การวิเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ใช้สร้างเครื่องกำเนิดกลไฟฟ้าระดับนาโนแบบใหม่ โดยใช้การวัดและวิเคราะห์แบบซีเอเอฟเอ็ม ที่ผันแปรความต่างศักย์ไปสู่การประยุกต์ใช้เชิงอิเล็กทรอนิกส์แนวใหม่

INVESTIGATION OF THE NOVEL TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR-ENABLED ZnO NANOWIRES USING VOLTAGE-DEPENDENT CAFM TOWARD EMERGING ELECTRONIC APPLICATION

วัชรพงศ์ คล้อยสุวรรณ์
WATCHARAPHONG KLOISUWAN

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION OF THE NOVEL TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR-ENABLED ZnO NANOWIRES USING VOLTAGE-DEPENDENT CAFM TOWARD EMERGING ELECTRONIC APPLICATION

WATCHARAPHONG KLOISUWAN

A SPECIAL PROJECT SUBMTTED 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงงานพิเศษ

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การวิเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ใช้สร้างเครื่องกำเนิดกลไฟฟ้าระดับนาโนแบบใหม่ โดยใช้การวัดวิเคราะห์แบบซีเอเอฟเอ็ม ที่ผันแปรความต่างศักย์ไปสู่การประยุกต์ใช้เชิงอิเล็กทรอนิกส์แนวใหม่
Special Project Title	INVESTIGATION OF THE NOVEL TRIBOELECTRIC NANOGENERATOR-ENABLED ZnO NANOWIRES USING VOLTAGE-DEPENDENT CAFM TOWARD EMERGING ELECTRONIC APPLICATION
นักศึกษา	นายวัชรพงศ์ คล้อยสุวรรณ์
รหัสประจำตัว	58110053
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สากล ระหงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. กิติพัฒน์ สินทิพย์ธรากุล

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิติพร ถนอมงาม	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นวพันธ์ ขยันกิจ	
ดร. สากล ระหงษ์	
ดร. กิติพัฒน์ สินทิพย์ธรากุล	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่ 12 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การวิเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ใช้สร้างเครื่องกำเนิดกลไฟฟ้าระดับนาโนแบบใหม่ โดยใช้การวัดและวิเคราะห์แบบซีเอเอฟเอ็มที่ผันแปรความต่างศักย์ไปสู่การประยุกต์ใช้เชิงอิเล็กทรอนิกส์แนวใหม่
นักศึกษา	วัชรพงศ์ คล้อยสุวรรณ์
รหัสประจำตัว	58110053
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สากล ระหงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. กิติพัฒน์ สินทิพย์ธรากุล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเส้นลวดกึ่งตัวนำระดับนาโนได้เป็นที่สนใจและถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในกลุ่มอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำเอง อย่างไรก็ตามเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์ จึงต้องอาศัยหลักการในเชิงวิทยาศาสตร์เพื่ออธิบายด้วยเหตุนี้ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งภาพลักษณะทางกายภาพและแผนภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์บนขั้วอิเล็กโทรดทองโดยจะใช้หัวเข็ม C-AFM ตรวจวัดบนพื้นที่ที่แตกต่างกันทั้ง 4 บริเวณด้วยการป้อนความต่างศักย์ระหว่างหัวเข็มและชิ้นงานในช่วง -4 ถึง 4 โวลต์ ซึ่งจะพบว่าบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดจะแสดงพฤติกรรมเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ในขณะที่บริเวณขอบด้านบน พื้นที่ผิวด้านข้าง ขอบด้านข้าง จะปรากฏความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับทฤษฎีพื้นที่การจำกัดประจุ (SCLC) นอกจากนี้ในขณะที่ความหนาแน่นของจุดการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นทั้งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวกและค่าลบ ขอบด้านข้างจะแสดงความหนาแน่นสูงที่สุด เป็นสิ่งที่น่าสนใจเมื่อกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าแสดงถึงความกว้างของช่องว่างชั้นพลังงานที่มีค่าระหว่าง 3.0-4.0 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยขอบด้านข้างจะมีความกว้างที่น้อยที่สุด จึงถูกพิจารณาว่าเป็นบริเวณที่เป็นเส้นทางการส่งถ่ายประจุได้ดีที่สุด การค้นพบพฤติกรรมนี้ถูกแสดงจากวิธีการเชิงข้อมูลที่ไม่เพียงแต่จะทำให้เข้าใจหลักการของสารกึ่งตัวนำแต่ยังช่วยให้สามารถออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project	Investigation of the novel triboelectric nanogenerator-enabled ZnO nanowires using voltage-dependent CAFM toward Emerging electronic application
Student	Watcharaphong Kloisuwan
Student ID	58110053
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2018
Advisor	Dr. Sakon Rahong
Co – Advisor	Dr. Kitiphat Sinthiptharakoon

ABSTRACT

Semiconductor nanowire has received enormous attention from both academic and industrial communities due to its capability of improving diverse applications not only by its one-dimensional morphology but also its fundamental difference from the other forms. However, to optimize the utilizations or open up a new dimension of usage, its novel science has to be discovered. To shed more light on this issue, conductive atomic force microscopy (CAFM) coupled with the force spectroscopy has been used to resolve simultaneous topography and current mapping of individual semiconducting nanowires, utilizing ZnO nanorod on Au substrate as a modal system. Exploiting specially-designed manipulation of the scanning nanoprobe, electrical conductivity of four different surface areas of each nanowire are visualized for the first time, in which voltage of -4 to 4 volts is applied across the tip-sample junction to comprehensively investigate electronic band states at nanowire surface through energetic band alignment dynamics. Despite top surface which clearly appears insulating regardless of the applied voltages, top edge, side surface, and side edge significantly express selective conductivity, which is attributed to composition-dependent space charge limited current (SCLC). Moreover, while density of the conducting points in these areas increases with both positive and negative biases, the side edge exhibits the highest density. Interestingly, current-voltage spectra derived from the imaging also indicates that these conductive regions possess different bandgap width ranging between 3.0 – 4.0 eV, in which the side edge expresses the narrowest bandgap. In consistence with the highest density of conduction spots, the protruding side edge is considered as the optimal charge transfer path through the nanowire. The finding accompanied by the unique method of data acquisition, can serve as a platform not only for understanding of the semiconductor nanowire-based application but also for future design of novel functional structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความเมตตากรุณาของ ดร.สากล ระหงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ดร.กิติพัฒน์ สินทิพย์ธรากุล นักวิจัยและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ ดร.อรรณพ คล้ำชื่น ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับหัวข้อโครงงานพิเศษและแนวทางที่ดีในการเขียนโครงงานพิเศษตลอดมา จึงทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้และความเข้าใจในด้านที่ทำการศึกษามากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณอลงกต ตรีทอง คุณภนิตา เกษมโชติช่วง และ คุณทักษดนย์ วุฒิคุณ ที่ช่วยดูแล สั่งสอนและคอยให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนโครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโน (Young Scientist and Technologist Program : YSTP) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนงานวิจัยทั้งในด้านอุปกรณ์การตรวจวัดวิเคราะห์และเงินทุนในการดำเนินงานวิจัยในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และบุคลากรทุกคนในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังแห่งนี้ที่ให้ความปรารถนาดี และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ สำหรับการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนด้านการเรียนและคอยให้กำลังใจในยามที่ท้อถอยจนเรียนผ่านพ้นมาได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

วัชรพงศ์ คล้อยสุวรรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VII

สารบัญตาราง XII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 สมมติฐานการวิจัย 4

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย 4

1.5 ขอบเขตงานวิจัย 5

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 5

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 ซิงค์ออกไซด์ 7

2.1.1 ข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น 7

2.1.2 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ 7

2.1.3 ข้อบกพร่องและความไม่บริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์ 8

2.1.4 โครงสร้างพันธะของซิงค์ออกไซด์ 9

2.1.4 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ 10

2.2 การสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน 10

2.3 การนำไฟฟ้าในวัสดุนาโน 12

2.3.1 การกระเจิงบนพื้นผิวหน้า 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 การเปลี่ยนโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ 14
2.4 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน 14
2.4.1 หลักการของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน 15
2.4.2 การออกแบบโครงสร้างและกลไกลการทำงาน 17
2.4.3 ประสิทธิภาพของสัญญาณขาออก 19
2.4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าด้วยแรงเสียดทาน 19
2.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า 22
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 22
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า 24

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 33
3.1 กระบวนการที่ 1 การเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน 35
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการ 35
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ 37
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ 41
3.1.4 วิธีการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน 42
3.2 กระบวนการที่ 2 การตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา 47
3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด 47
3.2.2 เครื่องวัดการกระจายของพลังงานรังสีเอ็กซ์ 48
3.2.3 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟาเรด 49
3.2.4 เครื่องรามานสเปคโตรมิเตอร์ 50
3.3.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 51
3.3 กระบวนการที่ 3 การตรวจสอบ และวัดวิเคราะห์พื้นผิวของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ 52
3.3.1 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการ 52
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3 วิธีดำเนินการตรวจสอบ และวัดวิเคราะห์พื้นผิวเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน 56

บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผลการวิจัย 61

4.1 ผลการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน.....62

4.1.1 การสร้างชั้นฐานรองรับก่อนเข้ากระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์.....62

4.1.2 การสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ภายหลังการเตรียมฐานรองรับ 67

4.2 ผลการตรวจสอบเบื้องต้นของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่เกิดขึ้น 68

4.2.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์.....68

4.2.2 การตรวจสอบส่วนประกอบบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ 69

4.2.3 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของวัสดุ.....71

4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์บนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน.....73

4.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา 73

4.3.2 การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน.....79

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 111

5.1 สรุปผลการทดลอง..... 111

5.2 ข้อเสนอแนะ 112

บรรณานุกรม. 113

ประวัติผู้เขียน..... 116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 โครงสร้างอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน....2

1.2 กลไกลการทำงานของอุปกรณ์ PIT 2

2.1 โครงสร้างผลึกของ ZnO 7

2.2 แผนภาพระดับชั้นพลังงานของซิงค์ออกไซด์ 9

2.3 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนบนฐานรองรับ 11

2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ 14

2.5 โมเดลตามทฤษฎีสำหรับโหมด ไดอิเล็กทริก-ไดอิเล็กทริก 16

2.6 โครงสร้างของ iTENG 18

2.7 Triboelectric Series....20

2.8 ผลของการเลือกคู่วัสดุต่อสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไป 21

2.9 ผลของแรงที่กระทำต่อสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไป 21

2.10 ผลของความชื้นต่อสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไป 22

2.11 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และการจำลองภาพ 3 มิติ จากผลของสภาพพื้นผิว ซึ่งเป็นหนึ่งในผลที่ได้จากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 23

2.12 การตั้งค่าการวัดสำหรับชิ้นงานนำไฟฟ้า....24

2.13 ภาพสัณฐานวิทยาของพื้นที่ที่ถูกดำเนินการด้วยโหมดแบบ Contact ด้วยหัวเข็มที่ไม่นำไฟฟ้า และในโหมดแบบ Contact ด้วยหัวเข็มที่นำไฟฟ้า....25

2.14 รูปแบบแผนภาพระดับชั้นพลังงานของโครงสร้างสารกึ่งตัวนำโลหะ....27

2.15 แรงดันเริ่มต้นตามฟังก์ชันของความหนาแน่นของฐานรองรับกับความแตกต่างของวัสดุทั้งสองชนิด....29

2.16 ภาพสัณฐานวิทยาของชิ้นงานซิลิกอนไดออกไซด์....31

3.1 แผนผังการดำเนินงานและเงื่อนไขที่ใช้ในงานวิจัย 34

3.2 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่เป็นเซมิคอนดักเตอร์ ชนิด N 35

