

การปลูกแท่งนาโนซึ่งคือออกไซด์อย่างเป็นลวดลายในบริเวณจำเพาะเพื่อการ
ประยุกต์ใช้งานทางโฟโตนิกส์

SELECTIVE PATTERNING GROWTH OF ZnO NANORODS FOR
PHOTONIC APPLICATIONS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SELECTIVE PATTERNING GROWTH OF ZnO NANORODS FOR
PHOTONIC APPLICATIONS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์อย่างเป็นสวดลายในบริเวณจำเพาะเพื่อการประยุกต์ใช้งานทางโฟโตนิกส์

Special Project Title Selective patterning growth of ZnO nanorods for photonic applications

นักศึกษา อัมบาสิ มาหะมุ

รหัสประจำตัว 58110071

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา	
ผศ.ดร. นวพันธ์ ชัยนกิจ	
ดร. กนกทิพย์ บุญยรัตกลิน	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่..... เดือน.....พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นทาง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์อย่างเป็นลวดลายในบริเวณ จำเพาะเพื่อการประยุกต์ใช้งานทางโฟโตนิกส์
นักศึกษา	นายธัมบาลี มาหะมุ
รหัสประจำตัว	58110071
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิษณุ เพชรภา

บทคัดย่อ

อุปกรณ์นาโนอิเล็กทรอนิกส์ และโฟโตนิกส์ ถูกสร้างด้วยกระบวนการปลูกฟิล์มที่มีความละเอียดสูง และถูกออกแบบด้วยกระบวนการพิมพ์ที่มีความแม่นยำสูง อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวมีข้อเสียในเชิงเศรษฐศาสตร์ รวมไปถึงการใช้เวลาไปกับกระบวนการปลีกล่อย เพื่อลดข้อเสียข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีที่ง่ายและต้นทุนน้อยเป็นหลักได้แก่ วิธีการปลูกฟิล์มโดยวิธีการปั่นเคลือบ สร้างลวดลายโดยการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และปลูกแท่งนาโนโดยใช้วิธีการปลูกแบบไฮโดรเทอร์มอล โดยทำการปรับเปลี่ยนเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการสร้างลวดลายที่ 7 และ 8 วินาที หลังจากนั้น แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ถูกปลูกด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่เวลา 0.5 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตัวอย่างที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 7 วินาที ได้ขนาด $34.02 \pm 3 \mu\text{m}$ ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต 8 วินาที ได้ขนาด $42.01 \pm 3 \mu\text{m}$ เนื่องจากที่ 7 วินาทีให้ขนาดลวดลายที่เล็กกว่าแต่ความคมชัดไม่ต่างกันมากนัก จึงใช้เงื่อนไขนี้ในการปลูกแท่งนาโนที่เวลาต่างๆ กัน ซึ่งจากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ขนาดของแท่งนาโนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการปลูก และปลายแท่งนาโนมีรูปร่างเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของการวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและย่านการมองเห็นพบว่า แถบพลังงานต้องห้ามเชิงแสงมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการปลูกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ระบายส่วนใหญ่ของผลึกในลวดนาโนเรียงไปยังระนาบ <0002> อย่างเด่นชัดและมีแนวโน้มความเป็นผลึกสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ในส่วนของสเปกตรัมการเปล่งแสงได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของความบกพร่องแบบต่างๆ ภายในผลึก

คำสำคัญ : แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์, กระบวนการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต, วิธีการไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special project title	Selective Patterning Growth of Zinc Oxide Nanorods for Photonic Applications
Student	Mr. Hambalee Mahamu
Student ID	58110071
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterials Engineering
Year	2019
Special project advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa

ABSTRACT

Most of nanodevices are fabricated by using high efficiency deposition methods and patterned using high resolution lithography. However, the methods have drawbacks including small-scale product, expensive and multi-step processes. To reduce these disadvantages and to study significantly influenced parameters, sol-gel synthesis and spin coating method were used to synthesize ZnO seed layer and deposit on glass substrates. The substrates were patterned by conventional UV photolithography varying exposure time which of 7 and 8 seconds, then ZnO nanorods were hydrothermally grown at 90°C for 0.5, 1, 2, 3 and 4 hours respectively. Scanning electron microscope (SEM) revealed selective grown sites of ZnO nanorods have an average diameter of $34.02 \pm 3 \mu\text{m}$ and $42.01 \pm 3 \mu\text{m}$ for 7 and 8 seconds of exposure time respectively. Since 7 seconds of exposure time provide minimum size with sufficient pattern resolution, this condition was chosen for nanorods growth at different time. The influence of hydrothermal time on morphology was observed. The average diameter of grown nanorods significantly increased with increasing hydrothermal time. Moreover, the nanorods' tip was significantly changed by increasing hydrothermal time. UV-visible spectroscopic analysis showed the decreasing trend with increasing time. X-ray diffractogram showed the domination of <0002> plane and provided the escalating trend of crystallinity with increasing time. Photoluminescence spectra showed type of crystal defects contained in the nanorods.

Keywords : Zinc Oxide Nanorods, UV Photolithography, Hydrothermal method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.วิษณุ เพชรภา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทางการดำเนินงาน สนับสนุนด้านงบประมาณ ตลอดจนมอบโอกาสในการ จัดทำโครงการพิเศษนี้ในต่างประเทศ ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการ Nanocomposite Materials Research Laboratory (NMRL) ทุกท่านที่สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาในการ จัดทำโครงการพิเศษนี้ ประกอบด้วย ผศ. ดร.วณิชยา เมฆประสาธ และ ดร.กนกทิพย์ บุญรัตกลิน ขอขอบคุณ ดร.สากล ระหงษ์ ผู้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัย และ นายสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในขณะทำการทดลอง ตลอดจนครอบครัวของ ผู้วิจัยเองที่สงเสีย อุปการะ และให้การสนับสนุนทุกๆ ด้านจนโครงการพิเศษนี้สามารถดำเนินไปได้ ด้วยดี และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยต้องขอบคุณต่อพระอัลลอฮ์ พระผู้เป็นเจ้าที่มอบชีวิตและกำหนดเส้นทาง ชีวิตให้ผู้วิจัยจนได้ประสบผลสำเร็จในวันนี้

ผู้วิจัยหวังว่าโครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ให้กับผู้อื่นทั้งมนุษยชาติและสิ่งมีชีวิตร่วมโลก ไม่ว่าจะเป็นการต่อยอด การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ฮัมบาลี มาหะมุ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดหวัง.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 นานาเทคโนโลยี.....	6
2.1.1 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี.....	6
2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน.....	6
2.2 วิธีการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์.....	7
2.3 การปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการปั่นเคลือบ.....	9
2.4 การพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	10
2.4.1 ประเภทของการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้.....	10
2.4.2 สารไวแสงและประเภทของสารไวแสง.....	11
2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	12
2.5.1 หลักการและทฤษฎี.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
2.6.1 หลักการและทฤษฎี.....	14
2.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	15
2.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ต และแสงย่านการมองเห็น.....	16
2.7.1 กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตและการนำไปใช้ในเชิงการทดลอง.....	16
2.7.2 การวิเคราะห์แถบพลังงานเชิงทัศนศาสตร์ โดยวิธีการเขียนกราฟของเทาค์.....	16
2.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	17
2.8.1 โครงสร้างผลึกและแถบพลังงาน.....	17
2.8.2 การวิเคราะห์ประเภทของความไม่สมบูรณ์ของผลึก.....	18
2.9 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ.....	22
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการปลูกชั้นฟิล์มบาง.....	22
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างโครงผลึกโฟโตนิกส์.....	22
3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการปลูกลวดนาโน.....	22
3.1.5 สารเคมีที่ใช้ในการลบสารไวแสงหลังจากปลูกลวดนาโน.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

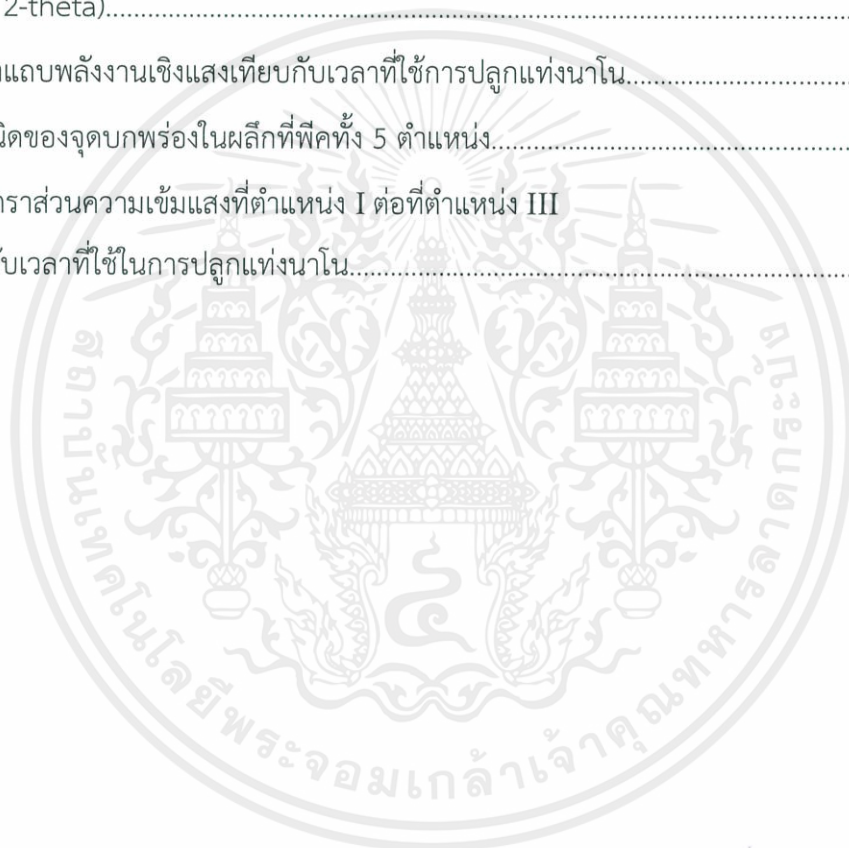
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.2.1 อุปกรณ์พื้นฐาน.....	23
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกชั้นฟิล์มบาง.....	23
3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างลวดลายโครงผลึกโฟโตนิกส์.....	23
3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกลวดนาโน.....	23
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	24
3.3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองรับ.....	24
3.3.2 ขั้นตอนการปลูกชั้นฟิล์มบาง.....	24
3.3.3 ขั้นตอนการสร้างลวดลาย.....	25
3.3.4 ขั้นตอนการปลูกลวดนาโน.....	25
3.3.5 ขั้นตอนการล้างสารไวแสง.....	26
3.4 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูล.....	27
3.4.1 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	27
3.4.2 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องตรวจวัด การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	27
3.4.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมของแสง อัลตราไวโอเล็ตและแสงในย่านการมองเห็น.....	28
3.4.4 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วย เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์และการอภิปรายผล.....	29
4.1 การศึกษาขนาดของสวดตาย และสัณฐานวิทยา.....	29
4.1.1 ผลของระยะเวลาการฉายแสงในกระบวนการพิมพ์เชิงแสง.....	29
4.1.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโน.....	30
4.2 การศึกษาผลึกวิทยา.....	32
4.2.1 ผลของระยะเวลาการฉายแสงในกระบวนการพิมพ์เชิงแสง.....	32
4.2.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโน.....	33
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงแสง.....	35
4.4 การศึกษาชนิดของความไม่สมบูรณ์ของผลึก.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	41
บรรณานุกรม.....	42
ประวัติผู้เขียน.....	46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ขนาดของลวดลายเฉลี่ยที่เวลาฉายแสงต่างกัน.....	30
4.2 ความสัมพันธ์ของขนาดแท่งนาโนเฉลี่ยกับเวลาที่ใช้ในการปลูก.....	32
4.3 อัตราส่วนของพีค (002) ต่อพีคอื่นๆ เทียบกับระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล (โหมต θ -2- θ).....	34
4.4 อัตราส่วนของพีค (002) ต่อพีคอื่นๆ เทียบกับระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล (โหมต 2- θ).....	35
4.5 ค่าแถบพลังงานเชิงแสงเทียบกับเวลาที่ใช้การปลูกแท่งนาโน.....	37
4.6 ชนิดของจุดบกพร่องในผลึกที่พีคทั้ง 5 ตำแหน่ง.....	39
4.7 อัตราส่วนความเข้มแสงที่ตำแหน่ง I ต่อที่ตำแหน่ง III เทียบกับเวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโน.....	40



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ประเภทของผลึกโฟโตนิกส์แบ่งตามความเป็นคาบของดัชนีหักเหในมิติต่างๆ.....	3
1.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผลึกโฟโตนิกส์ที่ สร้างโดยวิธีการพิมพ์ด้วยทรงกลมนาโน.....	3
2.1 ระบบการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบทาบติดกับแบบฉายภาพ.....	11
2.2 ภาพที่เกิดจากสารไวแสงแต่ละประเภท.....	12
2.3 โครงผลึกและกระบวนการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	12
2.4 โหมดการวัดสัญญาณรูปแบบต่างๆ.....	14
2.5 อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	15
2.6 ตัวอย่างการเขียนกราฟของเทาค์.....	17
2.7 แสดงแบบจำลองของโครนิค-เพนนี่.....	18
2.8 กราฟข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	19
2.9 กราฟข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์.....	19
2.10 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน.....	20
2.11 กราฟข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	20
2.12 กราฟข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์.....	21
3.1 ขั้นตอนต่างๆ ในดำเนินการทดลอง.....	26
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทั้งสองรุ่น.....	27
3.3 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	27
3.4 เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงในย่านการมองเห็น.....	28
3.5 ระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์.....	28
4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของลวดลายที่ได้จาก การฉายที่เวลา 7 และ 8 วินาทีตามลำดับ.....	29
4.2 แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกที่เวลา 0.5 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง.....	31

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 สัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกที่เวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง.....	32
4.4 ลวดลายการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการฉายแสงที่เวลา 7 วินาที และ 8 วินาที.....	33
4.5 กราฟการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ในโหมด theta-2-theta ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ปลูกที่ 2 3 และ 4 ชั่วโมง.....	33
4.6 กราฟการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ในโหมด 2-theta ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ปลูกที่ 0.5 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง.....	35
4.7 ร้อยละการทะลุผ่านของแสงอัลตราไวโอเล็ตและย่านการมองเห็นของแท่งนาโนที่ปลูกด้วยเวลาต่างกัน.....	36
4.8 การประมาณค่าแถบพลังงานเชิงแสงและสมการเส้นตรงที่ใช้ในการประมาณค่า.....	37
4.9 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแท่งนาโนที่ปลูกด้วยระยะเวลาต่างกัน และสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแท่งนาโนที่ปลูก 2 3 และ 4 ชั่วโมง.....	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โฟโตนิกส์ (Photonics) เป็นคำที่มีรากคำเดิมมากจากคำว่า โฟตอน (Photon) ซึ่งถูกบัญญัติเป็นครั้งแรกโดยอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (ค.ศ.1879-1955) [1] เพื่อสื่อถึงความเป็นอนุภาคและความไม่ต่อเนื่องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเติมปัจจัย (suffix) -ics ท้ายคำเดิมเพื่อสื่อถึงความเป็นศาสตร์หรือการศึกษาที่ว่าด้วยโฟตอน เมื่อพิจารณาจากความหมายตามการบัญญัติโดยพจนานุกรมภาษาอังกฤษออกซ์ฟอร์ด (Oxford dictionary) ซึ่งระบุไว้ว่า “The branch of technology concerned with the properties and transmission of photons, for example in fibre optics.” [2] จะพบว่าโฟโตนิกส์คือ เทคโนโลยีแขนงหนึ่งที่มีเป้าหมายไปยังสมบัติต่างๆ และการทะลุผ่านของโฟตอน เช่น ใยแก้วนำแสง เช่นเดียวกันหากพิจารณาความหมายที่บัญญัติไว้โดยพจนานุกรมภาษาอังกฤษคอลลินส์ (Collins dictionary) ซึ่งความหมายสำหรับภาษาอังกฤษบริติชถูกระบุว่า “the study and design of devices and systems, such as optical fibres, that depend on the transmission, modulation, or amplification of streams of photons” [3] สามารถแปลเป็นภาษาไทยได้ว่า “การศึกษาและการออกแบบอุปกรณ์และระบบ เช่น ใยแก้วนำแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับ การทะลุผ่าน การปรับแต่งหรือการขยายของลำโฟตอน” จะเห็นได้ว่าการนิยามทั้งสองข้างต้น สามารถสรุปเป็นคำนิยามที่รวบรัดได้ดังที่ถูกระบุไว้โดยสถาบันเพื่อการศึกษาทางทัศนศาสตร์และโฟโตนิกส์แห่งชาติสหรัฐอเมริกา (The National Center for Optics and Photonics Education) ซึ่งได้ให้คำนิยามไว้ว่า “Photonics is the technology of generating and harnessing light and other forms of radiant energy whose quantum unit is the photon. Photonics involves cutting-edge uses of lasers, optics, fiber-optics, and electro-optical devices in numerous and diverse fields of technology – alternate energy, manufacturing, health care, telecommunication, environmental monitoring, homeland security, aerospace, solid state lighting, and many others.” [4] ซึ่งมีความหมายว่า “โฟโตนิกส์คือ เทคโนโลยีการสร้างและควบคุมแสงและรูปแบบอื่นๆ ของพลังงานที่ถูกแผ่ออกมาซึ่งมีหน่วยทางควอนตัมเป็นโฟตอน โฟโต-

