

การสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโน Synthesis of Zinc Oxide Nanostructures

ธีระพงษ์ แสนทวีสุข

Theerapong Santhaveesuk

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

Faculty of Science, Pibulsongkram Rajabhat University

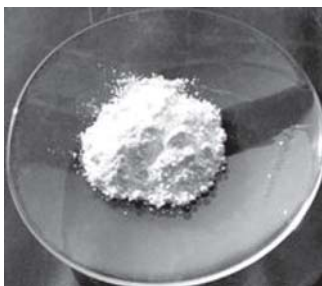
E-mail: s_theerapong@yahoo.co.th

(รับบทความเมื่อ 12 พฤษภาคม 2550; ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ 29 มิถุนายน 2550)

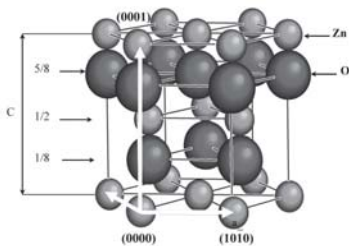
คำสำคัญ : อนุภาคนาโน สังกะสีออกไซด์ การปลูกผลึก

Keywords : Nanoparticles, ZnO, Crystal growth

สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นสารเคมีที่มีผงสีขาว น้ำหนักโมเลกุล 81.4 g/mol และมีโครงสร้างแบบ wurtzite (hexagonal) ลักษณะโครงสร้างผลึกของสังกะสีออกไซด์ แสดงดังรูป



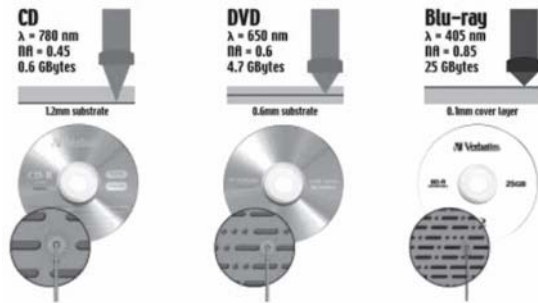
(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) ผงของสังกะสี (Wikipedia, the free encyclopedia, Zinc oxide. 2007) และ (b) โครงสร้างผลึก wurtzite (ศศิธร ยะธา, 2549)

มีจุดหลอมเหลว 1,975 °C สามารถใช้งานได้หลากหลาย อาทิ เป็นส่วนผสมรวมกับ เหล็กออกไซด์ (iron(III) oxide, Fe_2O_3) ใช้ใน calamine lotion เป็นส่วนผสมรวมกับ stearic acid ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรม ยางพารา (Wikipedia, the free encyclopedia, Zinc oxide. 2007) นอกจากนี้สังกะสีออกไซด์ ยังเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ประเภท direct band gap มีช่องว่างพลังงาน 3.37 eV ที่อุณหภูมิห้อง ใช้งานเป็นเซนเซอร์ตรวจจับแสง (Photodetector) (Z.L. Wang, 2004) อุปกรณ์แปลงความถี่ (Frequency converter) ไดโอดเปล่งแสง (LEDs) ที่ให้แสงในช่วงความยาวคลื่นของสีฟ้า (Wikipedia, the free encyclopedia, Zinc oxide. 2007 and D.P. Norton, 2004) ซึ่งปัจจุบันได้นำมาใช้เป็นหัวอ่านของเครื่องอ่านสื่อบันทึกต่างๆ ที่ช่วยให้สามารถลดข้อจำกัดของพื้นที่หน่วยความจำในการผลิตแผ่น CD หรือ DVD เรียกว่า Blue ray เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาโดยบริษัทโซนี่ แสดงดังรูป

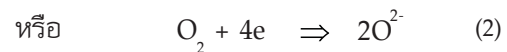
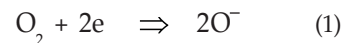


รูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีสื่อ บันทึก CD DVD และ Blue ray (One Point Storage Systems, Informationsseite zur Verbatim Blu-ray Disk. 2006.)

จะเห็นได้ว่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ใช้อ่านแผ่น CD และ DVD นั้นมีผลต่อความจุของแผ่นด้วย ในเทคโนโลยี CD จะใช้เลเซอร์ความยาวคลื่น ประมาณ 780 nm ทำให้ความจุของแผ่น CD มีแค่ 700 MB เท่านั้น เทคโนโลยี DVD ใช้เลเซอร์ความยาวคลื่น ประมาณ 650 nm ได้ความจุเพิ่มขึ้นเป็น 4.7 GB แต่ในเทคโนโลยีของ Blue ray ใช้เลเซอร์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำสังกะสีออกไซด์ ให้แสงในย่านสีฟ้า มีความยาวคลื่นประมาณ 405 nm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าทั้ง 2 เทคโนโลยีดังกล่าวช่วยให้ลดขนาดของ ร่อง หรือ จุด ในการบันทึกข้อมูลลงได้มากจนทำให้ความจุของแผ่น Blue ray มีค่าสูงถึง 25 GB (One Point Storage Systems, Informationsseite zur Verbatim Blu-ray Disk. 2006.)