3.3 สารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการทำความสะอาด 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.4	โครงสร้างพันธะของสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการทำความสะอาด	36
3.5	ต้นกำเนิดไททาเนียม ทอง และซิงค์ออกไซด์ สำหรับกระบวนการพลาสมาสปัตเตอร์ริง	36
3.6	หน้ากาก	37
3.7	เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ยี่ห้อ SCILOGEX รุ่น MS7-H550-S	38
3.8	เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา	38
3.9	เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต	39
3.10	เครื่องเคลือบสารด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง	39
3.11	เครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.12	เครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่น ยี่ห้อ Elma รุ่น S30H	40
3.13	เครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	41
3.14	โครงสร้างพันธะของเฮกซะเมทิลลีนเตตระมีน	41
3.15	โครงสร้างพันธะของซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต	42
3.16	แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ถูกตัดแล้ว ขนาด 2x2 cm^2	42
3.17	การติดชิ้นงานลงบนกระจกสไลด์ก่อนการเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	45
3.18	การวางกระจกสไลด์ในขวดทดลองก่อนเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	46
3.19	แผนภาพของเครื่อง SEM และรูปเครื่อง SEM ที่ใช้ในการวิจัย	47
3.20	หลักการทำงานของเครื่องมือ EDS และเครื่องมือ EDS ที่ใช้ในการวิจัย	48
3.21	หลักการทำงานของเครื่อง FT-IR และเครื่องมือ FT-IR ที่ใช้ในงานวิจัย	49
3.22	แผนภาพจำลองการวัดบนผิวหน้าของชิ้นงาน ตามจุดสีแดงที่ปรากฏ	50
3.23	การทำงานของเครื่องรามานสเปคโตรมิเตอร์ และเครื่องรามานที่ใช้ในงานวิจัย	50
3.24	หลักการที่ใช้ในเครื่อง XRD และเครื่อง XRD ที่ใช้ในงานวิจัย	51
3.25	การตรวจวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง XRD ที่ด้านต่าง ๆ บนชิ้นงาน จำนวน 4 ด้าน	52
3.26	รูปชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 เสร็จเรียบร้อยแล้ว	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.27	ขั้วที่ถูกต่อเพิ่มออกมาจากผิวหน้าของทองด้วยกาวซิลเวอร์และเส้นลวด	53
3.28	เครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	53
3.29	เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า	54
3.30	ส่วนประกอบหลักขณะการเตรียมชิ้นงานเพื่อเข้าเครื่อง C-AFM	55
3.31	รูปร่างของหัวเข็ม C-AFM ที่ใช้ในงานวิจัย	55
3.32	ชิ้นงานที่ต่อขั้วนำไฟฟ้าบนผิวหน้าของฟิล์มบางทองเสร็จเรียบร้อยแล้ว	57
3.33	การวางเข็ม C-AFM ลงบนบอร์ดวงจร	57
3.34	การสอดคานบีบเข้าไปประกบกับเข็ม C-AFM	58
3.35	การวางชิ้นงานลงบนฐานวางชิ้นงาน	58
4.1	การจำลองการสร้างชั้นฐานรองรับก่อนเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์	62
4.2	การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเส้นลวดซิงค์ออกไซด์	63
4.3	การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงาน	64
4.4	การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของเครื่อง XRD	66
4.5	ภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพปกติที่สามารถพบได้ด้วยตาเปล่า	67
4.6	เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM ที่กำลัง 20 kV.	68
4.7	การตรวจสอบส่วนประกอบบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์	70
4.8	การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของเครื่อง XRD	72
4.9	ลักษณะภายนอกที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือ C-AFM ในโหมดแบบ QI	74
4.10	รูปบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM	75
4.11	รูปบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM	76
4.12	รูปบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM	77
4.13	รูปพื้นผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	รูปลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ระหว่างชั้นอิเล็กโทรดทองและหัวเข็ม C-AFM ด้วยค่าความต่างศักย์ในช่วง -4 ถึง +4 โวลต์	80
4.15	การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าบวก	82
4.16	การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าศูนย์	83
4.17	การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าลบ	84
4.18	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้า	87
4.19	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ เมื่อป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์ และ -4 โวลต์	90
4.20	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงานในอุดมคติ ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์	92
4.21	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์	94
4.22	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานด้วยค่าเป็น +4 โวลต์	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.23	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงานในอุดมคติ ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์ (V=0)	98
4.24	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์	100
4.25	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์	101
4.26	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงานในอุดมคติ ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์ (V=0)	103
4.27	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์	105
4.28	แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์	107
4.29	การเปรียบเทียบแผนภาพระดับชั้นพลังงาน โดยแบ่งเป็นการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ และการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน 6

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ 10

4.1 ตารางแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน 65

4.2 ตารางแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในแต่ละปีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันเพิ่มสูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในภาคครัวเรือน การเกษตร และอุตสาหกรรม แต่แหล่งพลังงานหลักเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้า คือ ฟอสซิล และถ่านหิน ซึ่งทั้งสองแหล่งพลังงานนี้กลับลดลงไปเรื่อย ๆ การเสาะหาแหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ พลังงานทดแทนที่ดีนั้นควรจะได้มาจากแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการพัฒนาทางด้านพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมด (Renewable Energy) จึงเป็นงานวิจัยที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เริ่มจากการพัฒนาและเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จากนั้นจึงนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการควบคุมวัสดุในระดับนาโนเมตร

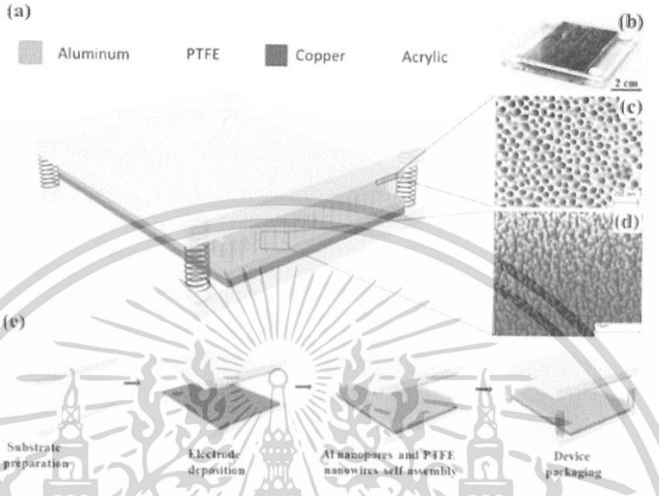
อุปกรณ์หลากหลายชนิดถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงานด้วยวัสดุนาโน เช่น เซลล์สุริยะ (Solar Cell) เซลล์แยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมี (Photo Electrochemistry หรือ PEC) ทั้งหมดนี้ล้วนจำเป็นต้องใช้พลังงานแสงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน และอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) ก็มีแหล่งพลังงานที่ใช้ คือ พลังงานความร้อน

อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (Triboelectric Nanogenerator หรือ TENG) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้จากการเคลื่อนที่ การสั่น หรือการเสียดสีระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา และเป็นแหล่งพลังงานที่อยู่รอบตัวเรา โดยศาสตราจารย์ Zhong Lin Wang และคณะผู้วิจัย ได้ทำการสร้าง อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (TENG) ในปี ค.ศ. 2012 โดยมีการกล่าวถึงประสิทธิภาพของ TENG ว่ามีการเปลี่ยนถ่ายพลังงานได้สูงสุดถึง 60-72% ในขณะที่โรงไฟฟ้าทั่วไปมีประสิทธิภาพเพียง 40% เท่านั้น [1-4] จึงทำให้ TENG สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานที่เป็นพลังงานที่ไม่ใช้แล้วได้ในปริมาณมาก เช่น พลังงานจากการเคลื่อนไหวในชีวิตประจำวันของมนุษย์ รวมไปถึงการเดินตามธรรมดา หรือแม้แต่การโดยสารรถที่มีการสั่นสะเทือน ทั้งหมดนี้ล้วนแล้วแต่สามารถแปลงจากพลังงานการสั่นสะเทือนหรือแรงเสียดทานนั้นไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังมีแรงลม และอีกมากมายที่เราพบได้ในชีวิตประจำวันของเรา [5, 6]

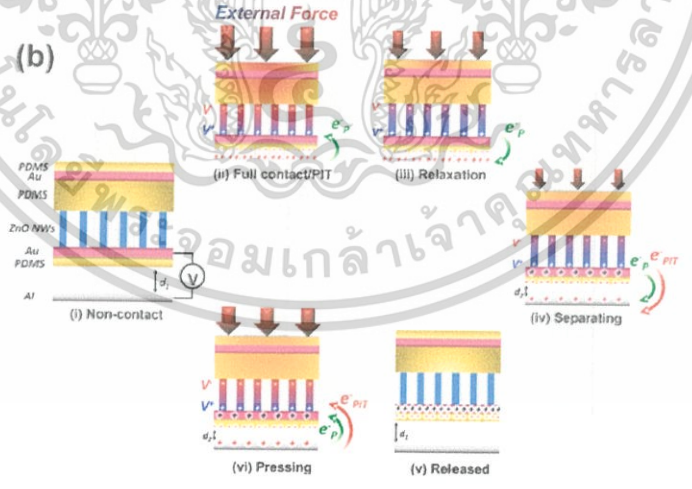
ต่อมา Jirayupat และคณะผู้วิจัย ได้ทำการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน [7] โดยได้ออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แบบไฮบริดที่เรียกว่า อุปกรณ์ Piezo-Induced Triboelectric (PIT) ที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลเป็นสมบัติทางไฟฟ้า สร้างโดยการใช้แท่งซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเข้าไปฝังตัวอยู่ในชั้น PDMS และให้ชั้นนี้ไปประกอบอยู่บนผิวด้านบนของชั้นที่ถูกเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งทำให้อุปกรณ์ PIT นี้ มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าอุปกรณ์ Triboelectric ที่อยู่ด้านบนของขั้วไฟฟ้าที่ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าไปยัง PDMS แต่ยังช่วยเพิ่มศักยภาพของศักย์ภายในอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านสนามไฟฟ้าภายนอก นำไปสู่การประยุกต์ใช้ในด้านของอุปกรณ์เปล่งแสง (LED) ที่สามารถเปล่งแสงได้ถึง 100 หลอด ด้วยการใช้อุปกรณ์ PIT นี้ ในขณะที่อุปกรณ์ทั่วไปสามารถเปล่งแสงได้น้อยกว่า 20 หลอด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงถือว่าเป็นการเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตที่มาจาก Triboelectric ด้วยการใช้โครงสร้างของอุปกรณ์ PIT มาใช้ในการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1.1 โครงสร้างอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (TENG) (a) รูปจำลองอุปกรณ์ (b) รูปถ่ายอุปกรณ์จริง (c) รูปแสดงความเป็นรูพรุนบนผิวหน้าชั้นขั้วไฟฟ้าที่ถ่ายด้วย SEM (d) เส้นลวด PTFE ที่ถ่ายด้วย SEM (e) และกระบวนการสร้างอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน (TENG) [1]



รูปที่ 1.2 กลไกลการทำงานของอุปกรณ์ PIT ที่มาจากการพัฒนาโครงสร้างของอุปกรณ์ Triboelectric แบบเดิม [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโนนั้น ต้องคำนึงไปถึงกลไกการเคลื่อนประจุภายในอุปกรณ์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาอย่างลึกซึ้ง เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้งานนั้น จะมีสมบัติและการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับกลไกการเคลื่อนประจุธรรมชาติ และลักษณะของพันธะระหว่างอะตอมและโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ ตลอดไปจนค่าพลังงานศักย์ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำกับโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดกลไฟฟ้าจากสมบัติเพียโซอิเล็กทริกที่ขึ้นอยู่กับการฝังตัวของแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์บนฐานรองรับ ด้วยการที่อุปกรณ์นี้สามารถแปลงพลังงานได้สูงสุดถึง 100 เท่า [1, 7] เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ Triboelectric แบบดั้งเดิม การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและการเพิ่มขึ้นของพลังงานศักย์ภายในระหว่างรอยต่อภายในโครงสร้าง จึงถูกพิจารณาว่ามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์