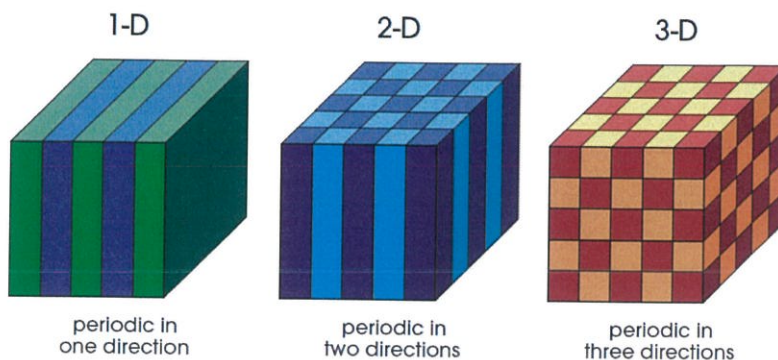
นิกส์มีความเกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานที่ล้ำยุคของเลเซอร์ อุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์ ไยแก้วนำแสง และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า-แสง ซึ่งถูกใช้งานในแขนงต่างๆ ของเทคโนโลยีอันหลากหลาย เช่น พลังงานทางเลือก อุตสาหกรรม สุขภาพ โทรคมนาคม การสังเกตการณ์เชิงสิ่งแวดล้อม การรักษาความปลอดภัยระดับชาติ การบินและอวกาศ การกำเนิดแสงในวัสดุของแข็งและอื่นๆ”

นิยามข้างต้นจึงแสดงให้เห็นได้ถึงความเกี่ยวข้องของเทคโนโลยีต่างๆ กับโฟโตนิกส์ ในทางอ้อมแล้ว คำนิยามนี้ยังได้แสดงถึงความสำคัญของโฟโตนิกส์อีกด้วย อันเนื่องมาจากความเกี่ยวข้องและการถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีด้านอื่นๆ ที่หลากหลาย จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอื่นๆ

หัวข้อปัญหาพิเศษที่ผู้เขียนได้รับมาคือ การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide nanorods) อย่างเป็นระเบียบและบริเวณจำเพาะเพื่อการประยุกต์ใช้งานเชิงโฟโตนิกส์ ซึ่งใช้เป็นการนำสารซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบแท่งนาโน (Nanorods) มาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อการประยุกต์ใช้งานเชิงโฟโตนิกส์ อันเนื่องมาจากซิงค์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย มีค่าดัชนีหักเหของแสงย่านการมองเห็น (Visible light) ในวัฏภาคขนาดใหญ่ (Bulk phase) เท่ากับ 2.00 โดยประมาณ [5] ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับดัชนีหักเหของอากาศซึ่งมีค่าประมาณ 1.00 [6] จึงเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้งานในเชิงโฟโตนิกส์ อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเมื่อมีวัฏภาคในระดับนาโน นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยอะตอมโลหะสังกะสีและออกซิเจนซึ่งถูกยึดด้วยพันธะไอออนิกที่มีเสถียรภาพค่อนข้างมาก และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ ซิงค์ออกไซด์จึงมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมทั่วไปได้ดีอีกด้วย [7] สำหรับการประยุกต์ใช้ในเชิงโฟโตนิกส์ ณ ที่นี้วางอยู่บนฐานของการสร้างและออกแบบผลึกโฟโตนิกส์ (Photonic crystal)

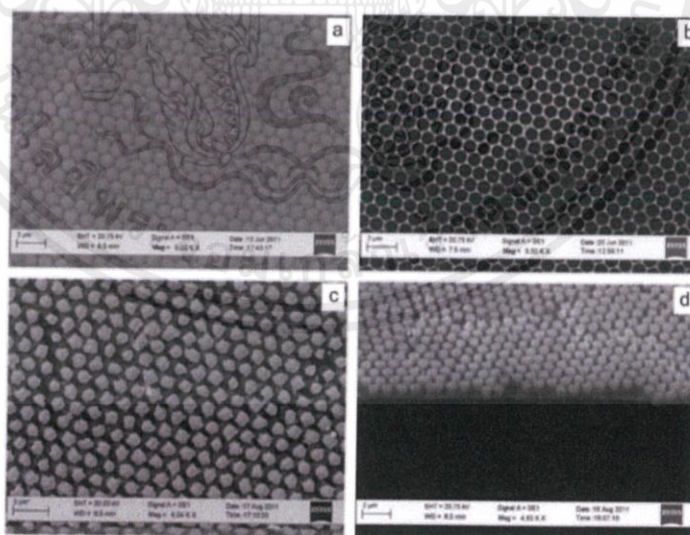
เอลี ยาโบลโนวิช (Eli Yablonovitch) หนึ่งในผู้บุกเบิกศาสตร์ด้านการสร้างและออกแบบผลึกโฟโตนิกส์ได้นิยามผลึกโฟโตนิกส์ไว้เมื่อปี ค.ศ.1987 ว่า “Photonic crystals are ordered nanostructures in which two media with different dielectric constant or refractive indices are arranged in a periodic form” [8] ซึ่งมีความหมายว่า “ผลึกโฟโตนิกส์ คือ โครงสร้างนาโนที่มีความเป็นระเบียบ อันประกอบด้วยตัวกลางสองชนิดที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกันถูกจัดระเบียบให้เรียงสลับกันเป็นคาบๆ” ซึ่งในการสร้างและออกแบบผลึกโฟโตนิกส์ต้องอาศัยทฤษฎีโฟโตนิกส์ในการคำนวณย่านของความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อตัวผลึกโฟโตนิกส์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆ ตัวแปร ซึ่งตัวแปรหลักๆ ที่มีผล เช่น ดัชนีหักเหของสารที่ใช้ ณ ความยาวคลื่นนั้นๆ ความเป็นระเบียบของโครงสร้างผลึก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.1 ประเภทของผลึกโฟโตนิกส์แบ่งตามความเป็นคาบของดัชนีหักเหในมิติต่างๆ [9]

วิธีการสร้างผลึกโฟโตนิกส์อาจแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนการสร้างโครงสร้างของผลึกและส่วนของการปลูกสารตามโครงสร้างผลึก ในส่วนของการสร้างโครงสร้างผลึกนั้น จะเริ่มที่การจำกัดพื้นที่ในการโตของสารที่ต้องการให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกโฟโตนิกส์ โดยวิธีจำกัดพื้นที่ในการโตของสารสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งมีวิธีที่มีความแม่นยำและความละเอียดสูง แต่ต้องแลกมาด้วยต้นทุนและระยะเวลา ตัวอย่างของวิธีการที่มีความแม่นยำและความละเอียดสูงเช่น วิธีการพิมพ์ด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam lithography) การพิมพ์ด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray lithography) เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันก็มีวิธีที่ง่าย แต่ก็ต้องแลกมาด้วยความแม่นยำและความละเอียดของโครงสร้างผลึก เช่น วิธีการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV photolithography) วิธีการพิมพ์ด้วยทรงกลมนาโน (Nanosphere lithography) เป็นต้น



ภาพที่ 1.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผลึกโฟโตนิกส์ที่สร้างโดยวิธีการพิมพ์ด้วยทรงกลมนาโน [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการปลูกสารตามโครงสร้างผลึกอาจทำได้ด้วยวิธีที่แม่นยำและความละเอียดสูงอย่าง เทคนิคการปลูกชั้นฟิล์มโดยวิธีการจัดเรียงชั้นอะตอม (Atomic layer deposition) เป็นต้น ซึ่งจะให้ความสมบูรณ์ของผลึกค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตาม การใช้วิธีที่มีความละเอียดสูงย่อมตามมาด้วยต้นทุนที่สูง ระยะเวลาที่ต้องใช้มากขึ้นอันเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตที่มีหลายขั้นตอน ดังนั้นการใช้วิธีการปลูกสารตามโครงสร้างผลึกที่มีขั้นตอนน้อยกว่าและใช้ต้นทุนน้อยกว่า เช่น วิธีการชุบเคลือบ (Dip coating) วิธีการปั่นเคลือบ (Spin coating) หรือวิธีปลูกสารโดยไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis) อาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปลูกชั้นฟิล์มเพื่อการสร้างผลึกโฟโตนิกส์ต่อไป แต่วิธีการข้างต้นยังต้องการการวิจัยตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปลูกชั้นฟิล์มให้เทียบเท่ากับวิธีการที่ใช้ต้นทุนสูง

นอกจากนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็ต้องการเทคนิคการปลูกชั้นฟิล์ม สร้างลวดลาย และปลูกโครงสร้างนาโนด้วย ในอีกนัยหนึ่ง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เองก็ต้องเทคนิคเช่นเดียวกับสร้างอุปกรณ์โฟโตนิกส์นั่นเอง เช่น ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นั้น การสร้างลวดลายและใช้โครงสร้างที่เป็นแท่งนาโนอาจเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากขึ้น อันเป็นผลมาจากการกักกันทางควอนตัมของโครงสร้างนาโนแบบ 1 มิติ (Quantum confinement)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ทดสอบการปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการที่ต้นทุนต่ำ
2. ศึกษาความสัมพันธ์ของระยะเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในการบวนการพิมพ์ด้วยแสง (Photolithography) กับความคมชัดและขนาดของลวดลายที่ได้
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกแบบไฮโดรเทอร์มอลต่อสมบัติต่างๆ ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ อันได้แก่ ความเป็นผลึกและคุณภาพของผลึก (Crystallinity and crystal quality) สัณฐานวิทยา (Morphology) สมบัติเชิงแสง (Optical properties) และประเภทของจุดบกพร่องผลึกที่เกิดขึ้น (Type of defects)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของการโตของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยวิธีการปลูกที่ใช้ต้นทุนต่ำ และศึกษาเชิงคุณภาพของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ ทั้งนี้เพื่อตอบสนองต่ออุตสาหกรรมที่ต้องการกระบวนการผลิตที่ต้นทุนต่ำ และมีคุณภาพ กระบวนการที่ใช้จึงต้องมีต้นทุนต่ำ มีกระบวนการไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- วิธีการสังเคราะห์สารซิงค์ออกไซด์ ในงานวิจัยใช้วิธีการโซล-เจล (Sol-gel)
- วิธีการปลูกฟิล์มบาง ในงานวิจัยใช้วิธีการปั่นเหวี่ยง
- วิธีการสร้างโครงสร้างผลึก ในงานวิจัยใช้วิธีการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต
- วิธีการปลูกลวดนาโน ในงานวิจัยใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มอล

1.4 ประโยชน์ที่คาดหวัง

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการลดต้นทุนของการสร้างอุปกรณ์โฟโตนิกส์ และรวมไปถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ จึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่า จะมีการต่อยอดการศึกษาเพิ่มเติมจากที่ได้รายงานในโครงการพิเศษนี้ และยังหวังเป็นอย่างยิ่งว่า จะสามารถตอบสนองต่อภาคอุตสาหกรรมโดยการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตนิกส์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ได้จริงในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 นาโนเทคโนโลยี

2.1.1 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย หากกล่าวถึงนาโนเทคโนโลยีเมื่อใด ผู้คนมักจะนึกถึงนวัตกรรมสมัยใหม่ เช่น นวัตกรรมการทำความสะอาดตัวเอง เป็นต้น ซึ่งความเข้าใจนี้ไม่ได้ผิดแปลกไปจากนิยามของคำว่านาโนเทคโนโลยีแต่อย่างใด หากเป็นความเข้าใจในมุมมองเชิงวัตถุ เนื่องจากมีความเป็นรูปธรรม และผู้คนมีประสบการณ์จากรูปร่างเหล่านี้มากกว่า ความเข้าใจเหล่านี้ยังมีความจำเพาะในนวัตกรรมรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งอยู่ หากจะนิยามคำว่า นาโนเทคโนโลยีจริงๆ ควรที่จะนิยามในลักษณะที่ครอบคลุมในหลายๆ นวัตกรรมที่มีความเกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยี

คำว่านาโนเทคโนโลยี เกิดจากการสนธิคำสองคำขึ้นมา ได้แก่คำว่า นาโน และ เทคโนโลยี โดยคำว่า นาโน มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกที่แปลว่า คนแคระ แต่ในปัจจุบันคำว่า นาโน เป็นคำอุปสรรคที่ใช้ในเชิงวิทยาศาสตร์ มีความหมายแสดงถึง เศษหนึ่งส่วนพันล้าน [11] ในขณะที่คำว่า เทคโนโลยี มีความหมายว่า วิทยาการที่นำเอาความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางปฏิบัติ อุตสาหกรรม เป็นต้น [12] หากพิจารณาความหมายที่นิยามโดยสถาบันเพื่อการริเริ่มนาโนเทคโนโลยี แห่งชาติสหรัฐอเมริกา (National nanotechnology initiative) ซึ่งได้ให้ความหมายสั้นๆ ว่า “Nanotechnology is science, engineering, and technology conducted at the nanoscale, which is about 1 to 100 nanometers.”[13] แปลเป็นภาษาไทยได้ว่า นาโนเทคโนโลยี คือ วิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และเทคโนโลยี ที่พัฒนาในระดับขนาดนาโน นั่นคือ ประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร อาจสรุปได้ว่า นาโนเทคโนโลยี ก็คือ ความสามารถที่จะสร้าง จัดเรียงวัสดุในระดับอะตอมและโมเลกุลได้ตามความต้องการ เพื่อสร้างสสารหรือโครงสร้างของสารในรูปแบบใหม่ๆ ให้ได้คุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างไปจากวัสดุชนิดเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ซึ่งพบได้ทั่วไป [14]

2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน

การสังเคราะห์วัสดุนาโนสามารถทำได้โดย 2 วิธี ได้แก่ แบบใหญ่ไปเล็ก และแบบเล็กไปใหญ่ ซึ่งสามารถเข้าใจได้ด้วยตรรกะปกติ เพราะถ้าหากต้องการวัสดุให้เล็กลง ก็ควรทำสิ่งที่ใหญ่ให้มีขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กลงจนถึงขนาดที่ต้องการ หรือหากมีวัสดุที่ขนาดเล็กกว่าระดับนาโน ก็สามารถใช้วิธีก่อกำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

1. กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนแบบใหญ่ไปเล็ก (Top-down)

กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนแบบใหญ่ไปเล็ก เป็นวิธีการสังเคราะห์วัสดุนาโนรูปแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยม โดยเป็นการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงจนถึงระดับนาโน โดยอาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี หรือกระบวนการร่วม เช่น การกัดลายวงจรรีโเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นวิธีการเชิงเคมี การบดวัสดุให้มีขนาดเล็กลงโดยอาศัยเครื่องบดพลังงานสูง (high energy milling) ซึ่งเป็นวิธีการเชิงฟิสิกส์ การบดวัสดุโดยอาศัยเครื่องบดพลังงานสูงพร้อมกับกรดแก่เพื่อประสิทธิภาพในการลดขนาด เป็นวิธีการร่วม อย่างนี้เป็นต้น ซึ่งกระบวนการแบบใหญ่ไปเล็กสามารถทำได้ให้ปริมาณมากและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีการแบบใหญ่ไปเล็กมีข้อเสียตรงที่ตัวแปรในการควบคุมขนาดมีจำนวนมาก เช่น ความเร็วในการบด ระยะเวลาการบด ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ร่วม เป็นต้น

2. กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนแบบเล็กไปใหญ่ (Bottom-up)

กระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโนจากเล็กไปใหญ่ เป็นกระบวนการสังเคราะห์รูปแบบหนึ่งที่ให้ผลที่มีความละเอียดสูง เนื่องจากเป็นการก่อกำตัวจากระดับเล็กไปใหญ่ อย่างไรก็ตามการควบคุมตัวแปรต่างๆ เป็นไปในภาพรวมเท่านั้น ในการสังเคราะห์จริงจะถูกกำหนดด้วยกฎทางอุณหพลศาสตร์และสถิติ สภาพแวดล้อม รวมไปถึงธรรมชาติของสารเอง การสังเคราะห์รูปแบบนี้ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่าแบบแรก แต่ก็ให้ผลที่น้อยกว่าเช่นกัน และยังต้องใช้เวลาในการสังเคราะห์มากกว่าอีกด้วย การสังเคราะห์รูปแบบนี้เป็นการสังเคราะห์เชิงเคมีและชีววิทยา เช่น วิธีการสังเคราะห์สารโดยวิธีโซลเจล (Sol-gel method) และการปลูกกลวดนาโนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) ซึ่งเป็นวิธีเชิงเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ การสังเคราะห์โดยการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) การจัดเรียงตัวเองของอนุภาคนาโน (Self-assembly) เป็นต้น

2.2 วิธีการสังเคราะห์แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

1. วิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล (sol-gel)

กระบวนการเตรียมโซลเจล เป็นกระบวนการเตรียมทางเคมีแบบเปียก (wet process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่เรียกว่า “เจล” การเตรียมโลหะออกไซด์เริ่มต้นปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับปฏิกิริยาการไฮโดรไล-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิส (hydrolysis reaction) ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำที่เรียกว่า “โซล” จากนั้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation reaction) ทำให้อนุภาคเชื่อมโยงต่อกันเป็นโครงร่างตาข่าย “เจล” เมื่อนำเจลไปแคลไซน์จะได้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว ดังสมการต่อไปนี้



โดยที่ M คือโลหะ และ R คือ หมู่แอลคิล (alkyl group: $C_n + H_{2n+1}$)

ซึ่งในขณะที่สารละลายอยู่ในสภาพ “เจล” ก็จะถูกนำไปปั่นเคลือบ จากนั้นจึงนำไปเผาเพื่อสลายสารอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา เพื่อให้ได้โลหะออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนฐานรองรับ

2. การปลูกผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal synthesis)

กระบวนการปลูกผลึกนาโนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นขึ้นอยู่กับค่าพลังงานเสรีกิบบ์ของระบบ พิจารณาระบบไฮโดรเทอร์มอลในหม้อเหล็กที่ปิดแน่นด้วยสกรูเพื่อจำกัดปริมาตรให้คงที่ ดังนั้นหม้อเหล็กจึงเป็นระบบปิดที่มีการถ่ายเทพลังงานเพียงอย่างเดียว จากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์ซึ่งระบุฟังก์ชันสถานะ หรือพลังงานภายในระบบ เท่ากับพลังงานที่จ่ายให้ระบบ และสามารถสูญเสียได้จากการเกิดงานเชิงกล เช่น การขยายตัวเชิงปริมาตร เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\delta U = \delta Q - \delta W \quad (2.1)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \delta W = PdV \quad (2.2)$$

ซึ่งหากระบบถูกฉีกให้ปริมาตรมีค่าคงที่ พลังงานที่จ่ายไปทั้งหมดในทางทฤษฎีจะถูกแปลงเป็นพลังงานภายในระบบทั้งสิ้น ซึ่งจากส่งผลต่อค่าคงที่ปฏิกิริยารวมในระบบ (เป็นฟังก์ชันกับความดันและอุณหภูมิ) เป็นบวกมากขึ้น

ดังนั้นจากสมการ

$$\Delta G_{RXN}^{\circ} = -RT \ln K_j(T, P) \quad [15] \quad (2.3)$$

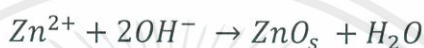
เมื่อ $K_j(T, P)$ เป็นค่าคงที่ปฏิกิริยารวมซึ่งมีแนวโน้มมากกว่า 1 มากๆ พลังงานเสรีกิบบ์จึงมีค่าเป็นลบมากขึ้นปฏิกิริยาจึงไปข้างหน้า หรือก็คือ ซิงค์ออกไซด์สามารถก่อตัวขึ้นได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลได้ เพราะเป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยคุมตัวแปรฟังก์ชันสถานะไว้นั่นเอง ซึ่งการก่อตัวของซิงค์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซต์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นการก่อตัวแบบมีทิศทางที่แน่นอน โดยขึ้นอยู่กับระนาบผลึกของชั้นฟิล์มบางซึ่งคอกไซด์ที่ปลูกมาก่อนหน้า หากมีระนาบที่ไม่ใช่ตามแนวแกนซี (c axis) ก็มีโอกาสสูงที่สวดนาโนจะโตแบบไร้ทิศทางมากกว่าฟิล์มที่มีระนาบไปทางแนวแกนซี อีกทั้งยังมีผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการโตของผลึกด้วย และสิ่งเป็นตัวกำหนดว่า ผลึกจะเป็นผลึกเดี่ยวหรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองข้างต้น

ในส่วนของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการควบแน่นเป็นของแข็ง (Solidification) นั้น แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์สามารถก่อตัวได้โดยผ่านปฏิกิริยาเคมี 2 ทาง ได้แก่

- สารตั้งต้นเกิดการควบแน่นเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยตรงตามปฏิกิริยา



- สารตั้งต้นเกิดการควบแน่นเป็นแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ผ่านการก่อตัวเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) ตามปฏิกิริยา



ซึ่งโดยทั่วไปการก่อตัวของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์มักเกิดผ่านสารมัธยันตร์อันเป็นผลทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกในแบบช่องว่างขาดออกซิเจน หรือแบบการแทรกตัวของออกซิเจน ในขณะที่ทิศทางของการโตของผลึกมักเป็นไปในทิศแนวแกนซีเพราะมีพลังงานพื้นผิวที่มากจึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับระนาบผลึกของชั้นฟิล์มบางบนฐานรองรับด้วยเช่นกัน

2.3 การปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการปั่นเคลือบ (Spin Coating Method)

การปลูกชั้นฟิล์มบางโดยวิธีการปั่นเคลือบจะอาศัยความเร็วเชิงมุมซึ่งส่งผลทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงสารละลายให้กระจายอยู่บนฐานรองรับ โดยความหนาของชั้นฟิล์มที่เกิดจากสารละลายมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆ ดังสมการ

$$h \approx \frac{1}{2\omega} \sqrt{\frac{3\eta}{\rho t}} \quad (2.4)$$

เมื่อ h คือ ความหนาของฟิล์ม

ω คือ ความถี่เชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

η คือ ความหนืดของสารละลาย

ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลาย

t คือ เวลาที่ใช้ในการปั่น

2.4 การพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Photolithography)

2.4.1 ประเภทของการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตและอุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้

การพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทด้วยกัน เช่น แบบทาบติด (Proximity system) แบบฉายภาพ (Projection system) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการแบบทาบติดเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องการอุปกรณ์เสริมอื่นๆ เพิ่มเติม โดยวิธีการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบทาบติดจะให้หน้ากากกันแสงแนบติดกับฐานรองรับที่ผ่านการเคลือบด้วยสารไวแสงแล้ว แล้วทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ทั้งนี้วิธีการแบบทาบติดมีข้อดีตรงที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว แต่มีปัญหาค่อนข้างมาก หากต้องการความแม่นยำของตำแหน่งภาพพิมพ์ ขนาดภาพพิมพ์ที่เล็กมาก และความละเอียดของภาพพิมพ์สูง นั้นเพราะขนาดของภาพพิมพ์ขึ้นอยู่กับขนาดของหน้ากากกันแสงหรือแม่พิมพ์ ซึ่งจะถูกกำหนดโดยผลของปรากฏการณ์เลี้ยวเบนระยะใกล้ (Near-field diffraction) โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$v \equiv \frac{W^2}{\lambda G} \quad (2.6)$$

เมื่อ v คือ เลขเฟรสเนล (Fresnel number)

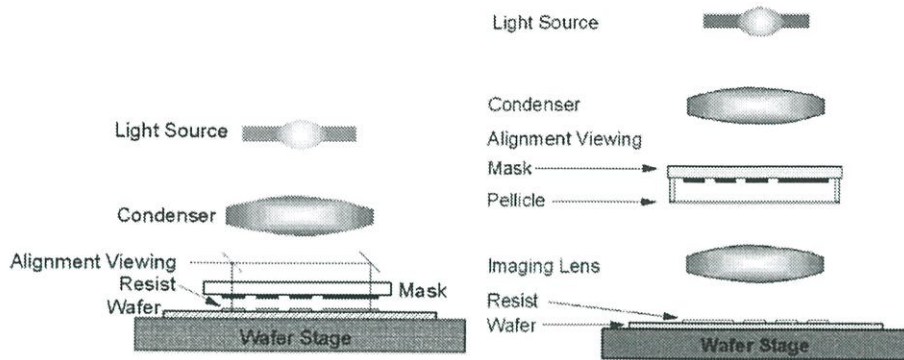
λ คือ ความยาวคลื่นที่ใช้

W คือ ความกว้างของช่องที่ยอมให้แสงส่องผ่าน (ขนาดภาพ)

G คือ ระยะระหว่างหน้ากากกันแสงกับฐานรองรับ

อีกทั้งในทางปฏิบัติ การทาบหน้ากากกันแสงไม่อาจทาบติดกันโดยไม่มีช่องว่างระหว่างฐานรองรับกับหน้ากากกันแสง ซึ่งกรณีนี้จะส่งผลทำให้ภาพพิมพ์ที่เกิดบนฐานรองรับมีขนาดไม่ตรงกับหน้ากากกันแสง (ขึ้นกับสมการที่ (2.6)) และยังมีผลของความหนาของตัวหน้ากากกันแสงเองด้วย เพราะจะส่งผลต่อระยะเกิดภาพ หากระยะเกิดภาพไกลเกินไปแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ส่องผ่านจะเกิดการบานออกทำให้ได้ภาพพิมพ์ที่ใหญ่เกินความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 ระบบการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบทาบติด (ซ้าย) กับแบบฉายภาพ (ขวา) [16]

จากภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์พื้นฐานที่ให้ในระบบการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง เลนส์รวมแสง (Condenser lens) และหน้ากากกันแสง ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเพียงพอที่จะสร้างระบบการพิมพ์แบบทาบติดได้ หากพิจารณาระบบการพิมพ์แบบฉายภาพ จะต้องการเลนส์สำหรับฉายภาพ (Imaging lens) ตัวยึดหน้ากากกันแสง (Holder) เพิ่มเข้ามาในระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การพิมพ์แบบทาบติดเป็นวิธีพื้นฐานที่สุด

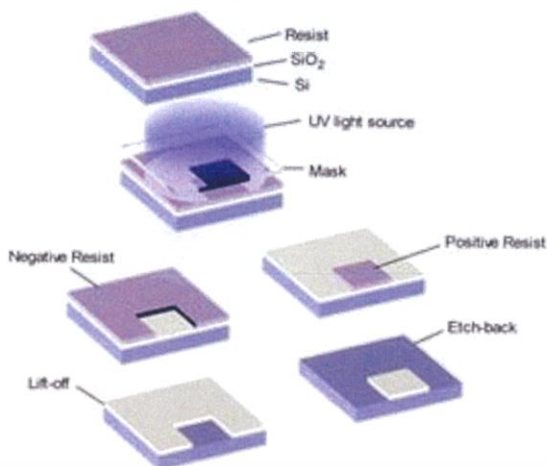
2.4.2 สารไวแสงและประเภทของสารไวแสง

ในการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตจะอาศัยสารละลายชนิดหนึ่งซึ่งมีความไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต หรือที่เรียกกันว่า สารไวแสง (Photoresist) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. สารไวแสงเชิงบวก (Positive photoresist) เป็นสารละลายที่เกิดการสลายพันธะทางเคมีเมื่อได้พลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากพอที่จะสลายพันธะ ดังนั้นสำหรับสารไวแสงเชิงบวกนี้ เมื่อถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตบริเวณที่ถูกฉายจะเกิดการสลายพันธะและสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาล้าง (Developer) จึงทำให้ภาพที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกันกับหน้ากากกันแสงหรือแม่พิมพ์ที่ใช้

2. สารไวแสงเชิงลบ (Negative photoresist) เป็นสารละลายที่เกิดการสร้างพันธะทางเคมีเมื่อได้พลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากพอที่จะสร้างพันธะ ดังนั้นสำหรับสารไวแสงเชิงลบนี้ เมื่อถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตบริเวณที่ถูกฉายจะเกิดการสร้างพันธะและไม่สามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาล้างได้ จึงทำให้ภาพที่ได้จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับหน้ากากกันแสงหรือแม่พิมพ์ที่ใช้ (ดูรูปที่ 2.2) ซึ่งสารไวแสงเชิงลบเป็นที่นิยมน้อยกว่าสารไวแสงเชิงบวกด้วยเหตุผลที่ให้ความละเอียดและความคมชัดของลวดลายที่ต่ำกว่า จึงทำให้อุตสาหกรรมทั่วไปมักใช้สารไวแสงเชิงบวก อย่างไรก็ตาม สารไวแสงเชิงลบมีราคาสูงกว่าเมื่อเทียบกับสารไวแสงเชิงบวกจึงทำให้สารไวแสงเชิงลบเป็นที่นิยมในงานที่ไม่ต้องการความคมชัดของลวดลายสูงมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ภาพที่เกิดจากสารไวแสงแต่ละประเภท [17]

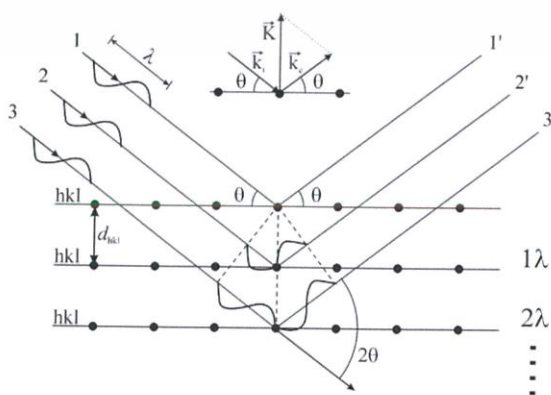
นอกจากประเภทที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีสารไวแสงประเภทที่สามารถเปลี่ยนประเภทกลับไปมา โดยอาศัยการฉายแสง เช่น เดิมเป็นสารไวแสงเชิงบวก เมื่อฉายด้วยพลังงานค่าหนึ่งจะสามารถเปลี่ยนประเภทเป็นสารไวแสงเชิงลบได้

2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.5.1 หลักการและทฤษฎี

เมื่อพูดถึงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ย่อมต้องพูดถึงวัสดุที่เป็นของแข็งและมีโครงสร้างที่เป็นผลึก นั่นเป็นเพราะเทคนิคนี้เป็นเทคนิคเฉพาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเฉพาะ โดยอาศัยการยิงลำรังสีเอกซ์ไปยังวัสดุตัวอย่าง แล้วทำการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบเซนเซอร์

พิจารณาวัสดุชนิดหนึ่งที่มีโครงผลึกดังรูป



ภาพที่ 2.3 โครงผลึกและกระบวนการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

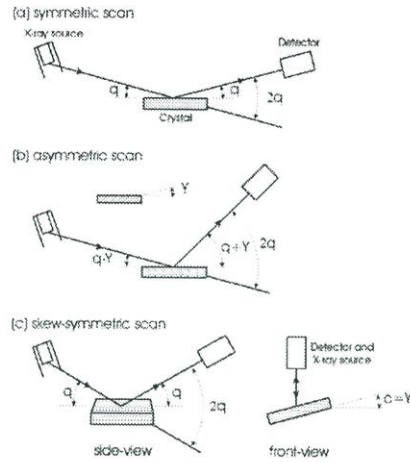
เมื่อรังสีเอกซ์เข้าไปทำอันตรกิริยากับผลึกอุดมคติที่มีความเป็นระเบียบเป็นคาบๆ อย่างสมบูรณ์ รังสีเอกซ์ในทิศการเคลื่อนที่ที่ 1 2 และ 3 จะเกิดการเลี้ยวเบนเนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์อยู่ในหน่วยอังสตรอมซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมและขนาดของระยะห่างระนาบในผลึกดังนั้นเมื่อรังสีเอกซ์ถูกยิงเข้าไปในวัสดุจึงมีโอกาสดังกล่าวเกิดขึ้นได้ เมื่อเกิดการเลี้ยวเบนที่ระยะห่างของระนาบไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้เกิดความต่างของทางเดินเชิงทัศนศาสตร์ (Optical path difference) ซึ่งจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น อาจจะเป็นจำนวนเต็มหรือไม่ก็ได้ หากเป็นจำนวนเต็มนั้นแสดงว่า แถบการแทรกสอดที่เซนเซอร์รับสัญญาณได้จะเป็นแบบเสริม ในทางกลับกันก็เป็นแบบหักล้าง ซึ่งในทางปฏิบัติการวัดแถบสว่างที่เกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมจะง่ายกว่าในการวัดแถบมืดมาก