ฟิล์มบางโปร่งแสงที่เคลือบด้วยสังกะสีออกไซด์ ใช้สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์กำลังมีการวิจัยอย่างหลากหลาย ซึ่งรวมถึงการผลิตเป็นจอ LCD ขั้วไฟฟ้า (D.P. Norton, 2004) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กประเภทเฟอร์โร (ferromagnetism) ที่เอื้อต่อการใช้งานเป็นหน่วยความจำในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นสาร

เพียโซอิเล็กทริกที่สามารถนำไปใช้งานได้หลายด้านไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เครื่องอัลตราโซนิกส์ ไมโครโฟน เป็นต้น (Wikipedia, the free encyclopedia, Zinc oxide. 2007) และสังกะสีออกไซด์ยังมีคุณสมบัติในการตรวจวัดความชื้น (Y. Zhang, 2005) และตรวจวัดก๊าซได้อีกด้วย(ศศิธร ยะธา, 2549) สำหรับเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซนั้นส่วนมากอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของสภาพการนำไฟฟ้าของหัววัดเมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซที่ต้องการตรวจวัด สังกะสีออกไซด์เป็นสารเคมีจำพวกโลหะออกไซด์ ซึ่งปกติที่ผิวของโลหะออกไซด์จะมีก๊าซออกซิเจนจากอากาศมาจับ ณ ตำแหน่งที่ขาดออกซิเจน(oxygen vacancies) ก๊าซออกซิเจนจะดึงเอาอิเล็กตรอนจากผิวออกไปและเกิดการแตกตัวเป็นไอออนลบ O^- หรือ O^{2-} ดังสมการที่ (1) และ (2)

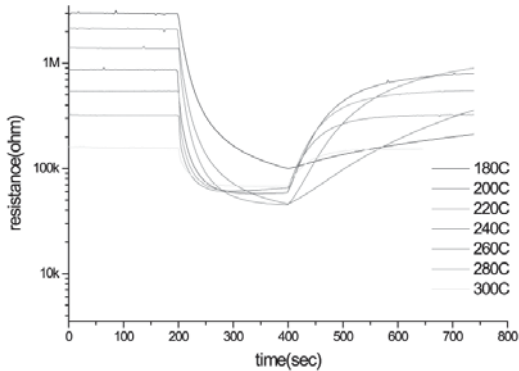
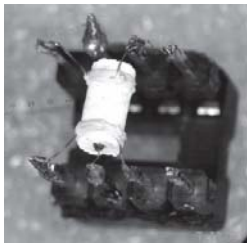


ไอออนลบนี้จะมาจับอยู่ที่ผิวของโลหะออกไซด์ทำให้เกิดกำแพงศักย์ส่งผลให้การนำไฟฟ้าของโลหะออกไซด์ลดลง เมื่อมีก๊าซที่ต้องการตรวจวัดเข้ามาในบริเวณผิวของโลหะออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) หรือ แอมโมเนีย (NH_3) ก๊าซเหล่านี้จะรวมตัวกับออกซิเจนที่บริเวณผิวแล้วหลุดออกไปเกิดเป็นก๊าซชนิดใหม่และจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาดังสมการ (3) และ (4) ทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ และแตกต่างกันไปตามชนิดของก๊าซ (W. Gopel, 1999)



หรือ





รูปที่ 3 หัววัดก๊าซที่ผลิตจาก ZnO และกราฟของความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ณ อุณหภูมิต่างๆ ในขณะที่ตรวจจับก๊าซเอทานอล (ศศิธร ยะธา, 2549)

ในรูปที่ 3 เป็นตัวอย่างหัววัดก๊าซที่ผลิตจากอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ และกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่ออยู่ในบรรยากาศของเอทานอล ด้วยคุณสมบัติที่ดีและหลากหลายของสังกะสีออกไซด์ดังกล่าวมานี้ ทำให้สารชนิดนี้เป็นที่สนใจและมีประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ในหลายๆ ด้าน ซึ่งนักวิจัยทั่วโลกได้ดำเนินการวิจัยกันอยู่ในปัจจุบัน การประยุกต์ใช้งานอนุภาคนาโนของ GaN, ZnO และ SnO₂ แสดงในตารางที่ 1 (P.J Pauzauskie, 2006)

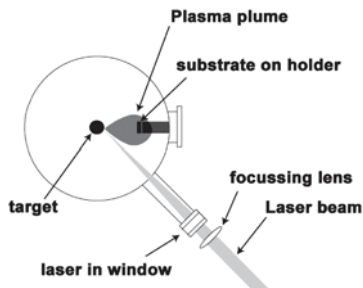
ตารางที่ 1 แสดงการประยุกต์ใช้งานลวดนาโนที่สังเคราะห์ได้จาก GaN, ZnO และ SnO₂