ถึงแม้ว่าจะมีการนำเสนอตัวแปรที่สำคัญที่เป็นปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน แต่ยังไม่มีการตรวจสอบและการตรวจวัดเพื่อหาความสัมพันธ์และกลไกในการเคลื่อนประจุของเส้นลวดนาโนและขั้วไฟฟ้า ขณะที่มีแรงกดบนตัวอุปกรณ์ ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวจะนำไปสู่แนวคิดใหม่ในการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโนต่อไป งานวิจัยชิ้นนี้จึงพยายามที่จะตรวจสอบความสัมพันธ์ในการเคลื่อนประจุที่บริเวณเส้นลวดนาโน โดยจะทำการศึกษาด้วยระบบวัดกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (Conductive Atomic Force Microscopy หรือ CAFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (CAFM) และเทคนิคการวัดแบบหัวสแกน (Scanning Probe Microscopy หรือ SPM) สามารถให้ข้อมูลทางสัณฐานวิทยาและข้อมูลการนำไฟฟ้าบนพื้นผิวหน้าของวัสดุที่มีความละเอียดในระดับนาโนได้ในเวลาเดียวกัน ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์สมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ในระดับนาโนได้ในภายหลัง เทคนิคการวัดวิเคราะห์ที่จำแนกลักษณะ ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อแสดงถึงระดับชั้นพลังงานและความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่ของประจุพาหะภายในโครงสร้างระดับนาโนที่มีความหลากหลาย

Park และคณะผู้วิจัย ได้นำเสนอผลการตรวจสอบเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่อยู่ในแนวตั้ง ด้วยระบบวัด CAFM เป็นครั้งแรก [8] ทำให้ได้มาซึ่งผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V Curve Characteristic) ของเส้นลวดระดับนาโนในแต่ละแท่ง และประเมินผลที่ได้ออกมาเป็นข้อมูลของโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ในเวลาต่อมาก็ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ระดับนาโน โดยเฉพาะวิธีการเพื่อที่จะวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเพียงหนึ่งเส้น ที่เกิดจากการกระตุ้นจากเทคนิคเชิงกล

แม้ว่าจะมีการรายงานจากแหล่งที่มาต่าง ๆ ว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโนนั้น สามารถปรับปรุงได้จากข้อมูลโครงสร้างเชิงอิเล็กทรอนิกส์ แต่ก็ยังไม่มีการตรวจสอบการถ่ายโอนประจุของเส้นลวดระดับนาโนโดยตรง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการศึกษาและตรวจวัดเส้นลวดระดับนาโนโดยใช้เทคนิค CAFM และเลือกใช้งานหัวเข็มที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรมาใช้ในการตรวจสอบ ทำให้ได้ความละเอียดในการตรวจสอบในระดับ 10 นาโนเมตร เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงไฟฟ้าของเส้นลวดระดับนาโน เช่น การกระจายตัวของประจุไฟฟ้า ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวเส้นลวดระดับนาโน และบริเวณรอยต่อขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปสู่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ รวมถึงโครงสร้างแถบพลังงานของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานระดับนาโน อย่างไรก็ตาม แม้จะมีความท้าทายในการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างโครงสร้างของแท่งเส้นลวดซิงค์-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ระดับนาโนเข้ากับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ทางผู้วิจัยเชื่อว่าการค้นพบดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ในระดับนาโนชนิดอื่นได้ อาทิเช่น แก๊สเซนเซอร์ (Gas Sensor) หรือชิพขยายสัญญาณรามาน (Surface-Enhanced Raman Scattering) เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (CAFM) โดยใช้การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับชิ้นงาน

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาและสมบัติการนำไฟฟ้าของพื้นผิวหน้าในแต่ละพื้นที่การตรวจวัด เพื่อนำไปสู่การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าได้

1.2.3 เพื่ออธิบายหลักการเคลื่อนประจุของแต่ละตำแหน่ง ระหว่างเส้นลวดซิงค์ออกไซด์และหัวเข็ม CAFM จากข้อมูลแผนภาพระดับชั้นพลังงาน (Electronics band structure) ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่เกิดจากการผันแปรความต่างศักย์ด้วยค่าบวกและค่าลบ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

จากการใช้เทคนิคการวัดวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า ศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาและสมบัติการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน จะสามารถอธิบายลักษณะการเคลื่อนประจุและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์จากข้อมูลแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

จากประโยชน์ของการนำอุปกรณ์ไตรโบอิเล็กทริกไปใช้งานที่กล่าวไว้ในข้างต้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงให้ความสนใจในกระบวนการและขั้นตอนในการวัดวิเคราะห์ขั้นสูงสำหรับชิ้นงาน โดยจะใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวอ่านนำไฟฟ้า (CAFM) ในโหมดการทำงานแบบ Quantitative Imaging (QI Mode) ที่มีการศึกษาการกำหนดค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลต่อแรงกระทำเชิงกลแก่แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยค่าที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้เกิดผลลัพธ์ทางสัณฐานวิทยาและทางกระแสไฟฟ้าบนบริเวณผิวหน้า ด้านบนของแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน นำไปสู่การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้สามารถแสดงผลออกมาเป็นลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 ออกแบบและสังเคราะห์อุปกรณ์ไตรโบอิเล็กทริกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่มีการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายในสารตั้งต้นและระยะเวลาในการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)

1.5.2 วิเคราะห์โครงสร้างของชั้นฟิล์มบางในแต่ละชั้นหลังทำการสังเคราะห์แต่ละขั้นตอน เพื่อศึกษาการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มบาง ข้อบกพร่อง และการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าหรือโครงสร้างภายในของชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope | SEM)

1.5.3 ศึกษาการวัดวิเคราะห์อุปกรณ์ไตรโบอิเล็กทริกขั้นสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวอ่านนำไฟฟ้า (CAFM) ในโหมดการทำงานแบบ Quantitative Imaging (QI Mode)

1.5.4 ศึกษาสมบัติเชิงสัณฐานวิทยาและสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า ด้านบนของแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และนำไปสู่การสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าในแต่ละจุดของผิวหน้า ด้านบนแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ระยะที่ 1 เป็นช่วงสำหรับการออกแบบและสร้างชิ้นอุปกรณ์ โดยศึกษาตัวแปรและเงื่อนไขที่ส่งผลในกระบวนการสร้างให้เกิดความเหมาะสม เพื่อให้แท่งซิงค์ออกไซด์มีขนาดอยู่ในระดับนาโน มีการเจริญเติบโตที่สม่ำเสมอและมีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณผิวหน้า โดยในระหว่างการสร้างในแต่ละขั้นตอน จะนำชิ้นงานไปศึกษาโครงสร้างและสิ่งที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction หรือ XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM), เครื่องวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive Spectrometer หรือ EDS), เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infared Spectrometer หรือ FT-IR) และเครื่องรามานสเปคโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) เพื่อเป็นการตรวจสอบลักษณะที่เกิดขึ้นของชิ้นงานในเบื้องต้นให้ไม่มีสิ่งปนเปื้อนและความบกพร่องทั้งทางโครงสร้างและทางสัณฐานวิทยา

ระยะที่ 2 เป็นช่วงสำหรับการวัดและวิเคราะห์ชิ้นงานขั้นสูงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวอ่านนำไฟฟ้า (CAFM) ในโหมดการวัดแบบ Quantitative Imaging (QI Mode) ซึ่งจะใช้หัวเข็มเป็นตัวกลางในการแตะไปที่ผิวหน้า ด้านบนของแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนเพื่อวัดลักษณะทางสัณฐานวิทยา และวัดลักษณะการนำไฟฟ้า โดยจะศึกษาค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องหรือส่งผลกระทบต่อการวัดนี้ และกำหนดค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำ แล้วจึงนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์เป็นลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ในบริเวณผิวหน้า ด้านบนของแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ช่วงเวลา									
	2561					2562				
	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
1. ศึกษาทฤษฎี หลักการ และการทำงานของเครื่องมือ CAFM										
2. ออกแบบและสร้างโครงสร้างของอุปกรณ์ไตรโบอิเล็กทริก										
3. ศึกษาการวัดวิเคราะห์ด้วย CAFM ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรของความต่างศักย์										
4. จัดการข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดลอง										
5. จัดทำรูปเล่มโครงงานวิจัย										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)

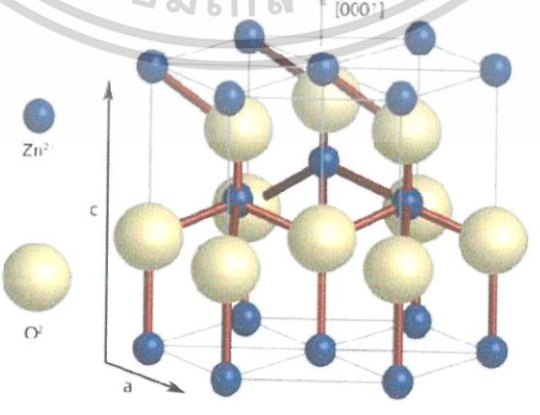
2.1.1 ข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้น

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบ II-IV ที่มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ และยังมีพลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอนประมาณ 60 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้พบสมบัติเพียร์โซอิเล็กทริก เป็นวัสดุปลอดสารพิษที่มีราคาถูก ความหลากหลายทางโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์สามารถทำให้โครงสร้างเชิงอิเล็กทรอนิกส์เจริญเติบโตขึ้นได้ ซิงค์ออกไซด์จึงเป็นวัสดุที่มีความสำคัญทางเทคโนโลยีในปัจจุบันอย่างมาก มีการนำไปใช้งานในอุปกรณ์จำพวก Optoelectronic เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell), อุปกรณ์เปล่งแสง (LED), ทรานซิวเซอร์ฟิล์มบางโปร่งแสง เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้ได้รับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์คลื่นเสียงบนพื้นผิว (SAW) โครงสร้างระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์ จึงถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในระดับนาโน [9]

คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้ที่มีความน่าสนใจของซิงค์ออกไซด์ ทำให้เกิดความสนใจในการศึกษารูปแบบฟิล์มบางและโครงสร้างในระดับนาโน

2.1.2 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ในธรรมชาติจะมีโครงสร้างผลึกในรูปแบบ Wurtzite ซึ่งอยู่ใน Space Group P63mc โดยโครงสร้างแบบ Wurtzite นั้นจะมีลักษณะเป็นโครงตาข่ายหกเหลี่ยม ในบางไอออน Zn^{2+} จะมีพันธะแบบ Tetrahedral เชื่อมกับไอออน O^{2-} สี่ตัว ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1 ในโครงสร้างนี้ซิงค์ (Zn) ที่จัดเรียงตัวแบบ (0001) และออกซิเจน (O) ที่จัดเรียงตัวแบบ (0001) เป็นลักษณะแบบ Polar Faces ในขณะที่ Non-polar faces



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ ZnO [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแบบ (1120) และ (1010) ซึ่งมีจำนวนอะตอมซิงค์และอะตอมออกซิเจนจำนวนเท่ากัน ระนาบที่ตั้งฉากกับแกน C ถูกเรียกว่า ระนาบ Basal ดังนั้นจึงเกิดความสมมาตรของขั้วตลอดแกนหกเหลี่ยม ด้วยเหตุนี้เองทำให้เกิดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกในซิงค์ออกไซด์และเป็นบทบาทสำคัญในการเติบโตของโครงผลึก การเชื่อมต่อกันแบบ Tetrahedral ของซิงค์ออกไซด์ แสดงถึงการเกิดพันธะไฮบริไดซ์โควาเลนซ์แบบ sp^3 แต่พันธะ Zn-O ที่มีลักษณะเป็นพันธไอออนิกที่แข็งแรง ทำให้ซิงค์ออกไซด์ประพฤติตัวเหมือนพันธะโควาเลนซ์และพันธะไอออนิก พารามิเตอร์ของแลคทิซของหน่วยเซลล์หกเหลี่ยมนี้ คือ a = 3.2495 A และ c = 5.2069 A [10]

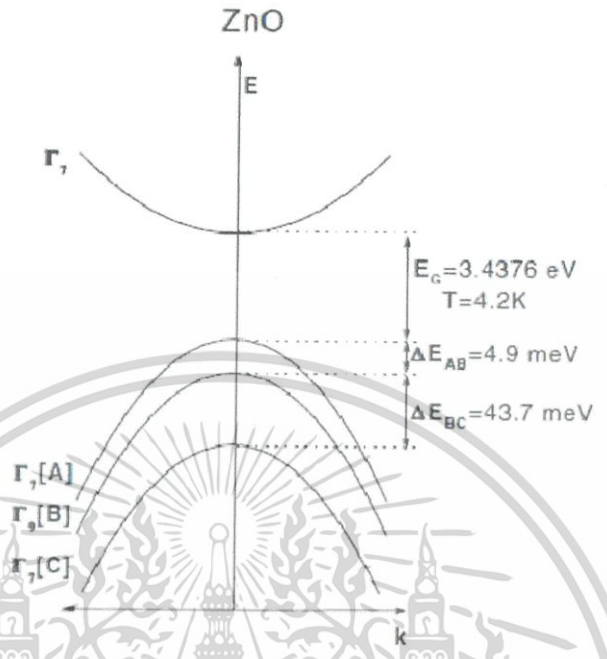
2.1.3 ข้อบกพร่องและความไม่บริสุทธิ์ของซิงค์ออกไซด์