จากภาพที่ 2.3 พิจารณาสามเหลี่ยมมุมฉากสองรูปที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกจะเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างผลึก d สามารถแตกเวกเตอร์ไปยังแนวความต่างของทางเดินเชิงทัศนศาสตร์ได้ ซึ่งเส้นความต่างของทางเดินเชิงทัศนศาสตร์มีค่าเป็นจำนวนเท่าๆ ของความยาวคลื่น หรือ $n\lambda$ และเป็นสองเท่าของ $d \sin \theta$ เพราะรังสีเอกซ์เคลื่อนด้วยความต่าง $d \sin \theta$ และเลี้ยวเบนเดินทางด้วยความต่าง $d \sin \theta$ อีกหนึ่งครั้ง จากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.7)$$

ซึ่งเป็นที่รู้จักในนามของกฎของแบร็ก (Bragg's Law) ในทางปฏิบัติสัญญาณที่วัดได้จะเป็นข้อมูลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุมเลี้ยวเบนซึ่งวัดจากแนวของลำรังสีเดิมซึ่งเท่ากับ 2 เท่าของมุม θ

การวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดการเลี้ยวเบนและแทรกสอดสามารถกระทำได้หลากหลายรูปแบบ หนึ่งในรูปแบบที่เป็นที่นิยมคือ การวัดในโหมดสมมาตร (Symmetric scan) หรือก็คือ การวัดในลักษณะที่ขั้วแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ไปพร้อมๆ กับการขยับเซนเซอร์รับสัญญาณ หรือการคงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์กับเซนเซอร์รับสัญญาณไว้โดยปรับมุมของวัสดุตัวอย่างก็ถือว่าเป็นการวัดรูปแบบสมมาตรเช่นกัน ซึ่งการวัดลักษณะนี้จะทำให้ได้ข้อมูลของระนาบที่เป็นเวกเตอร์ลัพธ์ของเวกเตอร์ที่เกิดจากการตรวจวัดดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 เวกเตอร์ \vec{K} เป็นเวกเตอร์ลัพธ์ที่เกิดจากเวกเตอร์ \vec{k}_i และเวกเตอร์ \vec{k}_c นั้นแสดงว่าทุกๆ ระนาบของผลึกที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ \vec{K} จะสามารถทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของรังสีเอกซ์จึงทำให้สามารถตรวจวัดสัญญาณของระนาบเหล่านั้นได้



ภาพที่ 2.4 โหมดการวัดสัญญาณรูปแบบต่างๆ [18]

ในขณะเดียวกันการตรวจวัดความเข้มในโหมดอื่นๆ ก็จะให้ข้อมูลของระนาบที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ลัมพ์ ข้อมูลของการวัดในแต่ละโหมดจึงแตกต่างกัน

2.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.6.1 หลักการและทฤษฎี

หลุยส์ เดอ บรอยล์ (Louis de Broglie) ได้ตั้งสมมติฐานเรื่องความเป็นทวิภาคของอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมองความสัมพันธ์ของอนุภาคเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและมีพลังงานรวมสูงมาก จนสามารถประพฤติตัวเสมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานของคลื่น เช่น ความยาวคลื่น ความถี่ เป็นต้น สามารถเขียนได้ว่า

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.8)$$

จากสมการ $p = \sqrt{2mE_{จลน์}}$

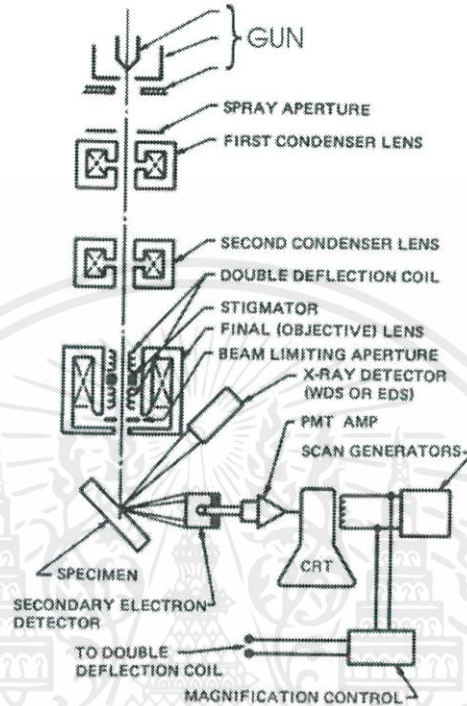
ดังนั้น

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_{จลน์}}} \quad (2.9)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.9) นี้ เป็นแนวคิดพื้นฐานด้านการถ่ายภาพด้วยอิเล็กตรอน เนื่องจากสภาพความเป็นอนุภาคควอนตัม ทำให้เราสามารถปรับความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนที่ต้องการใช้งานได้โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนพลังงานจลน์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพลังงานศักย์ที่จ่ายเข้าไปในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบจริงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เชิงทัศนศาสตร์หลายอย่าง แต่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้กับลำอิเล็กตรอน เช่น เลนส์รวมแสงเป็นเลนส์แม่เหล็กซึ่งสามารถปล่อยสนามแม่เหล็กควบคุมการปรับตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนเพื่อปรับโฟกัสของภาพที่ได้



ภาพที่ 2.5 อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [19]

2.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ ภาพสามมิติที่สามารถมองได้จากองศาหลายๆ องศา ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปวิเคราะห์ขนาด รูปร่างของวัสดุ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สำหรับฟิล์มบางแล้ว การวัดความหนาซึ่งจำเป็นต้องถ่ายภาพจากด้านข้างยังคงมีปัญหาที่การวัดความหนาอาจคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากองศาการถ่ายภาพ และลำอิเล็กตรอนที่สะท้อนเขาเซนเซอร์รับภาพ นอกจากนี้วิธีนี้ยังคงมีข้อเสียอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญ คือ ตัวอย่างที่นำไปวัดมักถูกทำลายทิ้งด้วยการเคลือบทอง เพราะวัสดุส่วนใหญ่ที่ไม่นำไฟฟ้าไม่สามารถที่จะถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้ จำเป็นต้องเคลือบโลหะก่อนนำไปถ่ายภาพซึ่งมักจะเป็นทองคำ ดังนั้นตัวอย่างที่ได้หลังจากการถ่ายภาพจึงต้องเสียไป

2.7 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงย่านการมองเห็น (UV-Visible spectroscopy)

2.7.1 กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตและการนำไปใช้ในเชิงการทดลอง

กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตสามารถนิยามอัตราส่วนของความเข้มที่สามารถวัดได้เทียบกับความเข้มแรกเริ่มก่อนเกิดอันตรกิริยากับวัสดุเป็นส่วนกลับของความส่องผ่าน หรือก็คือการดูดกลืน สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha z} = T \quad (2.9)$$

$$A = -\log T = \frac{\ln \frac{1}{T}}{2.303} = \frac{\alpha z}{2.303} \quad (2.10)$$

$$\alpha = 2.303A/z \quad (2.11)$$

ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจากการวัดความเข้มแสงได้ จากสมการที่ (2.11) หากทราบความหนาของชั้นฟิล์มบาง โดยการแปลงความเข้มแสงเป็นความส่องผ่าน แล้วนำไปแปลงเป็นการดูดกลืนเพื่อหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่อไปซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเทียบกับความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดอันตรกิริยา เพราะเลขคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดอันตรกิริยากับวัสดุมีค่าแปรตามความถี่เชิงมุมของการสั่นรูปแบบต่างๆ ซึ่งเลขคลื่นที่เปลี่ยนไปส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเปลี่ยนไปด้วย

2.7.2 การวิเคราะห์แถบพลังงานเชิงทัศนศาสตร์โดยวิธีการเขียนกราฟของเทาค์

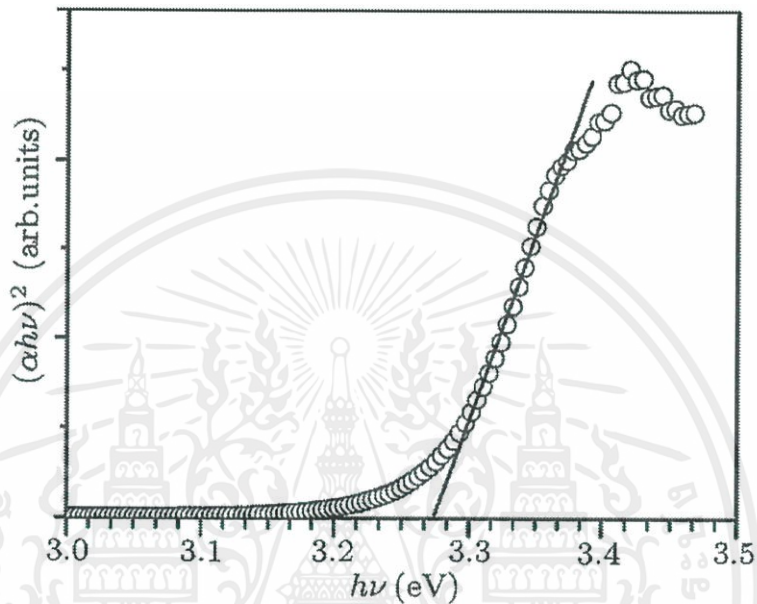
หนึ่งในทฤษฎีสารกึ่งตัวนำได้ให้โมเดลของแถบพลังงานซึ่งสามารถอธิบายสมบัติเชิงแสงและไฟฟ้าได้ค่อนข้างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามนั้นเป็นจริงกับสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเท่านั้น สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างไม่เป็นผลึกอย่างสารกึ่งตัวนำประเภทสารอินทรีย์จะไม่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับสารซิงค์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal จึงสามารถใช้ทฤษฎีแถบพลังงานมาอธิบายสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าได้

ข้อมูลจากเทคนิคการวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงย่านการมองเห็นสามารถคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามเชิงแสงได้ (Optical band gap) ดังนั้นหนึ่งในวิธีการพิสูจน์ความบริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยคือ การคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามเชิงแสงโดยคำนวณจากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\alpha h\nu)^{1/r} = \beta(h\nu - E_g) \quad (2.12)$$

ในทางปฏิบัติ จะนำข้อมูลที่นำมาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่แปรผันกับความถี่ แล้วนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพจน์ $(\alpha h\nu)^{1/r}$ กับ $h\nu$ ซึ่งจุดตัดแกน x ของกราฟส่วนที่เป็นเส้นตรงจะมีค่าเท่ากับ ความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามเชิงแสง ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า การเขียนกราฟของเทาค์ (Tauc's Plot)

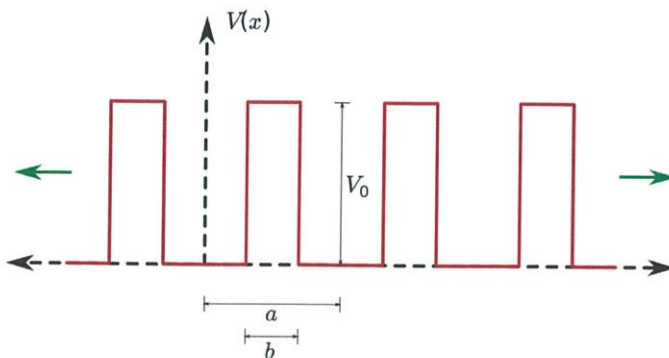


ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการเขียนกราฟของเทาค์ [20]

2.8 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.8.1 โครงสร้างผลึกและแถบพลังงาน

ในสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมมองค์ประกอบซ้ำเป็นคาบๆ ต่อเนื่องกันในบริเวณหนึ่งๆ ที่เรียกว่า เกรน (Grain) การจัดเรียงตัวที่ซ้ำเป็นคาบๆ ส่งผลให้เกิดระดับพลังงานในอะตอมรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงานตามทฤษฎีบทของบล็อช (Bloch's theorem) และแบบจำลองโครนิค-เพนนี่ (Kronig-Penny model) ทำให้สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้และแถบพลังงานต้องห้าม (Energy band gap) สำหรับอิเล็กตรอน



ภาพที่ 2.7 แสดงแบบจำลองของโครนิก-เพนนี่ [21]

เมื่ออิเล็กตรอนในวัสดุสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนที่มีพลังงานสูงกว่าแถบพลังงานต้องห้าม อิเล็กตรอนก็จะเข้าสู่ชั้นแถบนำ (Conduction band) และทิ้งโฮล (Hole) เอาไว้ในแถบวาเลนซ์ (Valence band) โดยทั้งคู่ยังเกิดการยึดกันด้วยพลังงานอ่อนๆ เป็นอนุภาคเสมือนที่เรียกว่า เอ็กซิตอน (Exciton) โดยอนุภาคเสมือนนี้จะมีระยะเวลาการดำรงอยู่ในระยะเวลาสั้นๆ ก่อนที่จะรวมตัวกันและปลดปล่อยพลังงานแสงที่ต่ำกว่าออกมา เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.8.2 การวิเคราะห์ประเภทของความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Defect)

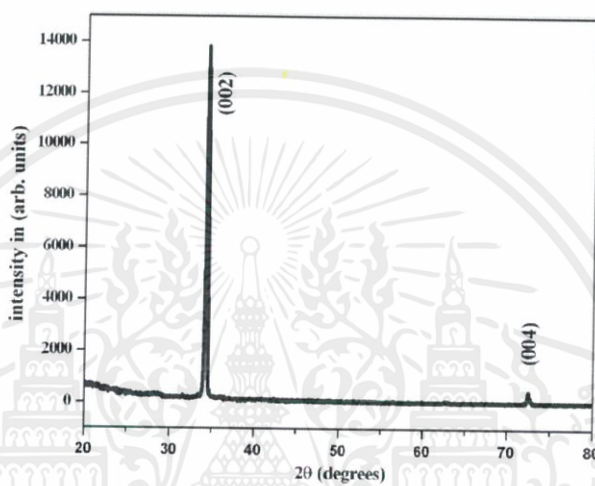
เนื่องจากแถบพลังงานสามารถเกิดได้อันเนื่องมาจากการเรียงตัวของอะตอมที่มีลักษณะเป็นคาบๆ ที่เรียกว่า ผลึก ดังนั้นหากมีอะตอมใดอะตอมหนึ่งหายไป หรือผลึกมีความไม่สมบูรณ์หรือบกพร่องก็ย่อมส่งผลต่อแถบพลังงาน และส่งผลต่อพลังงานที่เปล่งออกมีหลังจากการรวมตัวกลับของเอ็กซิตอนด้วย ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของผลึกจึงสามารถทำได้ผ่านเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์