Nanowires	Optical functions	Characteristics
GaN	Nanolaser	Emission wavelength: 370-390 nm Threshold: ~ 500 nJ/cm ² Cavity Q factor: 500-1500 Threshold gain: 400-1000 cm ⁻¹ Emission wavelength: 380-420 nm
	Light-emitting diodes	
ZnO	Nanolaser	Emission wavelength: 370-400 nm Threshold: >70 nJ/cm ² Cavity Q factor: 1000-1500 Threshold gain: 1000-3000 cm ⁻¹ Effective second-order susceptibility: 5.5 pm/V Energy converting efficiency: 3.5% UV light detector
	Frequency converter	
	Solar cell Photodetector	
SnO ₂	Waveguide	Propagation loss: 1-8 dB mm ⁻¹
	Evanescent wave optical sensor	Single molecular level detection

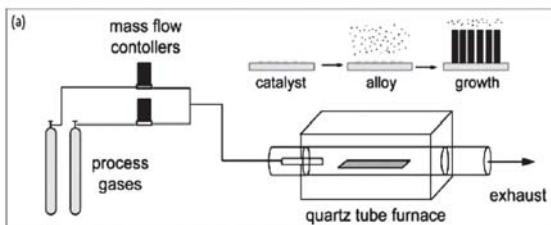
โดยทั่วไปแล้ว มีความจำเป็นต้องสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ให้เป็นผลึกขนาดเล็กก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยเฉพาะการนำไปสร้างเป็นหัววัดก๊าซ เนื่องจากเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลงพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลดีต่อการใช้งานตรวจจับก๊าซต่างๆ วิธีการสังเคราะห์ที่กล่าวถึงนี้มีอยู่หลายวิธี อาทิ Chemical vapor depositions (A. Umar, 2005), Wet chemical (J. Lui, 2005), Hydrothermal (G.H. Yue, 2006), Thermal evaporation (C. Li, 2006), Oxidation

(ศศิธร ยะธา, 2549), Sputtering (S. Chooan, 2005), Current heating deposition (P. Singjai, 2007.), Solution calcination process (H. Nui, 2007), Texture self-assembly (Z.L. Wang, 2004) และ modified chemical bath deposition (H. Wang, 2006) เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ในการสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ในระดับจุลภาค (นาโนเมตร-ไมโครเมตร) มีค่าใช้จ่ายสูง จำเป็นต้องควบคุมตัวแปรต่าง ๆ หลายอย่างให้เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความดัน บรรยากาศใน

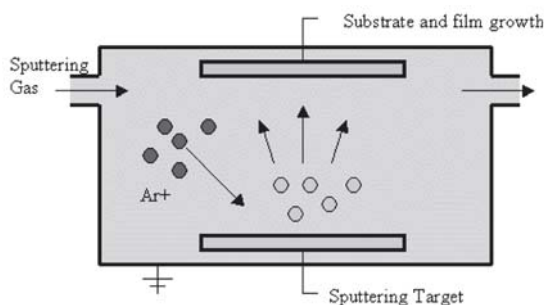
ขณะทำการสังเคราะห์ สารตั้งต้น substrate การเติมสารเจือ ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์อย่างมาก ตัวอย่างกระบวนการในสังเคราะห์สัณฐานของสโตนส์ ได้แก่ Pulse laser deposition, Vapor deposition และ Sputtering แสดงดังรูป 4-6



รูปที่ 4 แสดงเครื่องมือในการสังเคราะห์ด้วยวิธี Pulse Laser depositions (Wikipedia, the free encyclopedia, Pulse Laser depositions. 2007)



รูปที่ 5 แสดงเครื่องมือในการสังเคราะห์ด้วยวิธี Vapor depositions (P.J Pauzauskie, 2006)



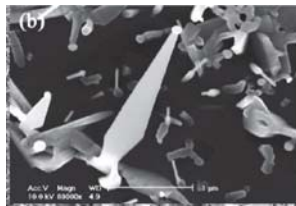
รูปที่ 6 แสดงเครื่องมือในการสังเคราะห์ด้วยวิธี Sputtering method (Wikipedia, the free encyclopedia, Sputter deposition. 2007)