ผลึกซิงค์ออกไซด์มีข้อบกพร่องในบางจุดกำเนิดซึ่งทำให้ส่งผลต่อสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวสารเอง ข้อบกพร่องเหล่านี้สร้างสถานะอิเล็กทรอนิกส์ในช่องว่างแถบพลังงานที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการเปล่งแสง เนื่องจากผลึกซิงค์ออกไซด์ที่เจริญเติบโตมักถูกพบว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n ซึ่งแสดงให้เห็นทฤษฎีของช่องว่างทั้งออกซิเจนและซิงค์ที่มีพลังงานการฟอร์มตัวที่สูงในซิงค์ออกไซด์ชนิด n และยังมีระดับการให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ลึกกว่าทั่วไป ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่าทั้งช่องว่างของออกซิเจนและจุดกำเนิดซิงค์มีอยู่และสามารถวัดค่าได้ หลังจากนั้น Van de Walle ได้เสนอว่าไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่อยู่เบื้องหลังในซิงค์ออกไซด์ ที่พบได้ในขณะการเจริญเติบโตของผลึกซิงค์ออกไซด์ ธาตุในหมู่ที่ 3 พวก Al, Ga และ In เป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ไม่บริสุทธิ์แก่ซิงค์ออกไซด์ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนซิงค์ได้โดยที่มีความเข้มข้นดีกว่า 10^{20} cm^{-3}

การค้นหาซิงค์ออกไซด์ชนิด p ที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่สูงยังคงเป็นพื้นฐานของงานวิจัยในปัจจุบัน ซึ่งได้มีการคาดการณ์ในทางทฤษฎีว่าลิเทียมสามารถแทนที่ซิงค์ได้ ลิเทียมซิงค์และโซเดียมสามารถแทนที่ซิงค์ได้ และยังพบว่าโซเดียมซิงค์สร้างระดับการรับอิเล็กตรอนได้ในแบบตื้น ๆ แต่ไม่ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้าในระดับที่สูงในซิงค์ออกไซด์ชนิด p นอกจากนี้ N, P, As และ Sb ถูกใช้โดยการเจือเพื่อให้แสดงสมบัติเป็น n-type [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 โครงสร้างพันธะของซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 2.2 แผนภาพระดับชั้นพลังงานของซิงค์ออกไซด์ ที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของแถบวาเลนซ์ไปสู่ 3 ชั้นย่อย A, B และ C เนื่องจากถูกจับคู่ระหว่างการเคลื่อนที่ชั้นผลึกและการหมุนของออบิทัล [12]

แผนภาพชั้นทางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับซิงค์ออกไซด์แบบ Wurtzite ถูกแสดงดังรูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงขอบชั้นวาเลนซ์ที่ค่าสูงสุดและขอบชั้นคอนดักชันที่ค่าต่ำสุด ที่ k = 0 แสดงให้เห็นว่าซิงค์ออกไซด์มีลักษณะเป็นเซมิคอนดักเตอร์ที่เป็นแบบช่องว่างแถบพลังงานตรง (Direct Bandgap) มันได้ถูกพบในการทำการทดลองระหว่างแรงหมุนของออบิทัลและการเคลื่อนที่ของพื้นที่โครงผลึก พันธะวาเลนซ์ของซิงค์ออกไซด์เคลื่อนที่ขึ้นไปได้ถึง 3 ชั้นย่อย A, B, C ในระดับชั้นพลังงานหลัก แสดงในรูปที่ 2.2 ชั้นย่อย A และ C ของชั้นวาเลนซ์ถูกเป็นที่ทราบกันดีในชื่อความสมมาตรของ Γ_7 และกึ่งกลางชั้นย่อย B ถูกเรียกว่า ความสมมาตรของ Γ_9 ที่ 4.2 K พลังงานของช่องว่างแถบพลังงานของซิงค์ออกไซด์ คือ 3.43 eV [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 คุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ [13]

Parameter	Unit	Details
E_g	eV	3.4 (Direct)
Lattice	-	Hexagonal
Structure	-	Wurtzite
a, c	nm	0.325, 0.5207
Density	$g\ cm^{-1}$	5.67
Thermal Conductivity	$Wm^{-1}K^{-1}$	69 (Parallel) 60 (Perpendicular)
Thermal Expansion	$10^{-6}/K$	2.92 (Parallel) 4.75 (Perpendicular)

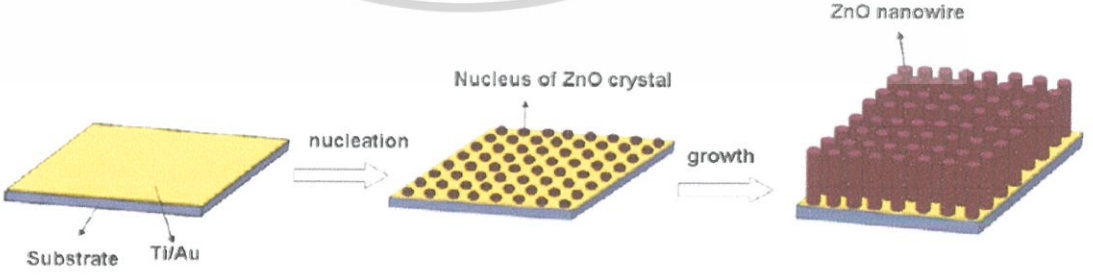
ตารางที่ 2.1 เป็นแสดงถึงรายการของคุณสมบัติที่สำคัญของซิงค์ออกไซด์ เราสามารถสังเกตได้ว่าสารกึ่งตัวนำออกไซด์จะมีแถบระดับชั้นพลังงานที่กว้างมากกว่า 3.3 eV เป็นเหตุให้สามารถเกิดการส่องผ่านของแสงสำหรับความยาวคลื่นที่มากกว่า 360 นาโนเมตร และดังนั้นค่าของสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์จะแสดงความเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความสัมพันธ์กับความเค้นและความเครียด [13]

2.2 การสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

ก่อนหน้านี้ มีรายงานจำนวนมากที่เกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่มีความหนาแน่นสูง รวมไปถึงวิธีการ Metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD), Pulsed-laser deposition, Chemical vapor transport, Electrode-position และ Hydrothermal ถึงแม้ว่าสามวิธีการแรกให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง โครงสร้างผลึกเดี่ยวขณะที่ความยาวเพิ่มขึ้นหลายไมครอน แต่ก็มักจะต้องใช้พื้นผิวที่เป็นผลึกเดี่ยวและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงและไม่เหมาะกับฐานรองรับอินทรีย์ที่ใช้กับอุปกรณ์แบบยืดหยุ่นได้ กระบวนการ Electrodeposition เป็นกระบวนการที่ง่ายแก่การสร้างเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่บริสุทธิ์ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ฐานรองรับต้องนำไฟฟ้า กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจึงเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจาก ในกระบวนนี้จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำ (<350 องศาเซลเซียส) และสามารถปรับขนาดได้ Xu และคณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอรายงานล่าสุดเกี่ยวกับกระบวนการ Liquid-Phase สำหรับการเจริญเติบโตของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนบนฐานรองรับที่มีต้นกำเนิดซิงค์ออกไซด์อยู่ พวกเขาสามารถได้รับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนความสูง 30 ไมโครเมตร ด้วยการนำฐานรองรับเข้าสู่อ่างของสารละลายทุก ๆ 3.5 ชั่วโมง และอัตราการเติบโตสูงถึง 4.5 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง ใน 2 ชั่วโมงแรก การสังเคราะห์เส้นลวดระดับนาโนก็ยังถูกนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์นี้ก็ยังปรากฏให้เห็น อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีข้อจำกัด คือ เส้นลวดนาโนจะรวมกันที่บริเวณโคนต้น ส่งผลให้สูญเสียพื้นที่ผิวหน้าสำหรับการดูดซับ อีกทางหนึ่ง คือ กระบวนการไม่ใช้สารตั้งต้นสำหรับการปลูกเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งสามารถสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้หลายประเภทบนฐานรองรับที่เรียบ (พอลิเมอร์, กระจก, สารกึ่งตัวนำ, โลหะ) แต่ความหนาแน่นของเส้นลวดนาโนค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 75% ของพื้นผิวหน้าจะถูกปกคลุมด้วยเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน) เพื่อปรับปรุงจากข้อจำกัดทางด้านบน จึงมีการพัฒนาขึ้นงานด้วยวิธีการที่ไม่สิ้นเปลือง โดยการใช้แอมโมเนียในปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอใส่ลงไปในส่วนประกอบของสารละลายที่จะใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ซึ่งจะทำให้เราได้ความหนาแน่นที่สูง และได้เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนในแนวตั้งบนฐานรองรับ ไม่เพียงแต่สามารถสังเคราะห์เส้นลวดนาโนที่มีความสูงมากกว่า 10 ไมโครเมตร ภายใน 24 ชั่วโมง โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสารละลาย แต่ยังให้ผลของความหนาแน่นของเส้นลวดสูงถึง 100% ปกคลุมทั่วบริเวณผิวหน้า โดยปราศจากการรวมกันที่โคน จากรูปที่ 2.3 แสดงการปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน การไม่ใช้ฐานรองรับที่มีสารตั้งต้นซิงค์ออกไซด์ นิวคลีอายของผลึกซิงค์ออกไซด์จะถูกฟอร์มตัวบนฐานรองรับฟิล์มบางทองที่มีความหนาแน่นสูงด้วยการใช้ส่วนประกอบของแอมโมเนียในปริมาณที่เหมาะสมในปริมารสารละลายทั้งหมด นอกจากนี้ นิวคลีเอชันที่เป็นเนื้อเดียวกันสามารถยับยั้งได้ด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนของแอมโมเนียและซิงค์ออกไซด์ไอออน ดังนั้น ในที่สุด ความหนาแน่นของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนในแนวตั้งก็สามารถระบุค่าที่แน่นอนได้ ในวิธีการนี้ ความหนาแน่นเส้นลวด อัตราส่วนและสัณฐานวิทยายังสามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ใช้ เช่น ความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลา ดังนั้นบริเวณการเกิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์สามารถกำหนดได้ด้วยวิธีการลิโทกราฟี สุดท้ายนี้สามารถแสดงการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์เพื่อใช้ในอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่มีการหลอมรวมลงไปที่โคนต้น จะพบว่าอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้นมีแรงดันขาออกสูงกว่าถึงสองเท่าและยังสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ เช่น อุปกรณ์ Optoelectronic ขั้นสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนบนฐานรองรับฟิล์มบางทอง [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(CH_2)_6N_4 + 6H_2O \leftrightarrow 4NH_3 + 6HCHO \quad (2.1)$$

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_3 \cdot H_2O \quad (2.2)$$

$$NH_3 \cdot H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^- \quad (2.3)$$

$$Zn^{2+} + 2OH^- \leftrightarrow Zn(OH)_2 \quad (2.4)$$

$$Zn(OH)_2 \rightarrow ZnO + H_2O \quad (2.5)$$

กระบวนการเจริญเติบโตของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนสามารถควบคุมผ่านปฏิกิริยาเคมีทั้ง 5 ปฏิกิริยาตามที่แสดงด้านบน [15] ปฏิกิริยาทั้งหมดจะอยู่ในสภาวะสมดุลและถูกควบคุมด้วยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา เช่น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น, อุณหภูมิในการเจริญเติบโต, และเวลาในการเจริญเติบโต เพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยานั้นสามารถไปข้างหน้าหรือย้อนกลับได้ ปกติแล้ว ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะกำหนดความหนาแน่นของเส้นลวดระดับนาโน อุณหภูมิและเวลาในการเจริญเติบโตจะควบคุมลักษณะทางสัณฐานวิทยาและอัตราส่วนของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน [15]

2.3 การนำไฟฟ้าในวัสดุนาโน

กลไกและพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของวัสดุนาโน [16] สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 การกระเจิงบนพื้นผิวหน้า