2.9 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

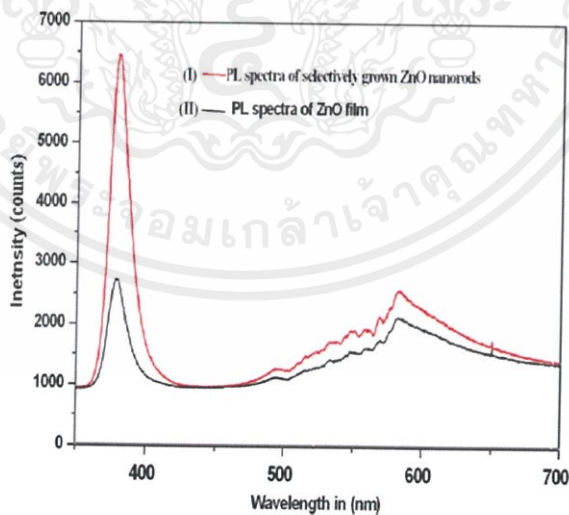
กูรอซียี อะฮฺซันุลฮัก (Qurashi Ahsanulhaq) และคณะ [22] ได้ทำการวิจัยในลักษณะที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยฉบับนี้ โดยอาศัยการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการจัดเรียงชั้นอะตอม (Atomic layer deposition) แล้วสร้างลวดลายด้วยวิธีการพิมพ์ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งคณะวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความละเอียดและความคมชัดระหว่างการใช้สารไวแสงเชิงบวกกับสารไวแสงเชิงลบ ซึ่งทางคณะวิจัยสรุปพบว่า สารไวแสงเชิงบวกให้ความคมชัดของลวดลายมากกว่า ในส่วนของกระบวนการปลูกแท่งนาโน ทางคณะใช้วิธีการปลูกแบบไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้เวลาปลูกที่ 6 ชั่วโมง อุณหภูมิอยู่ในช่วง 70-90 องศาเซลเซียส ผลที่คณะวิจัยได้มาแสดงให้เห็นว่า ผลึกของลวดนาโนที่ได้มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยวอย่างสมบูรณ์ โดยจะเห็นได้จากกราฟเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ให้พีค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดี่ยวที่ระนาบ <002> อย่างชัดเจนชัด (รูปที่ 2.15) และกราฟของเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ที่แสดงการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 381 นาโนเมตร อันเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในส่วนของการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตรนั้น เป็นผลมาจากช่องว่างที่ขาดธาตุออกซิเจนในผลึกของซิงค์ออกไซด์ (Oxygen vacancies) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะจึงเกิดการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน (รูปที่ 2.16) ผลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงให้เห็นว่า ผลึกมีลักษณะเป็นแบบผลึกเดี่ยวจริง และมีระนาบไปยังแกนซี (รูปที่ 2.17)

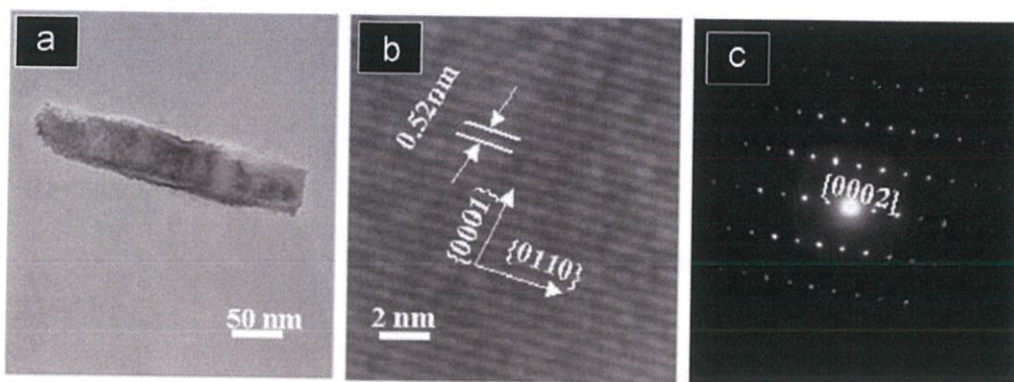


ภาพที่ 2.8 กราฟข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยระนาบ 004 คือ ระนาบของฐานรองรับ [22]



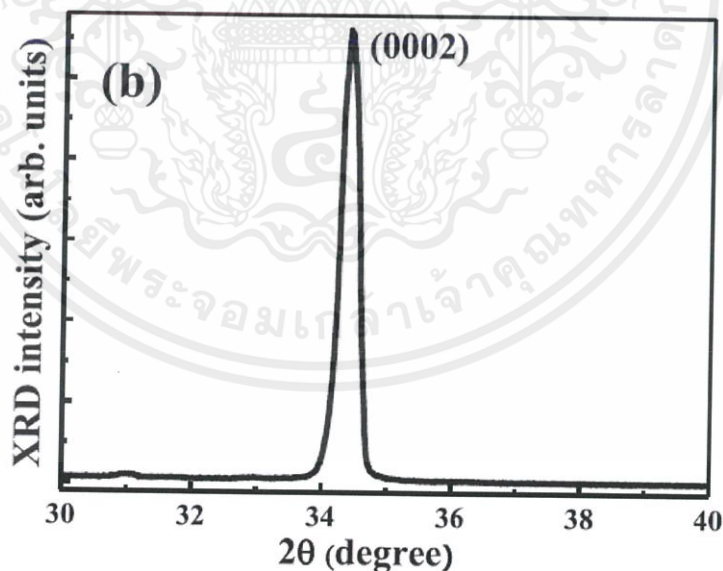
ภาพที่ 2.9 กราฟข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนส์ [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



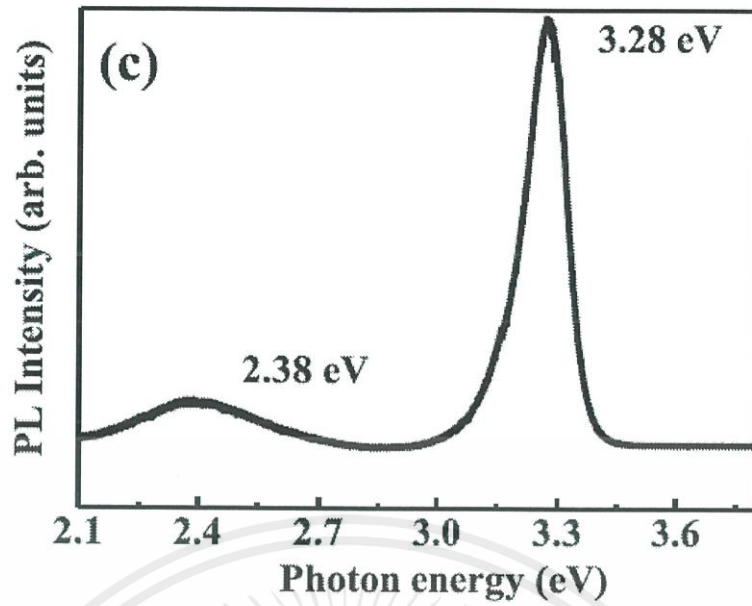
ภาพที่ 2.10 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน [22]

นอกจากนี้ แซต. เอ็น. เออร์เกสซา (Z. N. Urgessa) และคณะ [23] ได้ใช้วิธีการปลูกชั้นฟิล์มโดยวิธีปั่นเคลือบ และสร้างลวดลายโดยการพิมพ์ด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam lithography) แล้วทำการปลูกแท่งนาโนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล แท่งนาโนแสดงความเป็นผลึกเดี่ยวอย่างชัดเจน โดยจะเห็นได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังภาพที่ 2.18 นอกจากนี้ผลสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ยังแสดงพีคที่ 3.28 อิเล็กตรอนโวลต์อย่างเด่นชัด (ภาพที่ 2.19) สอดคล้องกับความเป็นผลึกที่มีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามก็ยังมีผลของจุดบกพร่องแบบขาดออกซิเจน (Oxygen vacancies) รวมอยู่ด้วย นอกจากนี้ทางคณะวิจัยยังได้วัดขนาดและความลึกของลวดลายอีกด้วย



ภาพที่ 2.11 กราฟข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 กราฟข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ

- 1) น้ำปลอดประจุ (Deionized water)
- 2) อะซิโตน (Acetone)
- 3) เมทานอล (Methanol)
- 4) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการปลูกชั้นฟิล์มบาง

- 1) ซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate)
- 2) เอทานอลบริสุทธิ์ (Absolute ethanol)
- 3) ไดเอทานอลแอมมีน (Diethanolamine)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างโครงผลึกโฟโตนิกส์

- 1) สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist)
- 2) น้ำยาล้าง (Developer) สำหรับสารไวแสงชนิดบวก

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการปลูกลวดนาโน

- 1) ซิงค์ไนเตรท (Zinc nitrate)
- 2) น้ำปลอดประจุ (Deionized water)
- 3) เฮกซะเมธิลีน เทรตะแอมมีน (Hexamethylene tetraamine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 สารเคมีที่ใช้ในการลบสารไวแสงหลังจากปลูกลวดนาโน

- 1) อะซิโตน (Acetone)
- 2) น้ำปอดประจุ

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

3.2.1 อุปกรณ์พื้นฐาน

- 1) หลอดหยด
- 2) ปีกเกอร์
- 3) กระจกตวง
- 4) เครื่องชั่งสาร
- 5) ขวดใส่สารละลายพร้อมหัวฉีด

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกชั้นฟิล์มบาง

- 1) ระบบเคลือบสารแบบปั่นเคลือบ (Spin coater system)
- 2) เต้าเผาแบบควบคุมอุณหภูมิได้

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างลวดลายโครงผลึกโฟโตนิกส์

- 1) ระบบเชิงแสง โดยมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดอัลตราไวโอเลต
- 2) แท่นให้ความร้อน (Hot plate)
- 3) เครื่องทำความสะอาดโดยพลาสมาออกซิเจน (Oxygen plasma cleaner)
- 4) หน้ากากกันแสง (Photomask)

3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกลวดนาโน

- 1) หม้อเหล็กสำหรับทำไฮโดรเทอร์มอล (Autoclave)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เตาเผาแบบควบคุมอุณหภูมิได้

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองรับ (Substrate)

- 1) ตัดกระจกสไลด์ให้ได้ขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร
- 2) นำกระจกที่ตัดแล้วบรรจุลงในโถทำความสะอาด แล้วเติมน้ำปอดประจุลงไป
- 3) นำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 15 นาที
- 4) เทของเหลวในโถทำความสะอาดทิ้ง แล้วเติมอะซิโตน (Acetone) จากนั้นนำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
- 5) ทำเช่นนี้อีก 2 ครั้ง โดยเปลี่ยนสารเป็นเมทานอล (Methanol) และไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ตามลำดับ
- 6) ทำฐานรองรับ (Substrate) ให้แห้งโดยการตั้งบนแท่นให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

3.3.2 ขั้นตอนการปลูกชั้นฟิล์มบาง

- 1) สั่งเคราะห์สารละลายโดยเตรียมซิงค์อะซิเตทความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ บรรจุในบีกเกอร์ แล้วเติมเอทานอลบริสุทธิ์ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมสารไดเอทานอล-แอมมีน 1 มิลลิลิตร ลงไป
- 2) นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวน (Stirrer) พร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3) นำไปพักไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยปิดบีกเกอร์ให้สนิท
- 4) นำหลอดดูดดูดสารละลาย แล้วหยดลงบนกระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดแล้ว
- 5) นำไปปั่นเคลือบด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปตั้งบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ทำชั้นตอนที่ 5 อีก จนครบ 8 ครั้ง ต่อกระจกสไลด์ 1 แผ่น

7) นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงพร้อมที่จะนำไปสร้าง ลวดลายโครงผลึกโพลีโตนิกส์

3.3.3 ขั้นตอนการสร้างลวดลาย

1) นำหลอดดูดดูดสารไวแสงชนิดบวก แล้วหยดลงบนฐานรองรับที่ปลูกฟิล์มบางเรียบร้อยแล้ว

2) นำไปปั่นเคลือบที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที

3) นำไปวางบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

4) ณ ขั้นตอนนี้ ฐานรองรับจะประกอบด้วยสาร 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และ ชั้นสารไวแสงชนิดบวก จากนั้นนำไปฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยการนำหน้ากากกันแสงทาบลงบน ฐานรองรับ แล้วทำการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 7 และ 8 วินาที

5) นำฐานรองรับที่ผ่านการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้ว ไปให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที

6) นำฐานรองรับไปแช่ลงในน้ำยาล้างเป็นเวลา 30 วินาที

7) นำฐานรองรับไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยพลาสมาออกซิเจนที่ระดับ ปานกลางเป็นเวลา 1 นาที

3.3.4 ขั้นตอนการปลูกลวดนาโน

1) เตรียมสารละลายซิงค์ไนเตรทความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ในน้ำปอดประจุ 50 มิลลิลิตร

2) ทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที แล้วเติมเฮกซะเมธิลีน เทรตะแอมมีน (Hexamethylene tetraamine) 0.04 โมลาร์

3) บรรจุฐานรองรับลงในหม้อเหล็กสำหรับทำไฮโดรเทอร์มอล แล้วเติมสารละลายที่เตรียมไว้ ลงในหม้อเหล็ก ปิดฝาให้แน่น

4) นำหม้อเหล็กเข้าเตาเผา โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

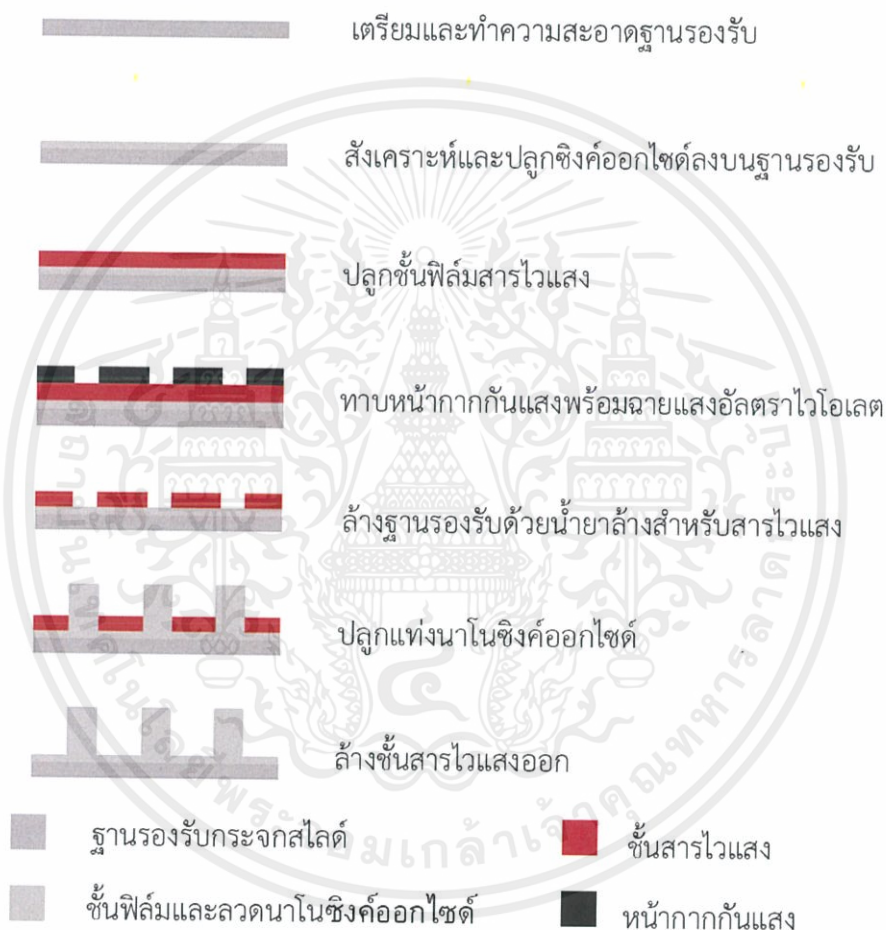
5) นำฐานรองรับออกมาจากหม้อ แล้วฉีดน้ำปอดประจุเพื่อทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ทำให้ฐานรองรับแห้งโดยนำไปวางบนแท่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจนกว่าจะแห้ง

3.3.5 ขั้นตอนการล้างสารไวแสง

- 1) นำฐานรองรับที่ปลุกลวดนาโนเรียบร้อยแล้วไปแช่ลงในอะซิโตน
- 2) รอจนกว่าสารไวแสงที่เคลือบอยู่ละลายออกหมด เป็นอันเรียบร้อยแล้ว



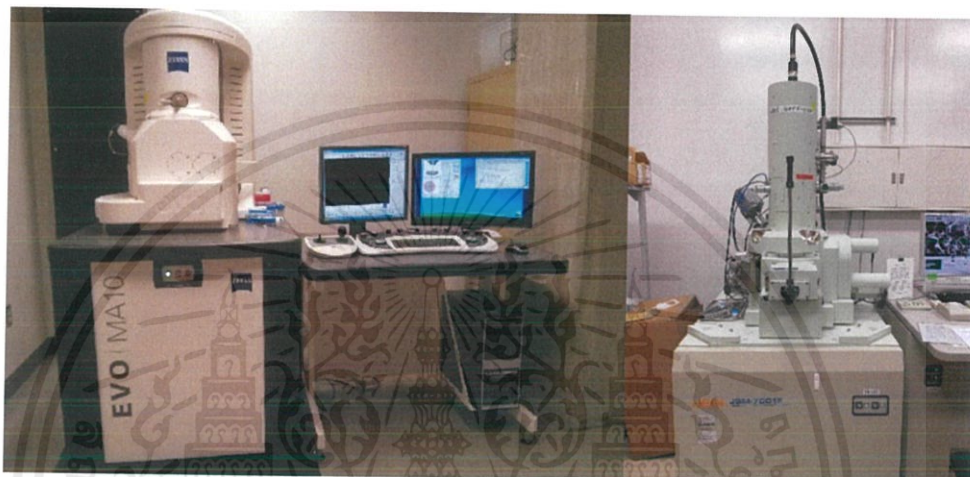
ภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนต่างๆ ในดำเนินการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