ในการสังเคราะห์โดยอาศัยวิธี Pulse laser deposition จะทำในสภาพความดันต่ำโดยการใช้แสงเลเซอร์ยิงไปยังสารตัวอย่างให้เกิดความร้อนทำให้อะตอมของสารตัวอย่างหลุดออกมาและอยู่ในสภาพ plasma และ เคลือบบนผิว substrate ส่วนวิธี Chemical vapor deposition จะวาง substrate ไว้ในเตาเผาแล้วผ่านให้สารตัวอย่างเข้าไปในเตาที่มีอุณหภูมิสูงร่วมกับก๊าซเจือย เช่น อาร์กอน ออกซิเจน หรือไนโตรเจน เมื่อได้รับความร้อนสารตัวอย่างจะควบแน่นเกิดการตกตะกอนเป็นของแข็งเคลือบบน substrate ที่วางไว้สำหรับวิธี Vapor deposition นั้นจะคล้ายคลึงกับ Chemical vapor deposition เพียงแต่นำสารตัวอย่าง ใส่ไปในเตาเผาตั้งแต่เริ่มต้นโดยสารตัวอย่างอาจจะอยู่ในรูปของ ผง เม็ดสาร หรือ ของเหลวก็ได้ การสังเคราะห์โดยวิธี Sputtering จะทำในบรรยากาศของก๊าซเจือยความดันต่ำ โดยนำสารตัวอย่างไปอัดเป็นเม็ดนำไปวางเป็นเป้า เพื่อให้อนุภาคของก๊าซเจือยที่ทำหน้าที่เป็น ลูกกระสุนเมื่ออยู่ในสภาพพลาสมา (plasma) ยิ่งใส่เป้าให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างตกลงมาเคลือบบน substrate ที่วางไว้ได้สารตัวอย่าง โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าและแรงโน้มถ่วงเป็นตัวเร่งอนุภาค กระสุนและดึงให้สารตัวอย่างเคลือบบนผิวตามลำดับกระบวนการ Current heating deposition นั้น อาศัยการเผาผลาญตัวอย่าง ด้วยความร้อนสูงโดยการให้กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูง สามารถทำได้ในบรรยากาศของก๊าซเจือยที่สภาวะความดันปกติ เมื่อสารตัวอย่างได้รับความร้อนจะระเหยเป็นไปแล้วควบแน่นเป็นผลึกที่บริเวณผิว ในการสังเคราะห์พบว่าอนุภาคสังกะสีออกไซด์ระดับจุลภาคที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันหลากหลายแบบ อาทิ nanowires (S.C. Lyu, 2002), nanostars (A. Umar, 2005), nano necktie-likes (J.K Jian, 2006),

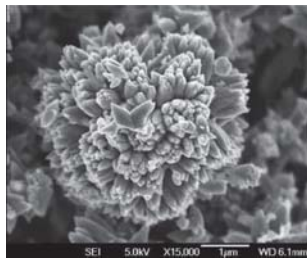
nanoporous (H. Wang, 2006), nanobelts (S. Choopan, 2005), nanocombs (Y.Q. Chen, 2005), nanoflowers (J. Lui, 2005), nanomushroom-like (N. Hiu, 2007), nanocages, nanoring, nanospirals, nanohelix, nanopropeller (Z.L. Wang, 2004) และอื่นๆ ตัวอย่างของอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ แสดงดังรูป 7 - 8



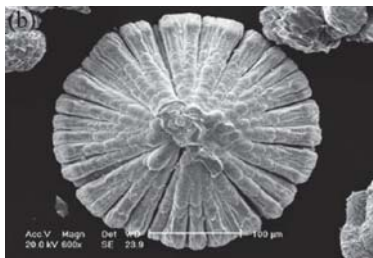
(a)



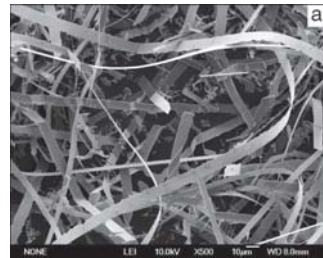
(b)



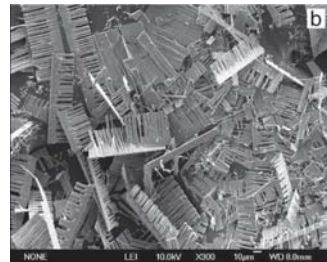
(c)



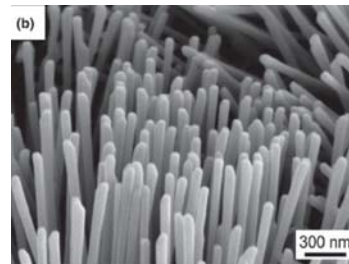
(d)



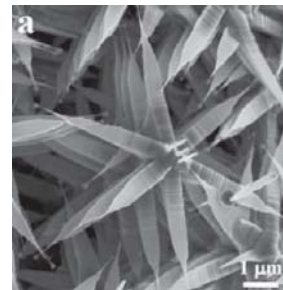
(e)



(f)



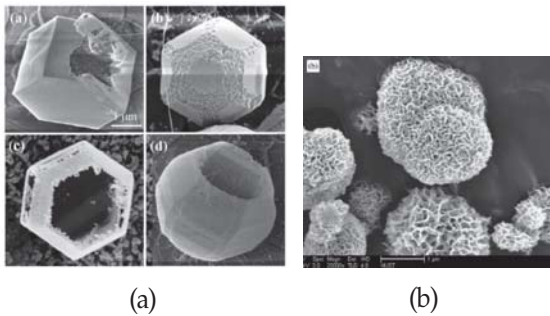
(g)



(h)

รูปที่ 7 (a) nanostars สังเคราะห์จากวิธี CVD (A.Umar, 2005) (b) nano necktie-like สังเคราะห์จากวิธี Vapor transport deposition (J.K. Jian, 2006) (c) nanoflowers สังเคราะห์จากวิธี Wet chemical (J. Lui, 2005) (d) mushroom-like nanoparticles สังเคราะห์จากวิธี Solution calcinations (H. Niu, 2007) (e) microbelts (f) microcombs สังเคราะห์