การนำไฟฟ้าในวัสดุจำพวกโลหะหรือการนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิกสามารถอธิบายได้จากการกระเจิงของอิเล็กตรอนจำนวนมาก และผลรวมของค่าสภาพความต้านทาน (ρ_T) ของโลหะการรวมตัวกันของการกระเจิงแบบอิสระ ที่รู้จักกันในชื่อว่า กฎของแมททีเซน (Matthiessen's Rule)

$$\rho_T = \rho_{Th} + \rho_D \quad (2.6)$$

โดย ρ_{Th} คือ ค่าสภาพต้านไฟฟ้าเชิงความร้อน และ ρ_Dเป็นสภาพต้านไฟฟ้าจากการบกพร่องของผลึก เช่น การชนกันของอะตอมด้วยโฟนอนถูกทำให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งแล็คทิซที่จุดสมดุลที่เป็นแหล่งกำเนิดของความร้อนหรือโฟนอน ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในลักษณะของเส้นตรง หากกล่าวถึงอะตอมที่ไม่บริสุทธิ์ จุดบกพร่อง เช่น ช่องว่างระหว่างอะตอม และลักษณะของเกรนจะทำลายศักย์ทางไฟฟ้าของแล็คทิซและส่งผลกระทบต่อการกระเจิงของอิเล็กตรอน ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าบกพร่องสามารถแบ่งแยกไปสู่ สภาพต้านทานที่ไม่บริสุทธิ์ สภาพต้านทานไฟฟ้าของความบกพร่องแล็คทิซ และสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานไฟฟ้าของขอบเกรน การพิจารณาสภาพต้านทานไฟฟ้าก็เป็นส่วนหนึ่งของระยะปลอดการชนของอะตอม กฎของแมททิเซ็นสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.7

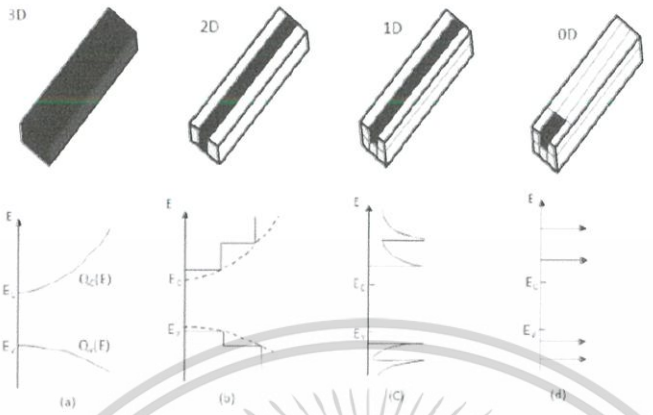
$$\frac{1}{\lambda_T} = \frac{1}{\lambda_{Th}} + \frac{1}{\lambda_D} \tag{2.7}$$

λ_T จะเป็นความยาวเคลื่อนรวมที่หลากหลายระหว่าง 10-100 นาโนเมตร, λ_{Th} คือ ความยาวคลื่นขณะกระตุ้นด้วยความร้อน และ λ_T คือ ความยาวคลื่นที่มาจากการบกพร่องของผลึก การลดลงของมิติของวัสดุจะมีผลกระทบสองอย่างที่เกี่ยวกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า หนึ่งคือ การเพิ่มขึ้นของผลึกที่สมบูรณ์หรือการลดลงของจุดบกพร่อง อย่างไรก็ตาม การกระเจิงที่บกพร่องสร้างการสนับสนุนให้กับสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่อุณหภูมิห้อง และด้วยเหตุนี้ การลดลงของข้อบกพร่องจะเป็นอิทธิพลเล็ก ๆ บนสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งจะไม่ค่อยมีคนสังเกตเห็น อีกประการหนึ่งคือการสร้างให้เกิดการรวมตัวเพิ่มเติมเพื่อค่าสภาพต้านทานอันเนื่องมาจากการกระเจิงของพื้นผิวหน้า ซึ่งถือว่าเป็นบทบาทสำคัญในการกำหนดค่าสภาพต้านทานทั้งหมดของวัสดุที่มีขนาดในระดับนาโน ถ้าระยะการปลอดการชนของอิเล็กตรอน λ_S เนื่องจากการกระเจิงของพื้นผิวหน้ามีขนาดเล็กที่สุด จึงจะสามารถเป็นตัวกำหนดค่าสภาพต้านทานทั้งหมดได้

$$\frac{1}{\lambda_T} = \frac{1}{\lambda_{Th}} + \frac{1}{\lambda_D} + \frac{1}{\lambda_S} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การเปลี่ยนโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ [16]

ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 ด้านบน การลดมิติของวัสดุที่ต่ำกว่าขนาดวิกฤต เช่น ความยาวคลื่นอิเล็กตรอนของ de Broglie จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ นำไปสู่การเกิดช่องว่างแถบพลังงานที่มีวงกว้างขึ้นและไม่ต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยทั่วไปก็จะส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลง เส้นลวดนาโนที่เป็นโลหะบางชนิดอาจได้รับการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้กลายเป็นสารกึ่งตัวนำเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงต่ำกว่าค่าปกติ และเส้นลวดกึ่งตัวนำอาจกลายเป็นฉนวนก็ได้ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดจากผลของขนาดควอนตัม ซึ่งก็คือการเพิ่มขึ้นของระดับพลังงานเมื่อขนาดของวัสดุมีค่าต่ำกว่าขนาดปกติ เช่น ผลึกของเส้นลวดบิทมัสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 52 นาโนเมตร และสภาพต้านทานของเส้นลวดบิทมัสขนาด 40 นาโนเมตร ถูกรายงานว่าลดลงเนื่องจากการลดลงของอณูหภูมิ

2.4 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน (Triboelectric Nanogenerator)

กระบวนการกำเนิดกระแสไฟฟ้าเป็นสิ่งที่เราพบได้บ่อยที่สุดในชีวิตประจำวัน ซึ่งโดยปกติแล้วการกำเนิดกระแสไฟฟ้านั้นเป็นการนำพลังงานที่ไม่ใช้แล้วมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า จึงมีการคิดค้นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานในระดับนาโน ซึ่งใช้วัสดุอินทรีย์แปลงพลังงานเชิงกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และผลของการกำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน มีพื้นฐานมาจากปรากฏการณ์ที่ผิววัสดุหนึ่งจะสร้างประจุไฟฟ้าหลังจากเกิดการเสียดสีกับผิวของอีกวัสดุหนึ่งซึ่งเป็นที่ทราบกันดีมายาวนานกว่า 1000 ปี แม้ว่านี่จะเป็นหนึ่งในสิ่งที่อยู่ใกล้ตัวเราที่ทุกคนพบได้ในชีวิตประจำวัน แต่กลไกการทำงานของอุปกรณ์นี้ก็ยังเป็นที่ถูกศึกษาอยู่ตลอดมา โดยทั่วไปเชื่อกันว่าปรากฏการณ์นี้ใช้หลักการของวัสดุสองชนิดที่นำผิวหน้าของทั้งสองมาสัมผัสกัน หลังจากนั้นจะเกิดพันธะทางเคมีขึ้นระหว่างส่วนของผิวหน้าของวัสดุทั้งสองชนิดที่เรียกว่า แรงการยึดเกาะ และประจุจะเริ่มเคลื่อนตัวจากวัสดุหนึ่งไปยังวัสดุอื่น ๆ เพื่อทำให้ค่าศักย์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) มีค่าที่เท่ากัน ประจุที่ถูกส่งผ่านข้ามวัสดุไปอาจเป็นอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออน หรือโมเลกุลก็ได้ เมื่อทำการแยกพิจารณา พบว่าพันธะของอะตอมบางพันธะมีแนวโน้มที่จะกักเก็บอิเล็กตรอนให้คงไว้ และบางพันธะมีแนวโน้มที่จะปล่อยอิเล็กตรอนออกจากพันธะอาจทำให้เกิดการผลิตประจุของอุปกรณ์นี้บนบริเวณผิวหน้าของพื้นผิววัสดุ นอกจากนี้การเกิดประจุบนผิวหน้าของอุปกรณ์ไดอิเล็กทริกสามารถเป็นแรงในการผลักอิเล็กตรอนในขั้วไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปมาและทำให้เกิดความสมดุลของค่าศักย์ไฟฟ้าได้

2.4.1 หลักการของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน

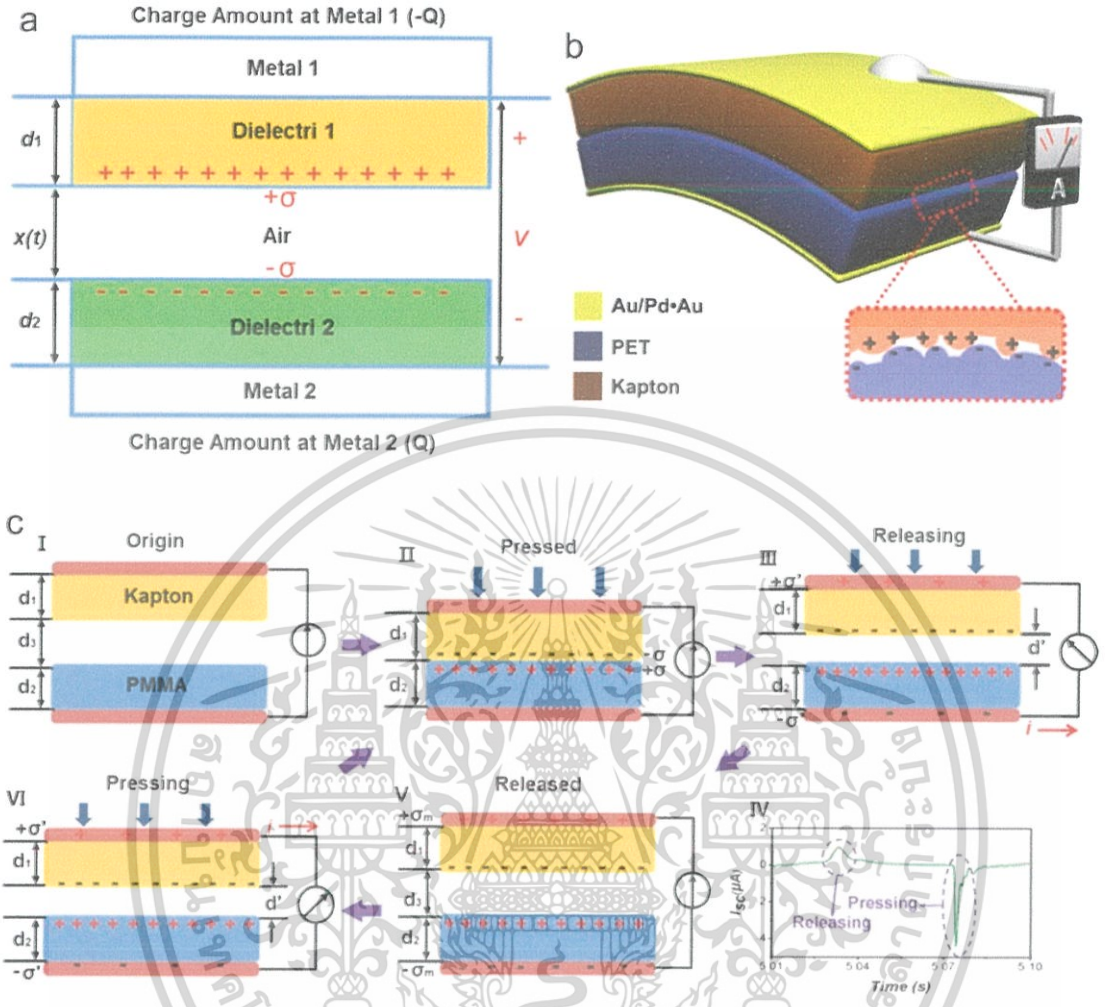
กระบวนการสร้างประจุจากการเสียดสี (Triboelectrification) ที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายทั่วไปในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งเป็นหนึ่งในหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน โดยใช้การสร้างค่าความเป็นประจุแบบโพลาไรซ์ (Polarization) อุปกรณ์นี้มักประกอบไปด้วยวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกัน และนำมาประกบเข้าหากัน เมื่อวัสดุทั้งสองถูกประกบเข้าหากันจะทำให้มีการสัมผัสกันของผิวหน้าวัสดุทั้งสองชนิด ส่งผลให้ค่าประจุไฟฟ้าสถิตของทั้งสองวัสดุจะเริ่มปรากฏขึ้นเนื่องจากการสัมผัสกันทางไฟฟ้า นอกจากนี้ ด้านหลังของวัสดุที่จะเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้า จะเป็นตัวช่วยให้ประจุสามารถเคลื่อนตัวระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองชนิดผ่านวงจรภายนอกและอยู่ภายใต้ค่าความต่างศักย์ที่ถูกป้อนให้กับวัสดุที่ถูกแยกตัวออกจากกัน ประจุที่ถูกส่งผ่านจะถูกกำหนดเป็นตัว Q ระยะห่างของวัสดุที่แยกตัวออกจากกันจะมีผลต่อความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นอันที่ซึ่งสามารถกำหนดเป็นตัว $V_{OC}(x)$ ได้ เนื่องจากไฟฟ้าสถิตและอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานมักแสดงพฤติกรรมของการเก็บประจุที่ถูกกำหนดเป็นตัว C ความสัมพันธ์ระว่าง V-Q-x สามารถแสดงตามสมการที่ 2.9 [2]