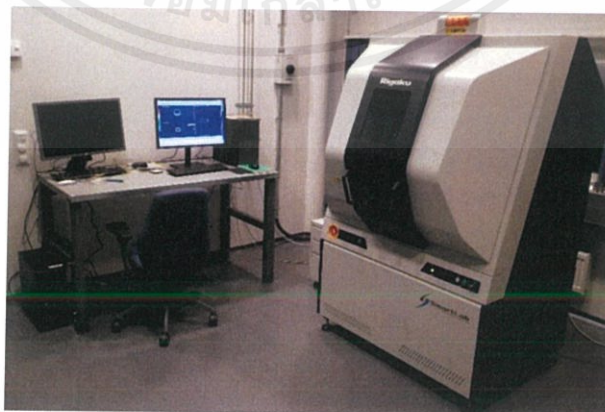
การตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จะได้ข้อมูลเป็นภาพถ่านสามมิติ ซึ่งจะสามารถแสดงรูปทรงของสารที่ปลูก รวมไปถึงการคำนวณขนาดของรูปทรงเหล่านั้น โดยรุ่นที่ใช้เป็น ZEISS Evo ma10 และรุ่น JEOL JSM-7001F



ภาพที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทั้งสองรุ่น [24]

3.4.2 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

การตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลของความเป็นผลึก ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ขนาดของผลึก เป็นโครงสร้างผลึก มีผลึกของสารชนิดอื่นเจือปนหรือไม่ รุ่นที่ใช้เป็น Rigaku Smartlab

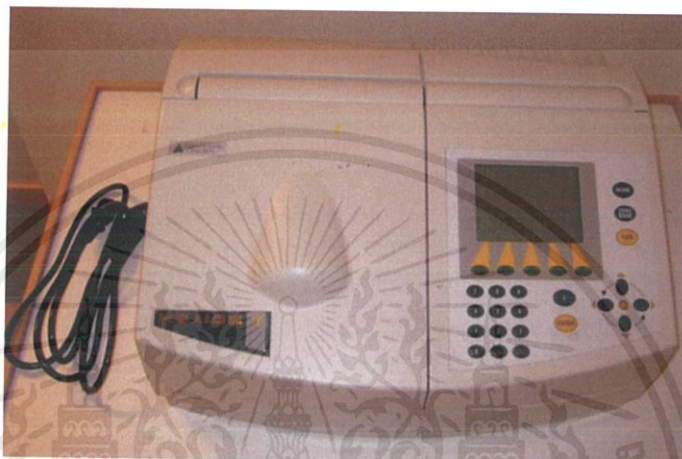


ภาพที่ 3.3 เครื่องตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์[25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงในย่านการมองเห็น (UV-Visible spectrometer)

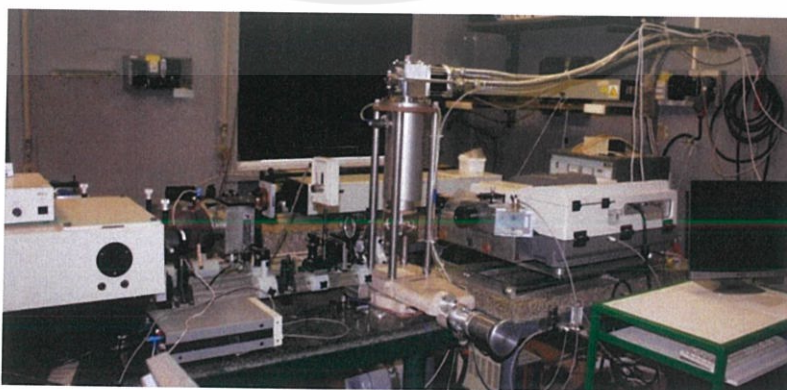
รุ่นที่ใช้เป็น Helios Gamma จากบริษัท Thermoelectron การตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลของการดูดกลืนแสงของวัสดุ ให้ค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามเชิงแสงซึ่งสามารถตีความถึงความบริสุทธิ์ของสารที่เป็นองค์ประกอบของผลึกโฟ-โตนิกส์ ทั้งยังสามารถคำนวณความหนาของฟิล์มบางได้ด้วยในทางอ้อม



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงในย่านการมองเห็นเครื่องวัดสเปกตรัมของแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงในย่านการมองเห็น [26]

3.4.4 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

ระบบที่ใช้เป็นแบบปรับเอง โดยใช้ He:Cd Laser เป็นตัวกระตุ้นที่อุณหภูมิห้อง การตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จะให้ข้อมูลชนิดความไม่สมบูรณ์ของผลึก ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก เวลาดำรงอยู่และชนิดของเอกซิตอน (Exciton)



ภาพที่ 3.5 ระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

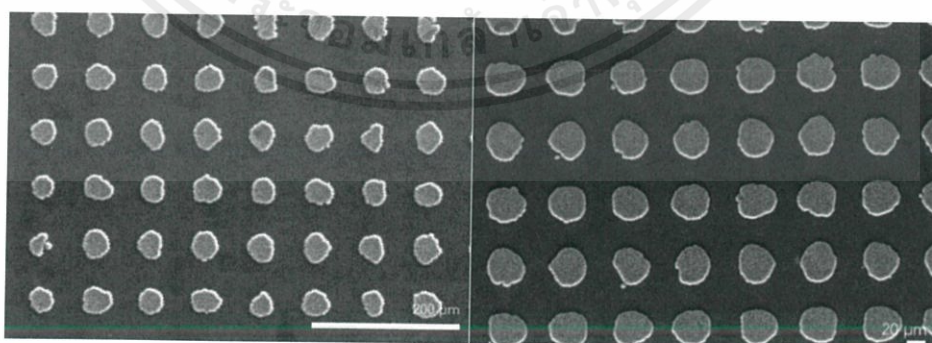
วิเคราะห์และอภิปรายผล

4.1 การศึกษาขนาดของลวดลาย และสัณฐานวิทยา

4.1.1 ผลของระยะเวลาการฉายแสงในกระบวนการพิมพ์เชิงแสง

ภาพที่ 4.1 แสดงแท่งนาโนที่ถูกปลูกใช้เวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้ลวดลายที่ได้จากการพิมพ์เชิงแสง โดยการพิมพ์เชิงแสงนี้ใช้เวลาในการฉาย 7 และ 8 วินาที ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นความแตกต่างลวดลายที่ได้ โดยลวดลายที่เกิดจากการฉายแสงเป็นเวลา 7 วินาทีนั้น มีความคมชัดที่น้อยกว่าภาพที่ใช้เวลาฉายแสง 8 วินาทีอย่างเห็นได้ชัด แม้กระนั้น ลวดลายที่เกิดจากการฉายแสงเป็นเวลา 7 วินาทีได้ให้ลวดลายที่เล็กกว่าลวดลายที่ปรากฏบนหน้ากากกันแสง ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของฉายแสงที่ต่ำ (Underexposure) อย่างไรก็ตามความคมชัดของลวดลายที่ได้ยังถือว่าพอรับได้เมื่อเทียบกับลวดลายที่ได้จากการฉายแสง 8 วินาทีซึ่งให้ขนาดลวดลายที่ใหญ่กว่า และมีการเรียงตัวของผลึกที่ต้อยกว่าเงื่อนไข 7 วินาที (ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.2.1) ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกเงื่อนไขที่ 7 วินาทีเพื่อการศึกษาผลของระยะเวลาการปลูกแท่งนาโนต่อไป

นอกจากลวดลายที่ได้มีความต่างกันแล้ว ขนาดของลวดลายเองก็มีความแตกต่างด้วยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 นั้นเป็นเพราะระยะเวลาที่น้อยส่งผลทำให้ปริมาณความแน่นของโฟตอนอัลตราไวโอเลตมีน้อยลง จึงเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลของสารไวแสงได้น้อยลง [16]



ก.

ข.

ภาพที่ 4.1 (ก) และ (ข) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของลวดลายที่ได้จากการฉายที่เวลา 7 และ 8 วินาทีตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของลวดลายเฉลี่ยที่เวลาฉายแสงต่างกัน

เวลาที่ใช้ในฉายแสง (วินาที)	ขนาดลวดลายเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
7	34.02±3
8	42.01±3

4.1.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโน

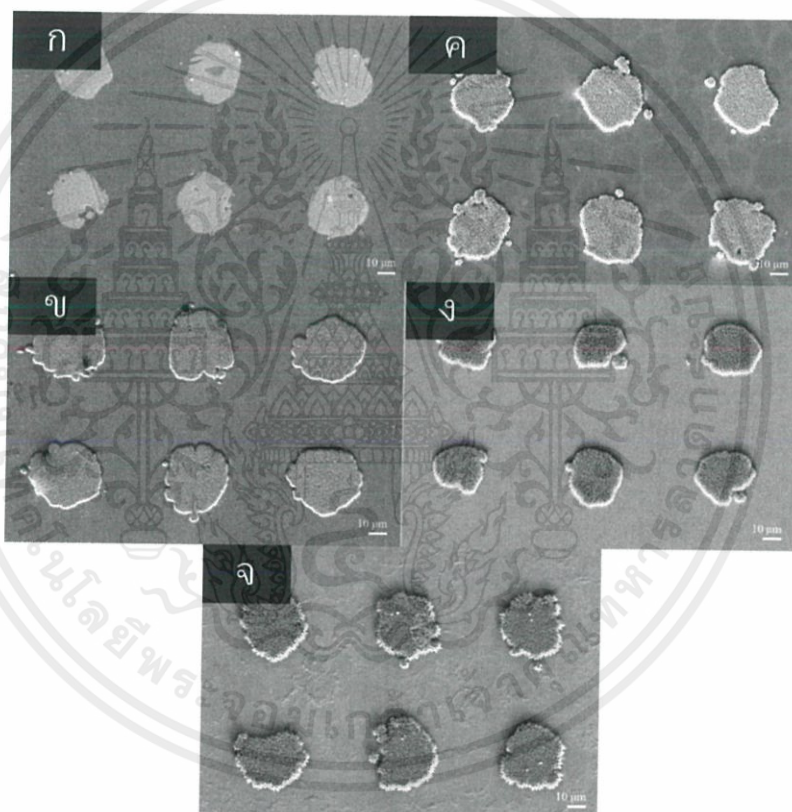
เวลาที่ใช้ในการปลูกต่างกันย่อมส่งผลต่อขนาด ความยาว รวมไปถึงสมบัติอื่นๆ ของแท่งนาโนอีกด้วย เช่น ความสมบูรณ์ของผลึก ขนาดเกรน สมบัติเชิงแสง ฯลฯ ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของเวลาที่ใช้ในการปลูกต่อสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์

ภาพที่ 4.2 แสดงพัฒนาการของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เวลาการปลูกที่ต่างกัน ได้แก่ที่ 0.5 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง โดยจะเห็นได้ว่าความสูงของแท่งนาโนมีมากขึ้นซึ่งสามารถสังเกตได้จากเงาของแท่งนาโนที่มากขึ้น และนั่นก็เป็นไปตามแนวโน้มที่คาดไว้ การใช้เวลาปลูกแท่งนาโนที่มากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาการควบแน่นเป็นของแข็งสามารถเกิดได้มากขึ้นและสามารถเกิดได้เรื่อยๆ หากเพิ่มเวลาการปลูกจนกว่าสารตั้งต้นจะหมดลง

ในภาพที่ 4.3 แสดงความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เวลาในการปลูกต่างกัน โดยแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ใช้เวลาปลูก 2 ชั่วโมงจะให้รูปร่างของแท่งนาโนที่มีลักษณะคล้ายเมล็ดข้าว กล่าวคือ มีลักษณะที่แหลมตรงปลายของแท่งนาโน เมื่อเพิ่มเวลาในการปลูกเป็น 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่า ความแหลมของปลายแท่งนาโนเริ่มหายไปและกลายเป็นแท่งนาโนที่มีปลายเรียบ มีรูปร่างหกเหลี่ยมอย่างชัดเจน ซึ่งผลของปรากฏการณ์นี้ได้รับการอธิบายไว้โดย Jung Min Lee และคณะ [28] โดยผลการทดลองการปลูกแท่งนาโนภายใต้สภาพความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำแสดงให้เห็นว่า ปลายของแท่งนาโนที่เติบโตขึ้นนั้นมีลักษณะโค้งงอเข้าไปในแท่งนาโน หู และขรุขระ ดังนั้นในทางกลับกัน ลวดนาโนที่ถูกปลูกภายใต้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มากพอจะทำให้ปลายแท่งนาโนมีลักษณะนูนออกออกจากตัวแท่ง ซึ่งทางคณะได้ให้คำอธิบายไว้ว่า เกิดจากการที่บริเวณปลายของแท่งนาโนเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาควบแน่นได้มากที่สุดอันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับตัวภาชนะของเหลวในหลายมิติ อีกทั้งยังเป็นแนวทิศที่มีความเสถียรต่ำจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ดังนั้นไอออนของโลหะสังกะสี (Zn^{2+}) ซึ่งเป็นไอออนของสารตั้งต้นจึงมีการจับตัวรวมกันบริเวณปลายแท่งนาโนมากที่สุด อีกทั้งในกรณีของความเข้มข้นต่ำ ไอออนจะกระจายตัวบริเวณขอบของปลายแท่งนาโนมากกว่าบริเวณตรงกลาง ในทางกลับกันหากมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นสูงก็

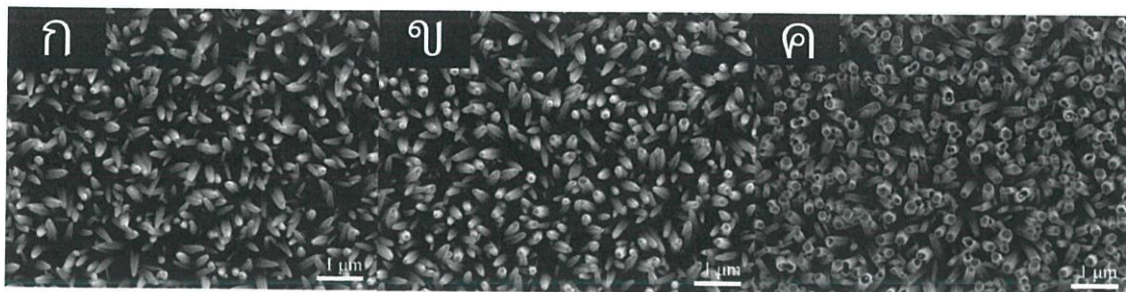
จะทำให้ไอออนของโลหะสังกะสีกระจายตัวได้ดี โดยเฉพาะบริเวณตรงกลาง ทำให้ตรงกลางของปลายแท่งนาโนมีโอกาสเติบโตได้สูงกว่า จึงทำให้ปลายเกิดการนูนขึ้น นอกจากนี้ ในกรณีของความเข้มข้นสูง ผลของแท่งนาโนข้างเคียงยังทำให้การแพร่ของสารยังแท่งนาโนข้างเคียงได้อีกด้วย ทำให้ความเข้มข้นของไอออนมีมากขึ้นบริเวณปลายแท่ง และส่งผลต่อรูปร่างของปลายแท่งนั่นเอง

นอกจากนี้ เมื่อเวลาที่ใช้ในการปลูกเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มลดลงเรื่อยๆ ทำให้การกระจายตัวของไอออนสังกะสีที่จากเดิมมีการกระจายตัวบริเวณตรงกลางของแท่งนาโนมาก กลับกระจายตัวบริเวณขอบของปลายแท่งนาโนแทน อันเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ลดลง จึงทำให้แท่งนาโนเติบโตบริเวณขอบได้มากกว่า ภาพที่ 4.2 จึงสังเกตเห็นหลุมบริเวณกลางแท่งนาโน[28]



ภาพที่ 4.2 (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) แสดงแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกที่เวลา 0.5 1 2 3 และ 4

ชั่วโมงตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 (ก) (ข) และ (ค) แสดงสัณฐานวิทยาของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกที่เวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ

จากการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ดังภาพที่ 4.3 โดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยฮิสโตแกรม (Histogram) ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของขนาดกับระยะเวลาที่ใช้ในการปลูก ลวดนาโน ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของขนาดของแท่งนาโนเมื่อใช้เวลาในการปลูกนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาที่มากขึ้นทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาควบแน่นได้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่จัดทำโดย เอ.เอฟ. अबดุลรอฮมาน (A. F. Abdulrahman) และคณะได้ระบุค่าเส้นผ่าศูนย์กลางที่มีค่าน้อยกว่าแม้ว่าใช้เวลาในการปลูกเท่ากัน และอุณหภูมิต่างกันเพียง 5°C [29] ทั้งนี้อาจมาจากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความหนาและพื้นที่ของชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดแท่งนาโนเฉลี่ยกับระยะเวลาที่ใช้ในการปลูก

เวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโน (ชั่วโมง)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (นาโนเมตร)
2	358 ± 52
3	392 ± 54
4	425 ± 41

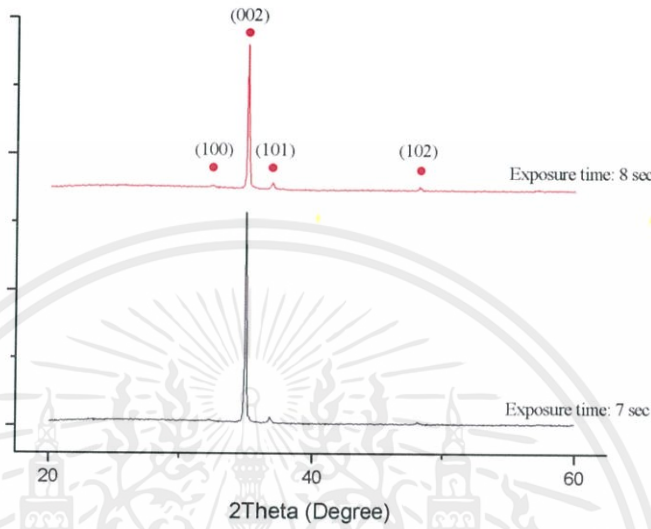
4.2 การศึกษาผลึกวิทยา

4.2.1 ผลของระยะเวลาการฉายแสงในกระบวนการพินท์เชิงแสง

กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกอย่างเป็นลวดลายโดยเวลาในการฉายแสงที่ต่างกันแสดงในภาพที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แท่งนาโนที่ปลูกเป็นลวดลายที่ผ่านการฉายแสง 7 วินาทีจะทำให้การเรียงตัวของผลึกที่ดีกว่าตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสงที่เวลา 8 วินาที ทั้งนี้เป็นผล

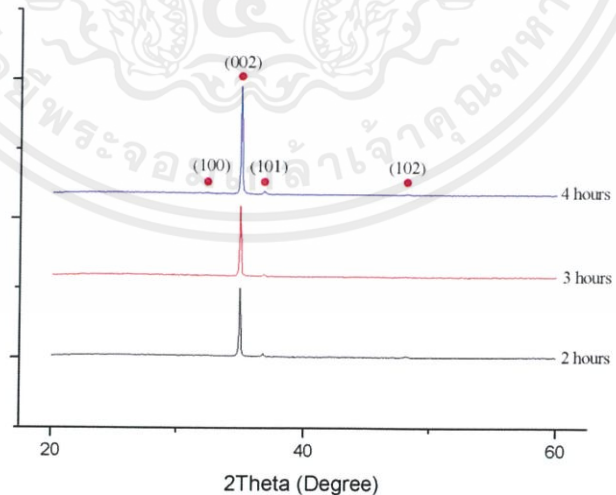
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาจากการที่พื้นที่ในการเกิดของแท่งนาโนมีน้อยลงดังที่ได้รายงานผลไปก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.1.1 ในขณะที่จำนวนของแท่งนาโนมีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้ตัวอย่างที่ผ่านการฉายแสง 7 วินาทีจึงมีความหนาแน่นของแท่งนาโนมากกว่า และทำให้เกิดการบ่งคับทิศทางในการโตของผลึกจึงทำให้มีการเรียงตัวของผลึกที่ดีกว่า



ภาพที่ 4.4 แสดงลวดลายการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการฉายแสงที่เวลา 7 วินาที และ 8 วินาทีตามลำดับ

4.2.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโน



ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ในโหมด theta-2-theta ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ปลูกที่ 2 3 และ 4 ชั่วโมง

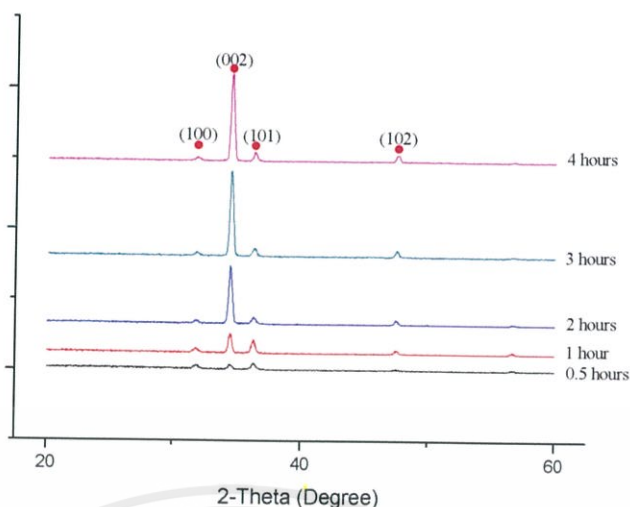
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนของพีค (002) ต่อพีคอื่นๆ เทียบกับระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล (โหมด theta-2-theta)

ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล (ช.ม.)	อัตราส่วนความสูงพีค (002) ต่อพีคอื่นๆ		
	(002)/(100)	(002)/(101)	(002)/(102)
2	22.0	14.5	26.0
3	22.8	18.4	30.0
4	31.2	23.0	46.5

จากภาพที่ 4.5 เป็นผลจากการวัดสมบัติทางผลึกวิทยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยโหมด theta-2-theta ซึ่งเป็นการวัดผลึกทั้งหมดที่ตั้งฉากกับฐานรองรับ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่ปลูกโดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง มีความสูงของพีคระนาบ (002) มากที่สุด และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการปลูกที่น้อยลง จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของผลึกที่มีระนาบ (002) ต่อผลึกระนาบอื่นๆ มีค่าลดลงตามแนวโน้มของระยะเวลาการปลูกที่ลดลงซึ่งบ่งบอกถึงการเรียงตัวของผลึก โดยสัดส่วนที่มากที่สุดอยู่ที่เงื่อนไข 4 ชั่วโมง นั้นแสดงว่า ที่เงื่อนไข 4 ชั่วโมงมีการเรียงตัวของผลึกไปในทิศ (002) ที่สูงมากเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ หรืออีกนัยหนึ่ง การเรียงตัวของผลึกไปในทิศแกนซีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการปลูกที่มากขึ้น

ในส่วนของการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยโหมด 2-theta ซึ่งเป็นการวัดการก่อตัวของระนาบผลึกทั้งหมดที่เป็นไปได้ พบว่า อัตราส่วนของของพีคระนาบ (002) ต่อระนาบอื่นๆ มีแนวโน้มลดลงตามเวลาปลูกที่ลดลง ซึ่งสามารถตีความได้ว่า การก่อเกิดของผลึกส่วนใหญ่ก็ยังเกิดระนาบ (002) อย่างเด่นชัด และมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการปลูกมากขึ้นตามผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อช่วงต้นของการปลูก (ที่เวลาน้อยๆ) ผลึกเริ่มก่อตัวขึ้นตามระนาบต่างๆ อย่างไม่เป็นระเบียบมากนัก เมื่อเวลาปลูกที่เพิ่มขึ้น การก่อตัวเริ่มชี้ไปในทางแกนซีมากขึ้นเป็นผลมาจากการที่พลังงานพื้นผิวในบริเวณปลายของแท่งนาโนและในทิศแกนซีมีค่ามากจึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเป็นของแข็ง ด้วยเหตุนี้ระนาบ (002) จึงก่อตัวได้ง่ายกว่าระนาบอื่นๆ



ภาพที่ 4.6 แสดงกราฟการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ในโหมด 2-theta ของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ปลูกที่ 0.5 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนของพีค (002) ต่อพีคอื่นๆ เทียบกับระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล (โหมด 2-theta)

ระยะเวลาไฮโดรเทอร์มอล (ชม.)	อัตราส่วนความสูงพีค (002) ต่อพีคอื่นๆ		
	(002)/(100)	(002)/(101)	(002)/(102)
0.5	0.7	0.7	4.5
1	4.8	1.5	5.5
2	13.7	8.9	13.3
3	27.2	10.2	13.7
4	29.4	10.5	13.4

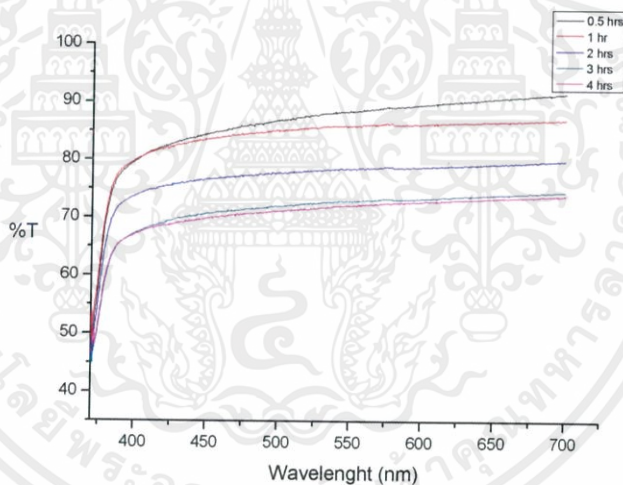
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงแสง

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการทะลุผ่านของแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านการมองเห็น แสดงให้เห็นถึงผลของเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกต่อร้อยละการทะลุผ่านของแสงทั้งสองย่าน (ภาพที่ 4.7) โดยตัวอย่างที่ใช้เวลาในการปลูกที่ 2 ชั่วโมง ยินยอมให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า

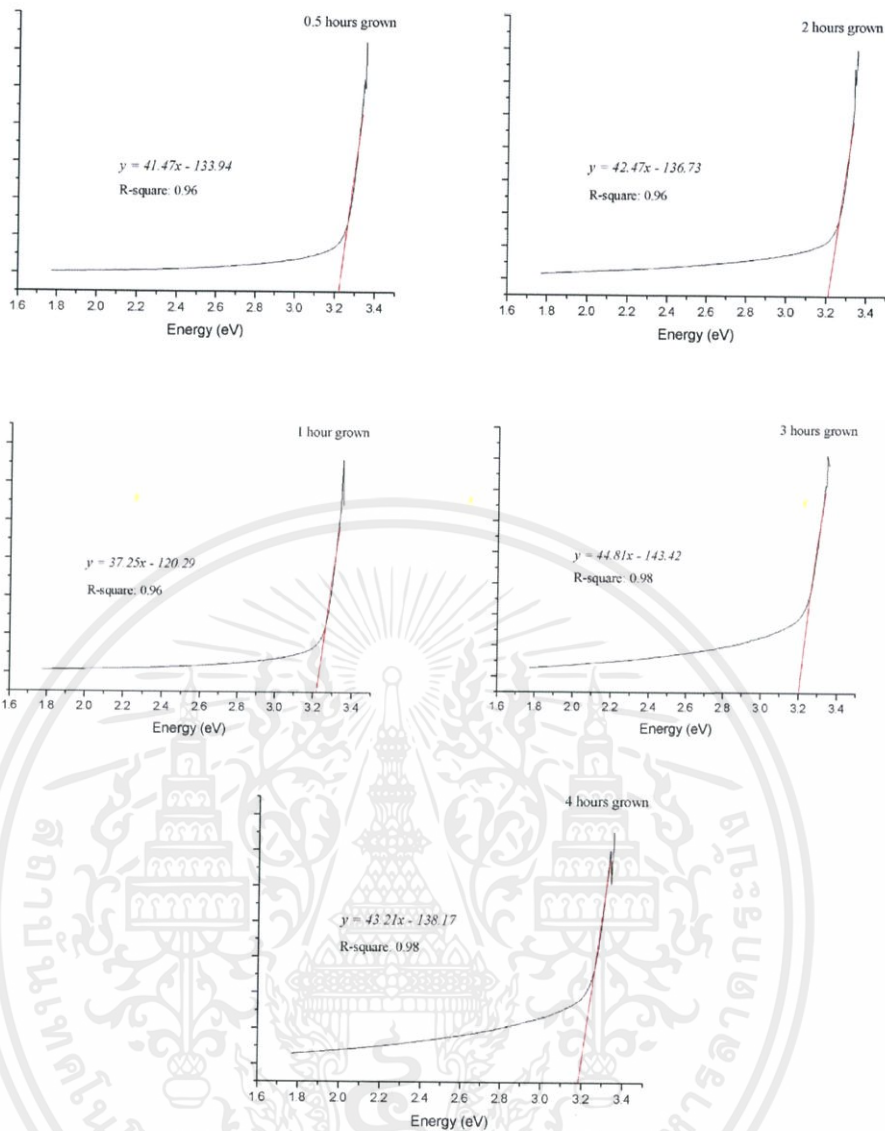
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

370 นาโนเมตรผ่านออกไปได้มากกว่าตัวอย่างชิ้นอื่นๆ ทั้งนี้ ในกรณีของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกที่เวลา 3 และ 4 ชั่วโมง มีค่าการทะลุผ่านไม่ได้ต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามแท่งนาโนที่ปลูกที่เวลา 4 ชั่วโมงยินยอมให้แสงที่ความยาวคลื่นสูงกว่า 370 นาโนเมตร ผ่านออกไปได้ยาก ผลของการทะลุผ่านนี้ สอดคล้องกับความหนาและความสูงของตัวแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยขนาดที่ใหญ่ขึ้น ความสูงที่มากขึ้น ย่อมบดบังแสงไม่ให้ส่องผ่านได้มากขึ้นเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต

ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดการทะลุผ่านของแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตและย่านการมองเห็น ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาแถบพลังงานเชิงแสงโดยใช้วิธีเขียนกราฟของเทาค์ (Tauc's plot) ได้อีกด้วย ดังที่แสดงในภาพที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าแถบพลังงานเชิงแสงมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการปลูกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การลดลงของแถบพลังงานเชิงแสงมีความเกี่ยวข้องกันกับขนาดเกรน ความเข้มข้นของพหุ และสถานะความเค้นของผลึก [29,30] โดยแถบพลังงานเชิงแสงที่มากที่สุดปรากฏในตัวอย่างที่ปลูกโดยใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง คือ 3.23 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งนั่นแสดงว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกที่ 0.5 ชั่วโมงนั้น มีขนาดเกรนเล็กที่สุดนั่นเอง



ภาพที่ 4.7 แสดงร้อยละการทะลุผ่านของแสงอัลตราไวโอเล็ตและย่านการมองเห็นของแท่งนาโนที่ปลูกด้วยเวลาต่างกัน



ภาพที่ 4.8 แสดงการประมาณค่าแถบพลังงานเชิงแสงและสมการเส้นตรงที่ใช้ในการประมาณค่า ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแถบพลังงานเชิงแสงเทียบกับเวลาที่ใช้การปลูกแทนนาโน