จากวิธี Direct thermal evaporation (Y.Q. Chen, 2005) (g) nanowires สังเคราะห์จากวิธี Oxidation (S.C. Lyu, 2002) และ (h) nanopropeller (Z.L. Wang, 2004)



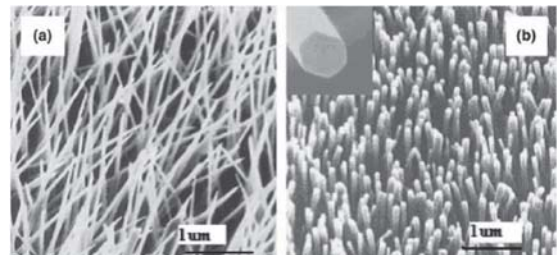
รูปที่ 8 (a) nanocages สังเคราะห์จากวิธี Texture self-assembly (Z.L. Wang, 2004) (b) nanoporous สังเคราะห์โดยวิธี Via a modified chemical bath deposition method (H. Wang, 2006)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในการสังเคราะห์อนุภาค สัณกะสือออกไซด์ในระดับนาโนนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์ซึ่งต้องควบคุมให้เป็นอย่างดี ซึ่งประกอบด้วย สารตั้งต้น อัตราการไหลของก๊าซ substrate ที่ใช้รองรับ อุณหภูมิ ระยะเวลา ความดันของบรรยากาศ และสารเคมีที่ใช้เร่งปฏิกิริยา โดยมีรายละเอียด ดังนี้

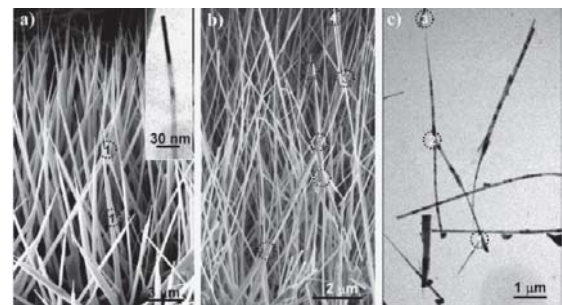
1. สารตั้งต้น

สารตั้งต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อการสังเคราะห์สัณกะสือออกไซด์ในระดับจุลภาค เนื่องจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี การดูดกลืน การแพร่ของอะตอมหรือโมเลกุลของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบจะต้องได้รับการพิจารณาเป็นอันดับแรก และกรรมวิธีการสังเคราะห์ก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีผลต่อการเลือกใช้สารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น P.X. Gao และคณะ (P.X. Gao, 2005) สังเคราะห์ nanowires จากวิธี evaporation ใช้ ZnO เป็นสารตั้งต้น ในขณะที่

X.Q. Meng (X.Q. Meng, 2000) ใช้ผง Zn และก๊าซ O_2 สังเคราะห์โดยวิธี Oxidation nanowires ที่สังเคราะห์ได้จากทั้ง 2 วิธี แสดงดังรูป 9



(a)

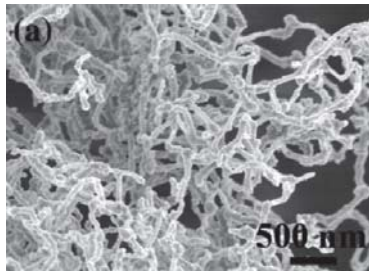


(b)

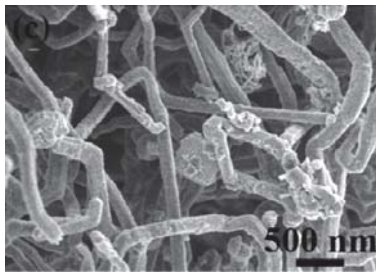
รูปที่ 9 รูป (a) จากงานวิจัยของ X.Q. Meng (X.Q. Meng, 2005) รูป (b) จากงานวิจัยของ P.X. Gao (P.X. Gao, 2005)

2. อัตราการไหลของก๊าซที่ไหลผ่านในขณะที่สังเคราะห์

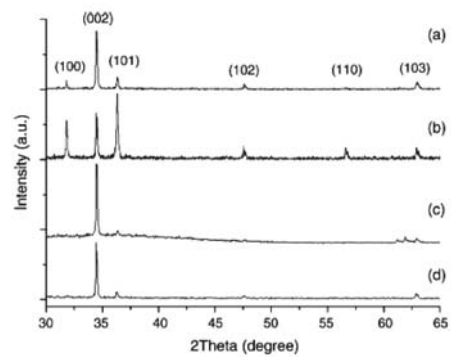
การสังเคราะห์สัณกะสือออกไซด์หรือโลหะออกไซด์ชนิดอื่น จะใช้ก๊าซเฉื่อยหรือก๊าซชนิดอื่นเข้าไปในเตาเผาเพื่อไล่อากาศหรือเพื่อช่วยให้เกิดการสร้างผลึก อาทิ ก๊าซอาร์กอน ไนโตรเจน ออกซิเจน เป็นต้น Y.J. Chen และคณะ (Y.J. Chen, 2007) ได้สังเคราะห์เส้นลวดนาโนของสังกะสีโดยให้ก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลแตกต่างกัน พบว่า อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนมีผลต่อขนาดของเส้นลวด นาโนที่สังเคราะห์ได้ เมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซสูงขนาดของเส้นลวดนาโนจะเล็กกว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของก๊าซต่ำ แสดงดังรูป 10