$$V = -\frac{1}{C(x)}Q + V_{OC}(x) \tag{2.9}$$

ภายใต้สภาวะลัดวงจร (Short-Circuit | SC) ประจุจะเปลี่ยนแปลงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อชดเชยความแตกต่างของความต่างศักย์ สมการที่ 2.10 สามารถใช้เพื่อแสดงการอธิบายสภาวะนี้ได้ [3]

$$0 = -\frac{1}{C(x)}Q_{SC}(x) + V_{OC}(x) \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 (a) โมเดลตามทฤษฎีสำหรับโหมด ไดอิเล็กทริก-ไดอิเล็กทริก [4], (b) โครงสร้างอุปกรณ์ของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน [5], (c) กลไกการทำงานเบื้องต้นของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน [6]

2. โหมดการสัมผัสและแยกออกในแนวตั้ง (Vertical Contact-Separation) เป็นโหมดการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานพื้นฐานขั้นแรก ซึ่งขึ้นอยู่กับการสลับกันระหว่างเงื่อนไขการสัมผัสและเงื่อนไขการแยกตัวของทั้งสองวัสดุ ในโหมดนี้จะมีลักษณะเป็นไดอิเล็กทริค-ไดอิเล็กทริค และ ตัวนำ-ไดอิเล็กทริค สำหรับวัสดุที่แตกต่างกัน ภาพที่ 2.5a แสดงให้เห็นถึงทฤษฎีโมเดลสำหรับลักษณะ ไดอิเล็กทริค-ไดอิเล็กทริค รวมทั้งชั้นโลหะทั้ง 2 ชั้นและแผ่นไดอิเล็กทริค [4] แผ่นไดอิเล็กทริควางแบบหน้าชนหน้า และมีความหนาแทนด้วย d_1 และ d_2 ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กทริคของแผ่นเป็น ε_{r1} และ ε_{r2} ชั้นโลหะถูกสร้างขึ้นบนด้านหลังของแผ่นด้วยวิธีการเคลือบ ในส่วนของแรงเชิงกล ระยะทาง (x) ระหว่างชั้นทั้ง 2 ชั้น สามารถปรับค่าได้ เมื่อวัสดุไดอิเล็กทริค 2 ชนิดสัมผัสซึ่งกันและกัน สมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้ทราบค่าของประจุฝั่งตรงข้ามที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวชั้นในของชั้นไตรโบอิเล็กทริคทั้งสอง เมื่อชั้นทั้งสองแยกตัวออกจากกัน ความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะผลักดันให้อิเล็กตรอนไหลภายใต้สภาวะลัดวงจร มีความหนาแน่นการเหนี่ยวนำประจุเชิงพื้นที่ (σ) ตามสมการที่ 2.11 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma' = \frac{\sigma x(t)\varepsilon_{\gamma 1}\varepsilon_{\gamma 2}}{d_1\varepsilon_{\gamma 2} + x(t)\varepsilon_{\gamma 1}\varepsilon_{\gamma 2} + d_2\varepsilon_{\gamma 1}} \quad (2.11)$$

หลักการของโมเดลแบบ ตัวนำ-ไดอิเล็กทริค เป็นหลักการที่คล้ายคลึงกับโมเดลแบบ ไดอิเล็กทริค-ไดอิเล็กทริค ความแตกต่างหลัก ๆ คือ หนึ่งในแผ่นไดอิเล็กทริคถูกแทนที่ด้วยชั้นตัวนำไฟฟ้า ชั้นตัวนำไฟฟ้าสามารถถือได้ว่าเป็นชั้นไตรโบอิเล็กทริคชั้นบนสุดและเป็นชั้นขั้วไฟฟ้าบนสุดเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับโมเดลแบบ ตัวนำ-ไดอิเล็กทริค แล้ว ประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในโมเดลแบบ ตัวนำ-ไดอิเล็กทริค มีค่าต่ำกว่า เนื่องมาจากผลของการคัดกรองไฟฟ้าสถิต อย่างไรก็ตาม โมเดลแบบ ตัวนำ-ไดอิเล็กทริค เป็นไปได้มากกว่าเนื่องจากมีการเคลื่อนตัวที่ง่ายกว่าของชั้นไตรโบอิเล็กทริค ตัวอย่างเช่น มันถูกใช้เพื่อดำเนินการกับพลังงานการไหลของอากาศ [7], การหมุนของล้อยาง [8], หรือฝนตก [9] นอกจากนี้ยังมีโมเดลของทฤษฎีอื่น ๆ อีก เช่น อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานแบบขั้วไฟฟ้าเดี่ยว เป็นต้น ดังนั้นอุปกรณ์นี้จึงถูกใช้เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเคลื่อนที่แบบหมุน การไหลของอากาศ และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

2.4.2 การออกแบบโครงสร้างและกลไกการทำงาน

ในปี 2012 อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานชิ้นแรกถูกสร้างขึ้นเพื่อเก็บพลังงานเชิงกล [17] รูปที่ 2.5b เป็นโครงสร้างทั่วไปแบบมาตรฐานของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานอันที่ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของโหมดการสัมผัสและแยกออก ซึ่งเป็นชั้นพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ที่ถูกนำมาประกบกันคล้ายโครงสร้างของแซนด์วิช พื้นผิวหน้าของฟิล์มมีความขรุขระในระดับนาโนอันที่สามารถสร้างแรงเสียดทานให้เกิดขึ้นได้ ฟิล์มบางทองถูกเคลือบลงบนด้านหลังของแผ่นพอลิเมอร์ เมื่อให้แรงภายนอกเข้าไปแก่พอลิเมอร์ ฟิล์มทั้งสองจะเคลื่อนตัวมาสัมผัสซึ่งกันและ เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิวในระดับนาโน ประจุที่อยู่ตรงกันข้ามจะกฎออกมาและกระจายไปทั่วผิวหน้าฟิล์มบางทั้งสองชนิด เนื่องจาก การเกิดไฟฟ้าที่บริเวณพื้นที่การสัมผัส ในขณะเดียวกัน ชั้นขั้วของรอยต่อถูกสร้างขึ้น อันที่สามารถทำให้ชั้นศักย์ภายในมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างขั้วนำไฟฟ้าทั้งสองขั้ว และอุปกรณ์นี้สามารถทำงานในสภาวะความเครียดต่ำได้ (0.13%) ถ้าการเก็บประจุและค่าความต่างศักย์ของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานถูกกำหนดให้เป็น C และ V กระแสของระบบสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.12 [17, 18]

$$I = C\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.12)$$

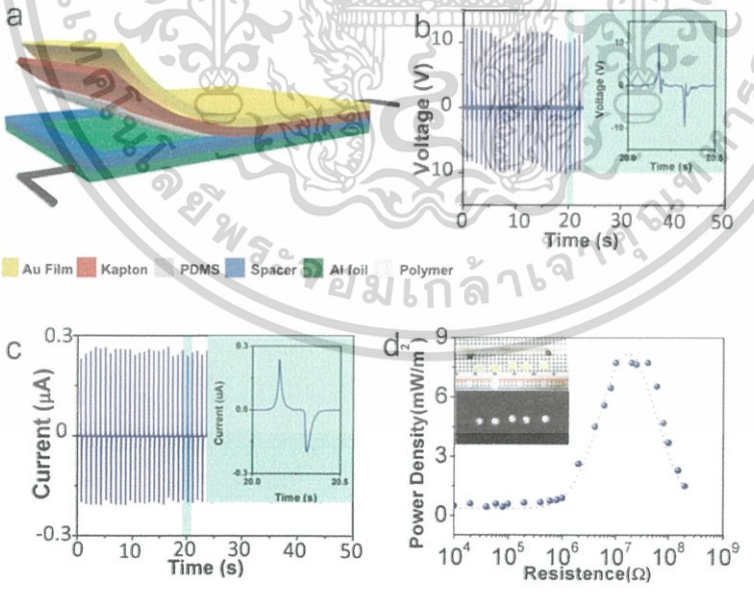
กลไกการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับประจุจากการสัมผัสและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตเป็นหลัก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5c [18] เมื่อแรงกระทำภายนอกถูกป้อนเข้ามาให้อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน รอยต่อของวัสดุไตรโบอิเล็กทริค และประจุจะเคลื่อนที่ระหว่างสองวัสดุ ในเงื่อนไขนี้ พื้นผิวของวัสดุหนึ่งที่จะครอบครองความสามารถการดึงดูดอิเล็กตรอนอย่างแข็งแรงจะสร้างประจุชนิดลบ ประจุชนิดบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะปรากฏขึ้นบนพื้นผิวอื่น ๆ (รูปที่ 2.5 c-II) เมื่อแรงภายนอกถูกปล่อยออก ความแตกต่างของความต่างศักย์เชิงอิเล็กทรอนิกส์จะถูกก่อตั้งขึ้น เพราะ การแยกตัวของวัสดุทั้งสองชนิด (รูปที่ 2.5 c-III) ความต่างศักย์วงจรนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.13 [18]

$$V_{OC} = \frac{\sigma d}{\varepsilon_0} \tag{2.13}$$

เมื่อ σ คือ ความหนาแน่นประจุ, ε_0 คือ การมีอยู่ของสุญญากาศ และ d คือ ระยะห่างของการแยกตัวตามเงื่อนไขที่พิจารณา ดังนั้นเพื่อทำให้ความต่างศักย์เข้าสู่สภาวะสมดุล ประจุจะถูกปล่อยจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง จนกว่าประจุทั้งสองฝั่งมีความสมดุลหรือมีจำนวนประจุเท่ากัน ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 c-V เมื่อแรงถูกป้อนเข้าไปอีกครั้ง ความต่างศักย์จะลดลง เนื่องจาก การลดลงของระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุ กระบวนการนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกันของการไหลกระแสภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบและค่าบวก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 c-VI ดังนั้น อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ฝั่งขาออกระหว่างการสลับไปมานี้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 c-IV โดยประโยชน์ของกระบวนการนี้ คือ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีกำลังไฟฟ้าขาออกที่สูง ซึ่งสามารถกำเนิดพลังงานจากการสั่นเชิงกล เช่น การหายใจ และอื่น ๆ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่มีความหลากหลายของแหล่งกำเนิดพลังงาน ด้วยเหตุนี้ จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาโครงสร้างอื่น ๆ ของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานนี้ เช่น ค่าการยืดหยุ่น และฐานของคานรองรับ [1, 19, 20]



รูปที่ 2.6 (a) โครงสร้างของ iTENG, (b) ความต่างศักย์ขาออกของ iTENG, (c) กระแสขาออก, (d) การแปรผันของความหนาแน่นของกำลังขาออกบนตัวต้านทาน [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ประสิทธิภาพของสัญญาณขาออก