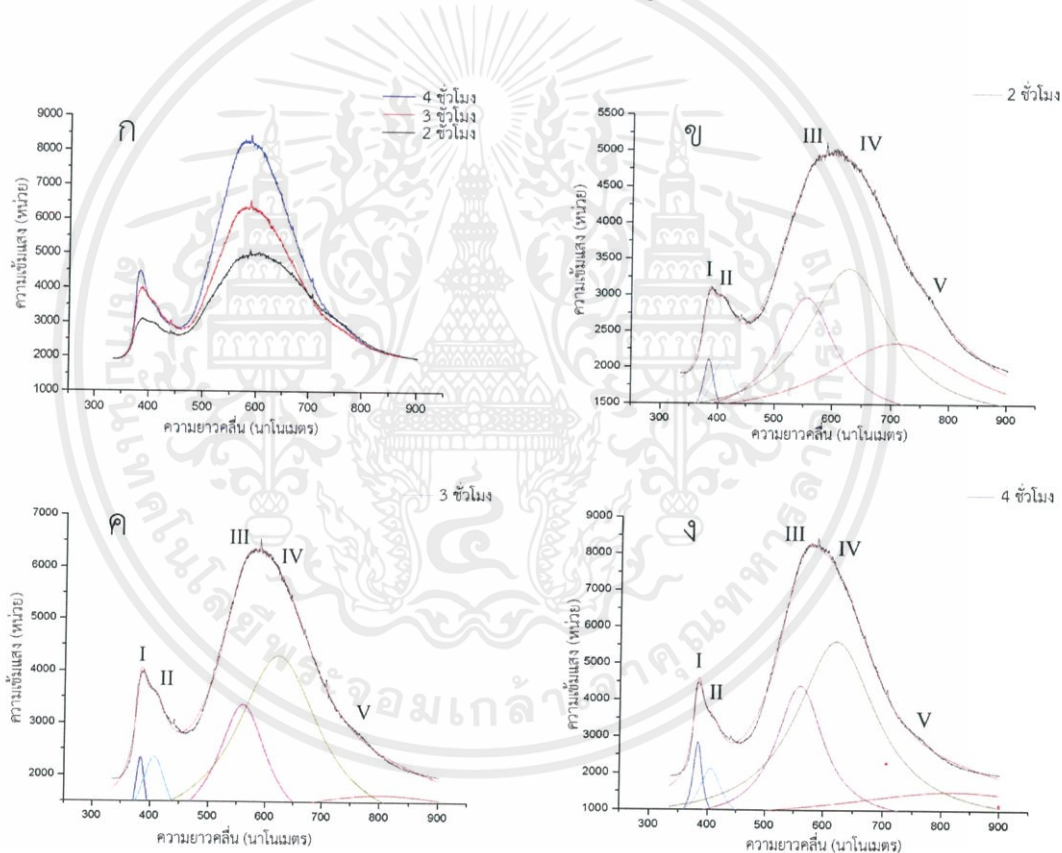
เวลาที่ใช้ในการปลูก (ชั่วโมง)	ค่าแถบพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
0.5	3.23
1	3.22
2	3.21
3	3.20
4	3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาชนิดของความไม่สมบูรณ์ของผลึก (Defects)

ผลจากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์แสดงให้เห็นความเข้มที่วัดได้จากแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกในระยะเวลาต่างกัันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการปลูก ดังภาพที่ 4.9ก ซึ่งความเข้มที่มากขึ้นเกี่ยวข้องกับความเป็นผลึกที่มากขึ้นสอดคล้องกับผลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ อย่างไรก็ตามผลึกที่ประกอบเป็นแท่งนาโนอยู่ไม่ได้สมบูรณ์แบบ โดยเฉพาะในกรณีของแท่งนาโนที่ใช้เวลาปลูกที่ 4 ชั่วโมง จะมีจุดบกพร่องในผลึกอยู่มากที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ

พีคที่ได้จากกราฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะบ่งบอกถึงชนิดความไม่สมบูรณ์ของผลึก โดยในแต่ละกราฟสามารถแยกได้ออกเป็น 5 พีค ซึ่งจะกำกับด้วยเลขโรมัน I ถึง V ดังแสดงในภาพที่ ตารางที่ 4.6 แสดงชนิดของจุดบกพร่องในผลึกเทียบกับพีคจากกราฟโฟโตลูมิเนสเซนซ์



ภาพที่ 4.9 (ก) แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแท่งนาโนที่ปลูกด้วยระยะเวลาต่างกัน ภาพ (ข) (ค) และ (ง) แสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของแท่งนาโนที่ปลูก 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงชนิดของจุดบกพร่องในผลึกที่พิกัดทั้ง 5 ตำแหน่ง

เลขโรมัน	ตำแหน่งพิกัด (นาโนเมตร)	ชนิดของจุดบกพร่องในผลึก
I	384	Near-band-edge / Donor-acceptor pair (DAP) [22,23,31,32,33]
II	409	Zinc interstitial defect / Longitudinal optical phonon replicas of DAP [31,32,33]
III	554	Oxygen vacancy defect [22,23,31,32,33]
IV	627	Oxygen interstitial defect [31]
V	760	Lattice disorder due to zinc interstitial defect [34,35]

จากตารางที่ 4.6 สามารถตีความได้ว่า การเกิดการรวมตัวกลับในบริเวณใกล้แถบพลังงาน (Near-band-edge) สามารถแสดงถึงคุณภาพของผลึกของแท่งนาโน ดังนั้นหากความเข้มที่วัดได้ในตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 360 – 390 นาโนเมตรมีค่าสูงและโดดเด่น ย่อมหมายถึงความเป็นผลึกที่มีคุณภาพสูงและมีจุดบกพร่องในผลึกน้อย ซึ่งจะเห็นได้จากภาพที่ 4.9ก ความเข้มที่มีค่าสูงสุดคือของเงื่อนไขการปลูกที่ 4 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม สำหรับเงื่อนไขนี้ ความเข้มของจุดบกพร่องแบบช่องว่างขาดออกซิเจน (Oxygen vacancies) ก็สูงเช่นกัน แสดงถึงจำนวนที่ค่อนข้างมากของจุดบกพร่องชนิดนี้ เพื่อการพิจารณาที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น การหาอัตราส่วนของความเข้มที่ตำแหน่ง I ต่อตำแหน่ง III จึงมีนัยสำคัญ ค่าอัตราส่วนได้แสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่เงื่อนไขการปลูก 4 ชั่วโมง แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดเวลาในการปลูกลง นั่นแสดงว่า แม้ว่าการเพิ่มเวลาในการปลูกจะทำให้ได้ความเป็นผลึกที่มากขึ้น ได้ขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้น ขนาดของแท่งนาโนที่มากขึ้น แต่คุณภาพของผลึกกลับลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากระยะเวลาที่มากขึ้นทำให้อะตอมออกซิเจนมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเป็นแท่งนาโนและในทางกลับกันก็สามารถหลุดออกจากผลึกได้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราส่วนความเข้มแสงที่ตำแหน่ง I ต่อที่ตำแหน่ง III เทียบกับเวลาที่ใช้ในการปลูกแตงนาโน

เวลาที่ใช้ในการปลูกแตงนาโน	อัตราส่วนความเข้มที่ตำแหน่ง I ต่อที่ตำแหน่ง III
2	0.70
3	0.69
4	0.64

ด้วยเหตุผลข้างต้น การเพิ่มขึ้นของความบกพร่องของผลึกแบบช่องว่างขาดออกซิเจนและการแทรกตัวของออกซิเจนอาจมาจากการไม่สมดุลกันของสารตั้งต้นทั้งในกระบวนการการปลูกฟิล์มบางและกระบวนการปลูกแตงนาโน ซึ่งหากความเข้มข้นของไอออนโลหะซิงค์หมดไปก่อน ก็จะทำให้ระบบเต็มไปด้วยหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxyl group) และสามารถเกิดความบกพร่องในผลึกได้ นอกจากนี้ผลของจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ที่ไม่อาจควบคุมได้ในกระบวนการปลูกชั้นฟิล์มบาง ย่อมมีผลต่อความบกพร่องของผลึกด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ความบกพร่องของผลึกในรูปแบบนี้อาจส่งผลดีในแง่ของการทำไปประยุกต์ใช้งานด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic application) ซึ่งต้องการสถานะพลังงานกับดัก (Trap state) มากๆ หรืออุปกรณ์แปลงแสงย่านสีเขียว-เหลือง

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การปลูกแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์อย่างเป็นระเบียบเป็นการปลูกโครงสร้างนาโน 1 มิติของซิงค์ออกไซด์ภายใต้ลวดลายและการจำกัดพื้นที่ที่ได้ออกแบบไว้และสร้างไว้บนฐานรองรับโดยวิธีการพิมพ์เชิงแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผลของระยะเวลาในการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในกระบวนการพิมพ์เชิงแสงมีผลต่อความคมชัด และขนาดของลวดลาย อันเป็นผลมาจากปริมาณโฟตอนที่ไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนสายโซ่ของสารไวแสงเป็นไปด้วยอัตราที่ต่างกัน นอกจากนี้ ผลของเวลาที่ใช้ในการปลูกแท่งนาโนโดยการทำไฮโดรเทอร์มอลมีผลต่อสมบัติหลายประการ โดยสมบัติที่ได้รับการศึกษาจากโครงงานพิเศษนี้ได้แก่ ผลึกวิทยา สัณฐานวิทยา สมบัติเชิงแสง และชนิดของความไม่สมบูรณ์ของผลึก ซึ่งได้แสดงแนวโน้มความเป็นผลึกที่มากขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น แต่ความสมบูรณ์ของผลึกลดลง เช่นเดียวกับค่าแถบพลังงานเชิงแสงที่ลดลง ในส่วนของผลของชนิดของความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในผลึกนั้น พบว่า แท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ประกอบด้วยจุดบกพร่องหลายประการ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในหลายงานวิจัยที่ได้อ้างอิงไปในบทก่อนหน้า

5.2 แนวทางในการต่อยอดโครงงานพิเศษ

5.2.1 การศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ

การศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพและสมบัติของแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์โดยปลูกในรูปแบบที่เป็นลวดลายเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาค้นคว้าผลของความเข้มข้นที่ใช้ในการปลูกไฮโดรเทอร์มอล ความเข้มข้นที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มซิงค์ออกไซด์และสารไวแสง ผลของขนาดลวดลายที่ลดลงต่อคุณภาพและสมบัติของแท่งนาโน เหล่านี้เป็นต้น

5.2.3 การนำไปประยุกต์ใช้

การนำแท่งนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกแบบเป็นลวดลายนี้ไปใช้งานในทางโฟโตนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ ไม่ว่าจะเป็นการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเซลล์แสงอาทิตย์ ผลึกโฟโตนิกส์ สำหรับการกรองแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] Stephen, T. T. Andrew, R. 2013. *Modern physics for scientists and engineers*. Boston: Cengage learning.
- [2] “Photonics definition”, <https://en.oxforddictionaries.com>, 2018. [Online]. Available: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/photonics>
- [3] “Photonics definition”, <https://www.collinsdictionary.com>, 2018. [Online]. Available: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/photonics>
- [4] “Photonics definition”, <http://www.op-tec.org>, 2018. [Online]. Available: <http://www.op-tec.org/what-is-photonics>
- [5] Zhonghua Zheng et al., Optical Properties of ZnO Nanorods Films Prepared by CBD Method, *Chemical Physics Letter* 712, 2018, p.115-159
- [6] “Zinc oxide refractive index”, <https://refractiveindex.info>, 2018. [Online]. Available: <https://refractiveindex.info/?shelf=other&book=air&page=Ciddor>
- [7] M. Kamruzzaman and J. A. Zapien, Effect of temperature, time, concentration, annealing and substrate on ZnO nanorods array growth by hydrothermal process on hot plate, *Crystallography report* 63, 2018, p.456-471
- [8] Prasas, N. Prasad. 2004. *Nanophotonics*. New Jersey: Wileys-Interscience.
- [9] Joannopoulos, J. D. Johnson, S. D. Winn, JD and Meade, R.D. 2011. *Photonic crystal: Molding and Flow of Light*, New Jersey: Princeton university press
- [10] S. Yilmaz, S. Garry, E. McGlynn, and E. Bacaksiz, Synthesis and Characterization of Mn-doped ZnO Nanorods Grown in Ordered Periodic Honeycomb Pattern Using Nanosphere Lithography, *Ceramics International* 40, 2014, p.7753-7759
- [11] “Nanometer”, <https://en.wikipedia.org>, 2019. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanometre>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] “นาโนเทคโนโลยี ราชบัณฑิตยสถาน”, <http://www.royin.go.th>, 2018. [Online]. Available: <http://www.royin.go.th/dictionary/>
- [13] “Nanotechnology definition”, <https://www.nano.gov>, 2018. [Online]. Available: <https://www.nano.gov/nanotech-101/what/definition>
- [14] สิริพัฒน์ ประโทนเทพ. 2558. *ควอนตัมและนาโนเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ : มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- [15] Boris, S.B. Mikahil, M.I. and David, J.S. 2005. *Thermodynamics and Kinetics in Material Science*. London: Oxford university press.
- [16] Burn, J. Lin. 2010. *Optical Lithography Here is why*, SPIE press.
- [17] “Photoresist”, <http://microchem.com>, 2018. [Online]. Available: <http://microchem.com/Prod-LithographyOverviewPosNeg.htm>
- [18] “X-ray diffraction”, <https://fys.kuleuven.be>, 2018. [Online]. Available: <https://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover>
- [19] “Scanning electron microscope”, <https://serc.carleton.edu>, 2018. [Online]. Available: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- [20] Angelica S-T et al., Optical Band Gap Estimation of ZnO Nanorods, *Materials Research* 19, 2016
- [21] “Kronig-Penny model”, <https://www.researchgate.net>, 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Kronig-Penney-model_fig7_308780601
- [22] Qurashi Ahsanulhaq, Jin Hwan Kim, Yoon-Bong Hahn, Etch-free selective area growth of well-aligned ZnO nanorod arrays by economical polymer mask for large-area solar cell applications, *Solar Energy Materials & Solar Cell* 98, 2012, p.476-481

[23] Z. N. Urgessa, J. R. Botha, S. R. Tankio Djio kap, C. Coleman, S. Bhattacharyya. Patterned growth of ZnO nanorods by chemical bath deposition, *Physica B: Condensed Matter*, 2017, p.79-83

[24] “ZEISS Evo ma10”, <https://www.nanofab.ualberta.ca>, 2018. [Online]. Available: <https://www.nanofab.ualberta.ca/capabilities/our-equipment/scanning-electron-microscope-zeiss-evo-ma10/>

[25] “X-ray diffractometer”, <http://www.oulu.fi>, 2018. [Online]. Available: <http://www.oulu.fi/cmnt/node/34338>

[26] “UV-vis helios gamma”, <https://www.caeonline.com>, 2018. [Online]. Available: <https://caeonline.com/buy/spectrophotometers/unicam-helios-gamma/174481>

[27] “Photoluminescence”, <https://www.ufe.cz>, 2019. [Online]. Available: <https://www.ufe.cz/en/laboratory-photoluminescence-spectroscopy>

[28] Jung Min Lee, You-Shin No, Sungwoong Kim, Hong-Gyu Park and Won Il Park, Strong interactive growth behaviours in solution-phase synthesis of three-dimensional metal oxide nanostructures, *Nature Communication* 6, 2015, p.6325

[29] A. F. Abdulrahman, S. M. Ahmed, M. A. Elmessiere, Effect of growth time on the optical properties of ZnO nanorods grown by low temperature method, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 12, 2017, p.1001-1009

[30] B. L. Zhu, X. H. Sun, S. S. Guo, X. Z. Zhao, J. Wu, R. Wu, J. Liu, *Japanese Journal of Applied Physics* 45, 2006, p.7860

[31] Kartikey Verma, Babulan Chaudhary, Vijay Kumar, Vishal Sharma, Mahendra Kumar, Investigation of structural, morphological and optical properties of Mg: ZnO thin film prepared by sol-gel spin coating method, *Vacuum* 146, 2017, p.524-529

[32] Jinpeng Lv, Meihua Fang, Photoluminescence study of oxygen interstitial defects in ZnO nanostructures, *Materials Letters* 218, 2018, p.18-21

[33] B.K. Meyer, H. Alves, D.M. Hofmann, W. Kriegseis, D. Forster, F. Bertram, J. Christen, A. Hoffmann, M. Strabburg, M. Dworzak, U. Haboek, A.V. Rodina, Bound

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

exciton and donor–acceptor pair recombinations in ZnO, *Physica Status Solidi (b)* 241, 2004, p.231-260

[34] Gomi, M.; Oohira, N.; Ozaki, K.; Koyano, M. Photoluminescence and structural properties of precipitated ZnO fine particles, *Japanese Journal of Applied Physics* 42, 2003, p.481–485

[35] Magnus Willander, Omer Nur, Jamil Rana Sadaf, Muhammad Israr Qadir, Saima Zaman, Ahmed Zainelabdin, Nargis Bano and Ijaz Hussain, Luminescence from Zinc Oxide Nanostructures and Polymers and their Hybrid Devices, *Materials* 3, 2010, p. 2643-2667



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอัมบาลี มาหะมุ
วัน เดือน ปีเกิด	วันศุกร์ ที่ 20 กันยายน พุทธศักราช 2539 (คริสต์ศักราช 1996) ตรงกับวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 1417
ที่อยู่	95/2 หมู่ 3 ถนน บริบาลประชากร ตำบล เจ๊ะเห อำเภอบาเจาะ จังหวัด นราธิวาส ประเทศไทย 96110
การศึกษา	(พ.ศ. 2555) โรงเรียนอัสสัมชัญปัตตานี (พ.ศ. 2558) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้