(a)



(b)



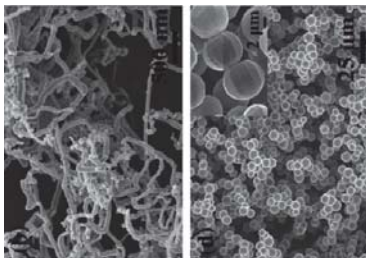
(c)

รูปที่ 11 แสดงผลของ Substrate ที่มีลักษณะ Zn nanoparticles รูป (a) ใช้ Al_2O_3 รูป (b) เป็น stainless-steel foil (Y.J. Chen, 2007) รูป (c) เป็น XRD pattern ที่ได้จากการใช้ substrate ต่างกัน (a) Si (100) ($450\text{ }^{\circ}C$) (b) glass ($450\text{ }^{\circ}C$) (c) Si (100) ($480\text{ }^{\circ}C$) และ (d) glass ($480\text{ }^{\circ}C$) (D.H. Liu, 2005)

รูปที่ 10 แสดงผลของอัตราการ flow N_2 ที่มีต่อขนาด Zn nanowires (a) ใช้อัตราการ flow 1000 ml/min (b) 200 ml/min (Y.J. Chen, 2007)

3. Substrate ที่ใช้รองรับ

Substrate ที่ใช้รองรับสารตัวอย่างในระหว่างการสังเคราะห์ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ ดังเช่นที่ Y.J. Chen และคณะ (Y.J. Chen, 2007) ได้รายงานไว้ว่า ในระหว่างการสังเคราะห์เส้นลวดนาโนของสังกะสีโดยใช้ อลูมินา ควอตซ์ และ stainless-steel foil พบว่า ไม่สามารถสังเคราะห์เส้นลวดนาโนของสังกะสีได้บน stainless-steel foil ผลของ substrate แสดงดังรูป 11



(a)

(b)

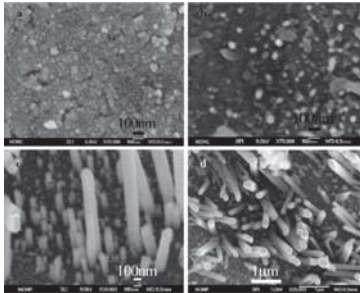
4. อุณหภูมิ

บางวิธีจะใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์สูง (ประมาณ $1,000\text{ }^{\circ}C$) ในบางวิธีใช้อุณหภูมิต่ำมาก หรือ ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิเลยก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น กระบวนการที่ใช้ เป็นต้น เช่น ในงานวิจัยของ X. Xing และคณะ (X. Xing, 2006) ได้สังเคราะห์ ZnO nanowires โดยวิธี modified chemical vapor deposition (MOCVD) ใช้ ผงของ ZnO และ C เป็นสารตั้งต้น ใช้อุณหภูมิการเผา $900\text{ }^{\circ}C$ ในขณะที่ X. Hou (X. Hou, 2006) และคณะสังเคราะห์ ZnO nanorod ที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}C$ โดยอาศัยวิธี solid state reaction

5. ระยะเวลา

การเกิดผลึกที่สมบูรณ์ต้องใช้เวลาที่เหมาะสม ค่าหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธี อุณหภูมิ สารตั้งต้น หรือปัจจัยอื่น ดังเช่นงานวิจัยของ D. Wang และคณะ (D. Wang, 2007) สังเคราะห์ ZnO nanoprisms ด้วยวิธี Wet chemical และศึกษาผลของเวลาที่

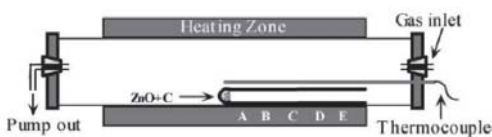
ทำปฏิกิริยาต่อสารที่สังเคราะห์ได้ พบว่า เวลาที่ใช้มีผลโดยตรงต่อลักษณะกายภาพของ ZnO nanoprisms กล่าวคือ ความยาวของผลึกแปรตามระยะเวลาที่ใช้แสดงดังรูป 12



รูปที่ 12 แสดงผลของ เวลาในการสังเคราะห์ Zn nanoprisms (a) 2h (b) 3h (c) 4 h และ (d) 5h ตามลำดับ (D. Wang, 2007)