ประสิทธิภาพของสัญญาณขาออกของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานสามารถตรวจวัดได้ด้วยการพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ คือ ความต่างศักย์ของวงจรแบบเปิด (V_{OC}), กระแสลัดวงจร (I_{SC}) และความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจุดเด่นทั่วไปของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน คือ สามารถดำเนินการภายใต้ความต่างศักย์สูง และค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ จึงสามารถอธิบายหลักการของอุปกรณ์นี้ได้ทั้งเชิงกายภาพและเชิงคณิตศาสตร์ พิจารณารูปที่ 2.6a แสดงรูปแบบของภาพประกอบของการเติบโตของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน (iTENG) ซึ่งประกอบไปด้วยฟิล์ม PDMS ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน, ฟอยล์อลูมิเนียม, ฐานรองรับด้วยแคปตอนชนิดบาง และ PET แบบยืดหยุ่น [21] ฟิล์มทองคำถูกเคลือบลงบนกระดาษด้วยกระบวนการเชิงกายภาพ เนื่องจากชั้นแคปตอนและชั้นฟิล์ม PDMS มีความยืดหยุ่น อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานจึงสามารถเปลี่ยนแรงที่เกิดขึ้นจากการสั่นไปเป็นพลังงานเชิงอิเล็กทรอนิกส์ได้ การแปลง V_{OC} ระหว่าง 0 และ 12 โวลต์ ยังถูกดำเนินการอยู่ในโหมดการสัมผัสและแยกออก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6b โดย I_{SC} จะแสดงพฤติกรรมของไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดที่ 0.25 ไมโครแอมแปร์ ที่แสดงในรูปที่ 2.6c จะพบว่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับความต้านทานภายนอก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6d จากความต้านทาน 10 โอห์ม ไปสู่ 1 เมกะโอห์ม ยังพบว่าความหนาแน่นของกำลังขาออกเพิ่มขึ้นอย่างสมดุลและค่าสูงสุด คือ 8.44 mW/m^2 เมื่อความหนาแน่นของกำลังขาออกไม่เปลี่ยนไปตามการเพิ่มขึ้นของความต้านทาน

จากพื้นฐานและหลักการการทำงานของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน จึงถือได้ว่าเป็นเรื่องยากที่จะตรวจวัดประสิทธิภาพขาออกเพื่อเป็นฐานความรู้เบื้องหลังไปสู่ความเข้าใจความแตกต่างของโครงสร้างวัสดุและโหมดการวัดวิเคราะห์ ซึ่งเมื่อไม่นานมานี้ Zi และคณะ ได้กอตั้งงานวิจัยขึ้นเป็นโมเดลการวัดผลด้วยวิธีการจำกัดวงของธาตุ และสามารถตรวจวิเคราะห์โครงสร้างนั้น ๆ ในวัสดุ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพขาออกของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน [22]

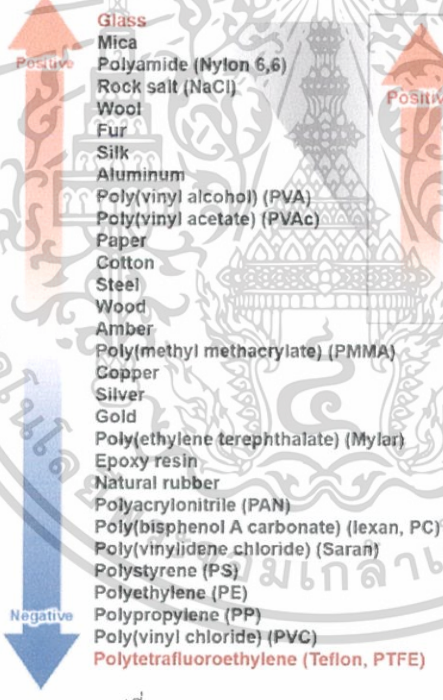
2.4.4 การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าด้วยแรงเสียดทาน

(1) การเลือกวัสดุที่นำมาใช้งาน

เพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน จึงมีวิธีการที่หลากหลายที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาประสิทธิภาพได้ อีกทั้งยังมีนักวิจัยจำนวนมากค้นพบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์จะมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ เหตุผลหลัก คือ ความแตกต่างของโครงสร้างวัสดุจะสร้างความแตกต่างของประจุไตรโบอิเล็กทริค เนื่องมาจากหลักการการถ่ายโอนประจุและโครงสร้างเชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยความหนาแน่นของประจุไตรโบอิเล็กทริคสามารถส่งผลต่อทั้งความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขาออก ดังนั้น วัสดุที่ถูกเลือกควรจะต้องสร้างประจุไตรโบอิเล็กทริคได้ง่าย และยังต้องคำนึงถึงบริเวณที่ขั้วไตรโบอิเล็กทริคของทั้งสองวัสดุควรมีความแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ จึงส่งผลให้วัสดุที่หลากหลายสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานได้ เช่น โพลีเอมายด์, PTFE, PVDF เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุหลายชนิดสามารถแสดงสมบัติของปรากฏการณ์ไตรโบอิเล็กทริคได้ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการรับหรือให้อิเล็กตรอนของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของวัสดุ โดย จอห์น คาร์ล วิล์ค ได้เผยแพร่รูปแบบของอุปกรณ์ไตรโบอิเล็กทริค ในปี ค.ศ. 1757 พิจาณาวัสดุด้านล่างของตาราง เมื่อสัมผัสกับวัสดุด้านบนของตารางจะมีแนวโน้มเป็นประจุลบมาก นอกจากการเลือกวัสดุมาใช้งานภายใต้หลักการของอุปกรณ์ไตรโบอิเล็กทริค ลักษณะบนพื้นผิวต้องสามารถปรับปรุงด้วยเทคนิคทางกายภาพได้ เช่น การสร้างลวดลายระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร เป็นต้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส พื้นผิวของวัสดุถูกปรับปรุงด้วยโมเลกุลต่าง ๆ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน ลวดนาโนหรืออนุภาคนาโน เพื่อเพิ่มการเกิดประจุจากการเสียดสี พื้นที่ผิวที่ถูกปรับปรุงสามารถเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าของพื้นผิวได้ โดยโครงสร้างของพื้นผิวสามารถเปลี่ยนไปตามลักษณะของการสัมผัสกัน ซึ่งอาจเพิ่มจำนวนประจุจากการเสียดสีให้มากขึ้นได้ นอกจากนี้ วัสดุเนื้อเดียวสามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุคอมโพสิทได้ ซึ่งสามารถเปลี่ยนกลไกการสร้างประจุจากการเสียดสีบนพื้นผิวของวัสดุได้ ดังนั้น จึงมีวิธีการที่หลากหลายในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานจากวัสดุ ซึ่งถือได้ว่าเป็นความท้าทายใหม่ที่นักวิทยาศาสตร์จะต้องทำการศึกษาต่อไป [9]



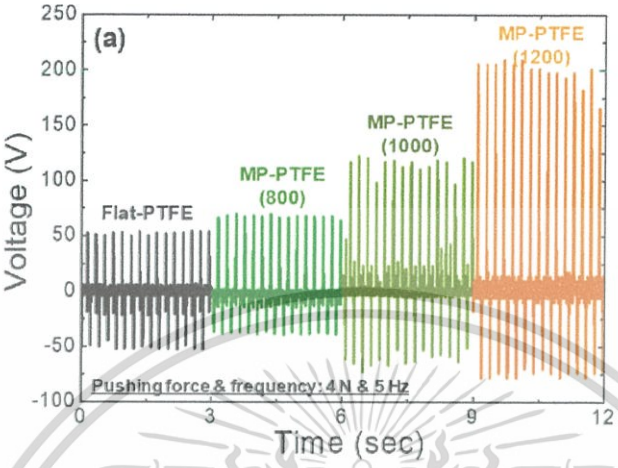
รูปที่ 2.7 Triboelectric Series [23]

(2) ผลของความถี่และแรง

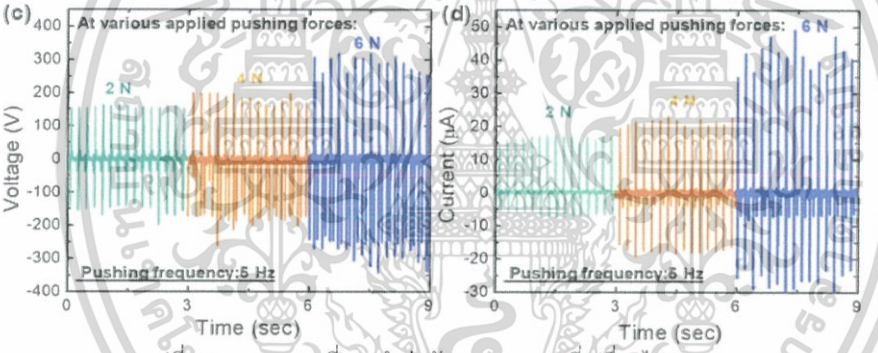
ในการป้อนแรงกระทำต่ออุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทาน ด้วยการทำให้วัสดุเกิดการโค้งงอหรือใช้การกดหลาย ๆ รอบ เมื่อความถี่ในการกระทบกับวัสดุสูงขึ้น สัญญาณขาออกจะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากภายใต้ความถี่การกดที่สูง ประจุบวกและประจุลบที่เกิดขึ้นที่พอลิเมอร์ยังไม่กลายเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะสมของประจุไฟฟ้าที่คงค้างบนขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรด เมื่อให้แรงกระทำมากยิ่งขึ้น สัญญาณขาออกก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากทำให้เกิดการเสียดสีของพื้นผิววัสดุมากขึ้น [24]



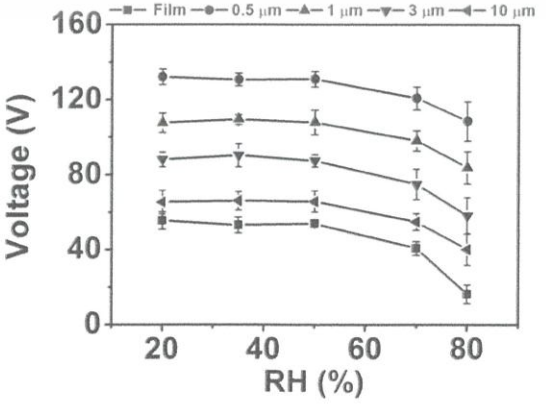
รูปที่ 2.8 ผลของการเลือกคู่วัสดุต่อสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไป [24]



รูปที่ 2.9 ผลของแรงที่กระทำต่อสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไป [24]

(3) ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นในบรรยากาศทำให้วัสดุกลายเป็น Antistatic ซึ่งลดการเกิดประจุจากไตรโบอิเล็กทริคยิ่งความชื้นมาก ประสิทธิภาพของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานจะน้อยลง แสดงในรูปที่ 2.10 เป็นผลกระทบของความถี่ที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ [6]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 ผลของความชื้นต่อสัญญาณขาออกที่เปลี่ยนไป [6]

(4) ค่าฟังก์ชันงาน (Work Function)

ค่าความแตกต่างของค่าฟังก์ชันงานระหว่างวัสดุสองชนิดสามารถเปลี่ยนความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวได้ เมื่อค่าความแตกต่างของฟังก์ชันงานเพิ่มขึ้น [25] การเพิ่มสัญญาณขาออกของอุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าจากแรงเสียดทานก็เพิ่มขึ้น ปัจจัยข้อนี้จึงสอดคล้องกับการเลือกวัสดุ

2.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (Conductive Atomic Force Microscopy: CAFM)

2.5.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม หรือ AFM เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันทั้งในงานทางด้านวัสดุศาสตร์และชีววิทยา ในทางวัสดุศาสตร์ เทคนิคนี้ใช้ในการศึกษาโครงสร้างสัณฐานของวัสดุชนิดต่าง ๆ (รวมทั้งวัสดุเชิงประกอบ) ตลอดจนถึงสมบัติทางพื้นผิว เช่น ความเสียดทาน (Friction) ความแข็งตึง (Stiffness) ค่ามอดูลัส (Modulus) และการยึดติด (Adhesion) เป็นต้น ในปัจจุบัน เทคนิคนี้มักจะเรียกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning Probe Microscopy; SPM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ถือกำเนิดในปี 1982 โดยผู้คิดค้น คือ Binning ร่วมกับ Rohrer, Gerber และ Weibel ซึ่งขณะนั้นทำงานอยู่ที่บริษัท IBM เมืองซูริก ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ เทคนิคที่คิดค้นขึ้นเรียกว่า Scanning Tunneling Microscopy (STM) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวของฮาร์ดดิสก์ โดย Binnig ได้รับรางวัลโนเบลเมื่อปี 1986 สาขาฟิสิกส์ และในปีเดียวกันนี้ เขาและทีมงานได้พัฒนา STM ให้กลายเป็น AFM เพื่อให้สามารถใช้วิเคราะห์วัสดุอื่นที่ไม่นำไฟฟ้าได้อีกด้วย

