contents lists available at SciVerse ScienceDirect. Journal Current Applied Physics. 2011 Jul 24;12:928-934.
17. ศิวัตม์ พออินทร์. สมบัติโฟโตแคทาลิติกของฟิล์มบางอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมโดยกระบวนการสปาร์ค. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2553.
18. วีระเดช ทองสุวรรณ. การเตรียมฟิล์มบางของจุดนาโนของโลหะบางชนิดด้วยเทคนิคการสปาร์คภายใต้การควบคุมบรรยากาศและสมบัติการเปียกน้ำของฟิล์ม. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์. บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2549.
19. Tewasin Kumpika. Characterization of ZnO – TiO Nanoparticle Thin Films Prepared by Sparking Process. Doctor of Philosophy in Materials Science. Chiang Mai University. The Graduate School. Chiang Mai University. 2009 Apr;70-115.
20. แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2545.