6. ความดันของบรรยากาศ

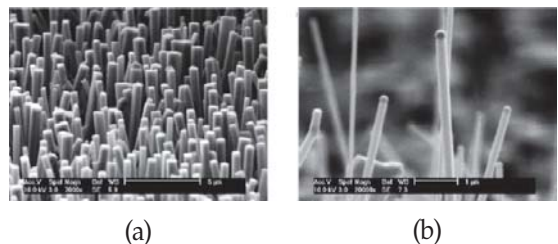
ในบางวิธีที่ใช้สังเคราะห์วัสดุในระดับจุลภาคพบว่า ความดันบรรยากาศทั้งบรรยากาศปกติและก๊าซชนิดต่างๆ มีผลต่อสมบัติของสารที่สังเคราะห์ได้ทั้งขนาด รูปร่าง และคุณสมบัติอื่น ๆ ดังเช่น ในงานวิจัยของ P.T. Hsien และคณะ (P.T. Hsien, 2006) สังเคราะห์ ZnO film ด้วยวิธี RF magnetron sputtering ที่ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน 2×10^{-6} Torr ในขณะที่ A. Umar และคณะ (A. Umar, 2005) สังเคราะห์ ZnO particles ด้วยวิธี CVD ใช้ความดัน 3 Torr ตัวอย่างการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสังกะสีออกไซด์ที่ควบคุมความดันบรรยากาศแสดง ดังรูป 13



รูปที่ 13 เครื่องมือสังเคราะห์อนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธี Thermal evaporation ที่มีการควบคุมความดันในเตาเผา (C. Li, 2006)

7. สารเคมีที่ใช้เร่งปฏิกิริยา

มีรายงานการวิจัยหลายชิ้น ที่รายงานว่าใช้สารเคมีอื่นช่วยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อสังเคราะห์ให้ได้วัสดุในระดับจุลภาค เช่น K. Yamamoto และคณะ (K. Yamamoto, 2004) ใช้ Cu เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการปลูกผลึก ZnO nanowires ด้วยวิธี Evaporation ในงานวิจัยของ Y. Zhang และคณะ (Y. Zhang, 2005) และ Y.S. Lim และคณะ (Y.S. Lim, 2006) ใช้ Au เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นต้น แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้สังเคราะห์เป็นหลักเนื่องจากงานวิจัยบางส่วนก็ไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยแต่อย่างใด ดังเช่นงานวิจัยของ A. Umar และคณะ (A. Umar, 2005) สังเคราะห์ ZnO nanoparticles ด้วยวิธี CVD และ A. Sekar และคณะ (A. Sekar, 2005) สังเคราะห์ ZnO nanowires จากวิธี Oxidation ผลของการใช้ Au เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังรูป 14



รูปที่ 14 เปรียบเทียบ Zn nanowires (a) ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และ (b) ใช้ Au เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบอนุภาค Au ที่ปลายบนสุดของ ZnO nanowires (X. Xing, 2006)

ในขณะนี้นักวิจัยทั่วโลกไม่ว่าจะเป็น สหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป จีน เกาหลีใต้ ไต้หวัน ญี่ปุ่น และประเทศไทยกำลังศึกษา วิจัย และพยายามนำเอาอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์นี้มาใช้งานให้หลากหลายมากขึ้น คาดว่าอีกไม่นานเราจะพบเห็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ประโยชน์จากสังกะสีออกไซด์นี้อยู่ใกล้ๆ กับตัวเรา

เอกสารอ้างอิง

1. ศศิธร ยะธา. (2549). การเตรียมเซนเซอร์เอทานอลที่เตรียมจากเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผสมด้วยแพลทินัมและอนุภาคนาโนของทองคำ. การค้นคว้าอิสระตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
2. Chen, Y.J., Chi, B., Zhang, H.Z., Chen, H. & Chen, Y. (2007). Controlled growth of zinc nanowires. **Mat. Letters.** (61), 144-147.
3. Chen, Y.Q., Jiang, J., He, Z.Y., Su, Y., Cai, D. & Chen, L. (2005). Growth mechanism and characterization of ZnO microbelts and Self-assembled microcombs. **Mat. Letters.** (59), 3280-3283.
4. Chooan, S., Hongsih, N., Tanunchai, S., Chairuangsi, T., Krua-in, C., Singkarat, S., Vilaithong, T., Mangkorntong, P. & Mangkorntong, P. (2005). Single-Crystalline ZnO Nanobelts by RF Sputtering. **J. Crystal Growth.** (282), 365-369.
5. Gao, P.X., Lao, C.S., Hughes, W.L. & Wang, Z.L. (2005). Three-dimensional interconnected nanowire networks of ZnO. **Chem. Phys. Letters.** (408), 174-178.
6. Gopel, W., Hese, J. & Zemel J.N. (1999). **Sensor a Comprehensive Survey.** Vol. 2, Weinheim : VCH Publication.
7. Hou, X., Zou, F. & Liu, W. (2006). A facile low-cost synthesis of ZnO nanorods via a solid-state reaction at low temperature. **Mat. Letters.** (60), 3786-3788.
8. Hsieh, P.T., Chen, Y.C., Wang, C.M., Tsai, Y.Z. & Hu, C.C. (2006). Structural and photoluminescence characteristics of ZnO films by room temperature sputtering and rapid thermal annealing process. **Appl. Physics A.** (84), 345-349.
9. Jian, J.K., Wang, C., Zhang, Z.H., Chen, X.L., Xu, L.H. & Wang, T.M. (2006). Necktie-like ZnO nanobelts grown by a self-catalytic VLS process. **Mat. Letters.** (60), 3809-3812.
10. Li, C., Fang, G., Fu, Q., Su, F., Li, G., Wu, X. & Zhao, X. (2006). Effect of substrate temperature on growth and photoluminescence properties of vertically aligned ZnO nanostructures. **J. Crystal Growth.** (292), 19-25.
11. Lim, Y.S., Park, J.W., Hong, S.T. & Kim, J. (2006). Carbothermal synthesis of ZnO nanocomb structure. **Mat. Sci. Engineering B.** (129), 100-103.
12. Liu, D. H., L. Liao, Li J. C., Guo, H. X. & Fu, Q. (2005). Preparation and Photoluminescence of ZnO Nanostructures by Thermal Evaporation Growth without Catalysts. **Mater. Sci. Eng. B.** (121), 77-80.
13. Liu, J., Huang, X., Duan, J., Ai, H. & Tu, P. (2005). A low-temperature synthesis of multiwhisker-based zinc oxide micron crystals. **Mat. Letters.** (59), 3710-3714.
14. Lyu, S.C., Zhang, Y., Ruh, H., Lee, H.J., Shim, H.W., Suh, E.K. & Lee, C.J. (2002). Low temperature growth and photoluminescence of wellaligned zinc oxide nanowires. **Chem. Phys. Letters.** (363), 134-138.
15. Niu, H., Yang, Q., Yu, F., Tang & K., Xie, Y.

- (2007). Formation of mushroom-like ZnO microcrystals through a solution calcination process. **Mat. Letters.** (61), 137-140.
16. Meng, X.Q., Zhao, D.X., Zhang, J.Y., Shen, D.Z., Lu, Y.M., Lui, Y.C. & Fan, X.W. (2005). Growth temperature controlled shape variety of ZnO nanowires. **Chem. Phys. Letters.** (407), 91-94.
17. Pauzauskie, P.J. & Yang, P. (2006). Nanowire photonics. **Materials Today.** (9), 36-45.
18. Sekar, A., Kim, S.H., Umar, A. & Hahn, Y.B. (2005). Catalyst-Free Synthesis of ZnO Nanowires on Si by Oxidation of Zn powders. **J. Crystal Growth.** (277), 471-478.
19. Singjai, P., Jintakosol, T., Singkarat, S. & Chooan, S. (2007). Luminescence properties and larg-scale production of ZnO nanowires by current heating deposition. **Mat. Sci. Engineering B.** (137),59-62.
20. Umar, A., Kim, S.H., Lee, Y.S., Nahm, K.S. & Hahn, Y.B. (2005). Catalyst-free large-quantity synthesis of ZnO nanorods by a vapour-solid growth mechanism: Structure and optical properties. **J. Crystal Growth.** (282), 131-136.
21. Wang, D., Song, C., Hu, Z., Chen, W. & Fu, X. (2007). Growth of ZnO prism on self-source substrate. **Mat. Letters.** (61), 205-208.
22. Wang, H. & Xie, C. (2006). Controlled fabrication of nanostructured ZnO particles and porous thin films via a modified chemical bath deposition method. **J. Crystal Growth.** (291), 187-195.
23. Wang, Z.L. (2004). Nanostructures of zinc oxide. **Materials Today.** (7), 26-33.
24. Xing, X., Zheng, K., Xu, H., Fang, F., Shen, H., Zhang, J., Zhu, J., Ye, C., Cao, G., Sun, D. & Chen, G. (2006). Synthesis and electrical properties of ZnO nanowires. **Micron.** (37), 370-373.
25. Yamamoto, K., Nagasawa, K. & Ohmori, T. (2004). Preparation and characterization of ZnO nanowire. **Physica E.** (24), 129-132.
26. Yue, G.H., Yan, P.X., Yan, D., Fan, X.Y., Wang, M.X., Qu, D.M. & Liu, J.Z. (2006). Hydrothermal synthesis of single-crystal ZnS nanowires. **Appl. Physics A.** (84), 409-412.
27. Zhang, Y., Yu, K., Jiang, D., Zhu, Z., Geng, H. & Luo, L. (2005). Zinc oxide nanorod and nanowire for humidity sensor. **Appl. Surf. Science.** (242), 212-217.
28. One Point Storage Systems. (2006). **Informationsseite zur Verbatim Blu-ray Disk.** Retried May 8, 2007 from the World Wide Web : <http://www.onepoint.de/Verbatim%20Blu%20ray/Verbatim%20Blu%20ray.htm>
29. Wikipedia, the free encyclopedia. (2007). **Sputter deposition.** Retrieved May 11, 2007 from the World Wide Web : http://en.wikipedia.org/wiki/Sputter_deposition
30. Wikipedia, the free encyclopedia. (2007). **Zinc oxide.** Retrieved May 8, 2007 from the World Wide Web : [http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide#A pplications](http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide#A_pplications)