2.5.1.1 หลักการทำงาน

เครื่อง AFM ใช้หลักการการทำงาน คือ การวัดอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัดกับพื้นผิว โดยการวัดมี 3 โหมดหลัก ได้แก่ Contact Mode (CM), Non-contact Mode (NCM), และ Tapping Mode (TM) ทั้งนี้เครื่อง AFM ของบางบริษัทอาจเรียก Tapping Mode ว่า Dynamic Mode หรือ Contact Intermittent Mode ส่วนประกอบที่สำคัญแสดงในรูปที่ 2.11 ประกอบด้วยลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปที่ปลายของหัวสแกนตรงตำแหน่งเข็มวัด เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจังหวะของการเคลื่อนที่ของเข็มเมื่อเกิดแรงกระทำ (Attractive and Repulsive Interaction) กับพื้นผิว ลำแสงที่สะท้อนจากหัวสแกนนี้จะวิ่งตรงไปยังเป้าตรวจจับแบบโฟโต้ไดโอด (Photodiode Detector) แล้วแปลงข้อมูลสัญญาณนี้เป็นรูปภาพพื้นผิวและสมบัติต่าง ๆ ของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดแบบ NCM ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวที่มีสภาพเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสามารถวัดโดยไม่ใช้การสัมผัสระหว่างหัวเข็มและพื้นผิว สำหรับการวัดแบบ CM เป็นโหมดที่ใช้วัดรูปทรงลักษณะของพื้นผิว (Topography), ความเสียดทาน (Friction), ความต้านทานต่อการขูดขีดและการสึกหรอ (Scratch and Wear Resistance), การยึดติด (Adhesion) และความแข็งตึง (Stiffness) สำหรับการวัดแบบ TM นั้น ใช้สำหรับวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวเช่นเดียวกันกับ CM และ TM สามารถลดปัญหาเรื่องการขูดขีดชิ้นงานตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับ CM นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์เฟสของตัวอย่างโดยอาศัยความแตกต่างของความแข็งตึงและมอลดูลัสของพื้นผิวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์ส่วนประกอบและการจัดเรียงตัวของโครงสร้างสัณฐานของวัสดุผสมได้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดความแตกต่างขององศาเฟส $(\Delta\Phi)$ ที่แสดงเป็นความเข้มของสีที่ปรากฏในรูปภาพที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งตึง (Stiffness) หรือค่ามอลดูลัส (Moldulus) ตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Delta\Phi = \langle S \rangle \frac{Q}{k} \propto E^* \sqrt{\langle A \rangle} \tag{2.14}$$

เมื่อ $\langle S \rangle$ = ความแข็งตึงของพื้นผิว *(Surface Stiffness)*

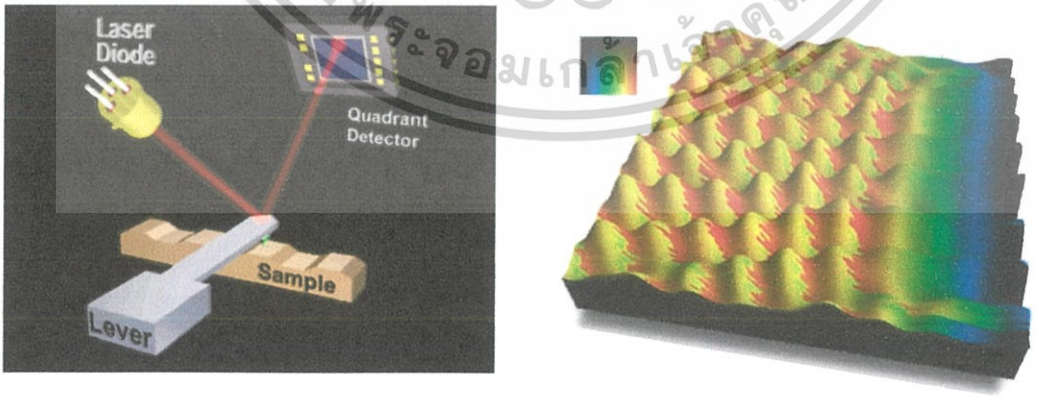
Q = อัตราส่วนคุณภาพ *(Quality Factor)*

k = ค่าคงที่ของสปริงของหัวสแกน ซึ่งขึ้นกับลักษณะเฉพาะของวัสดุ

E = ค่ามอลดูลัส

$\langle A \rangle$ = พื้นที่สัมผัสระหว่างปลายเข็มกับพื้นผิวตามลำดับ

จากสมการที่ 2.14 จะเห็นว่ายิ่งพื้นผิวมีค่ามอลดูลัสแตกต่างกันมากเท่าใดก็จะทำให้เฟสปรากฏเป็นเฉดสีต่างกันมากเท่านั้น จากข้อมูลนี้ทำให้เราสามารถวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของวัสดุที่กำลังศึกษาได้

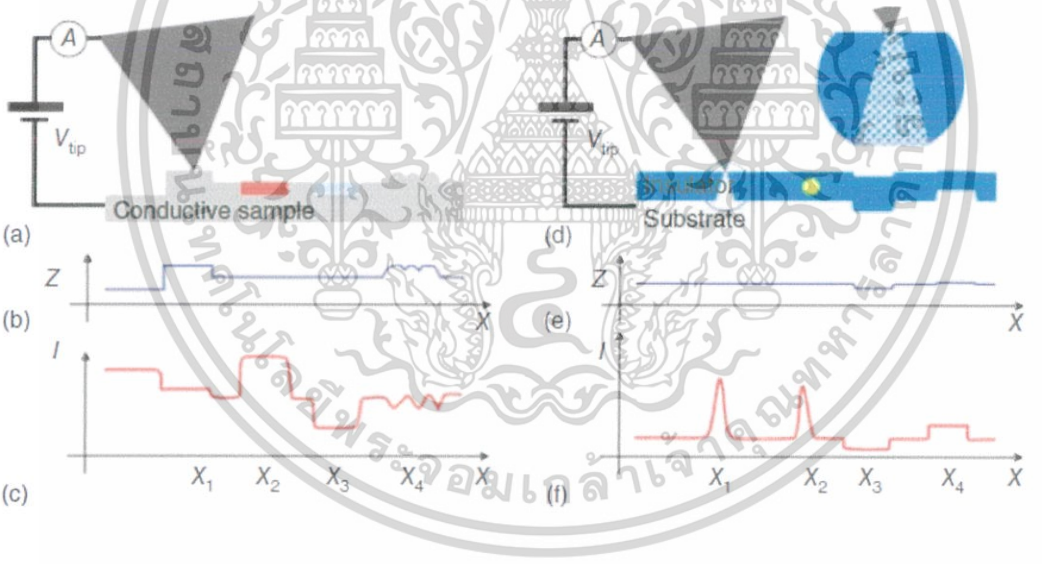


รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (ซ้าย) และการจำลองภาพ 3 มิติ จากผลของสภาพพื้นผิว (Topography) ซึ่งเป็นหนึ่งในผลที่ได้จากการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (ขวา) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

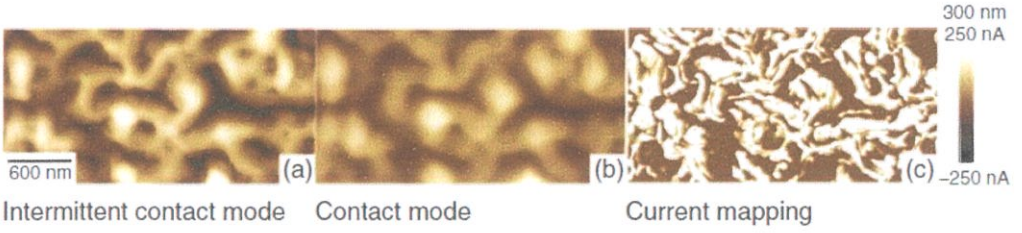
2.5.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (C-AFM)

C-AFM เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาวัสดุและคุณสมบัติทางพื้นผิวในพื้นที่บริเวณกว้าง หากมีการป้อนความต่างศักย์ (V_{tip}) เข้าไประหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม (ดังรูปที่ 2.12a, d, และลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะแสดงในรูปที่ 2.12b, e) กระแสที่ไหลจากเข็มไปยังตัวอย่าง (หรืออาจกลับกัน) และสามารถบันทึกค่าไปพร้อม ๆ กับลักษณะทางสัณฐานวิทยา ในการประยุกต์ใช้งานล่าสุด C-AFM [27-32] ถูกใช้เพื่อศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บนฟิล์มบางทอง ฟิล์มบางไททาเนียม และฐานรองรับซิลิกอน ตามลำดับ สำหรับการสร้างโครงสร้าง MOS หรือโครงสร้างสารกึ่งตัวนำที่เป็นฉนวน (MIS) ด้วยหัวเข็มชนิดนำไฟฟ้า (รูปที่ 2.12d) สำหรับค่าความต่างศักย์ที่เข็มค่ากระแสที่ถูกวัดนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.12f) สำหรับตำแหน่งที่มีสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์อ่อน ๆ และอาจมองในทางกลับกัน (รูปที่ 2.12f) จากการสแกนด้วยเข็มไปตามผิวหน้าของชิ้นงาน แผนผังการนำไฟฟ้าสามารถถูกตรวจพบได้ อีกทางเลือกหนึ่ง หัวเข็มสามารถเลือกวางตำแหน่งต่าง ๆ ได้ตามที่สนใจ และสามารถหาลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับปลายเข็มได้ จากรูปที่ 2.12c, f การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถตรวจสอบความผันผวนของพื้นที่ที่นำไฟฟ้าหรือลักษณะการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแม้ว่าไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในภาพสัณฐานวิทยา



รูปที่ 2.12 (a) การตั้งค่าการวัดสำหรับชิ้นงานนำไฟฟ้าและ (b) การแสดงส่วนสัณฐานวิทยา (c) ลักษณะบนตำแหน่ง x_2 หรือ x_3 แสดงให้เห็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด และตำแหน่ง x_4 แสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเนื่องมาจากขนาดอนุภาค (d) การตั้งค่าการวัดสำหรับการวัดชั้นฟิล์มบางและ (e) ส่วนของสัณฐานวิทยา (f) การก่อตัวของเส้นใยเกิดเป็นกระแสที่สูงที่ x_1 การนำกระแสที่ x_2 กระแสที่ต่ำลงเนื่องจากความหนาของฟิล์มที่ x_3 และกระแสที่สูงเนื่องจากความหนาของฟิล์มที่ x_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 (a) ภาพสัณฐานวิทยาของพื้นที่ขนาด 3x1.5 ตารางไมโครเมตร ที่ถูกดำเนินการด้วยโหมดแบบ Contact ด้วยหัวเข็มที่ไม่นำไฟฟ้า (b) และในโหมดแบบ Contact ด้วยหัวเข็มที่นำไฟฟ้า (c) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความละเอียดภาพ การเปรียบเทียบระหว่างภาพสัณฐานวิทยา (a หรือ b) กับแผนภาพกระแสไฟฟ้า (c) เปิดเผยลักษณะในระดับนาโนของการนำไฟฟ้าเชิงอิเล็กทรอนิกส์อันที่ไม่สามารถพบได้ในภาพสัณฐานวิทยา

ในบางกรณี ภาพกระแสไฟฟ้าแตกต่างจากภาพสัณฐานวิทยาของผิวหน้า เนื่องจาก ผลกระทบจากพื้นที่การปลดปล่อยอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่การสัมผัสเชิงกล (ส่วนที่ 2.13) จากตัวอย่าง รูปที่ 2.13 แสดงสัณฐานวิทยาและภาพกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบาง [33, 34] (รูปที่ 2.13b, c ตามลำดับ) จากการสังเกต ความละเอียดของโครงสร้างพื้นผิวหน้าในภาพกระแสไฟฟ้ามีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับภาพสัณฐานวิทยาแม้ภาพสัณฐานวิทยาจะถูกสร้างขึ้นจากเข็มชนิดไม่นำไฟฟ้าในโหมด Contact ในตำแหน่งเดียวกัน แต่ก็ยังไม่สามารถเปรียบเทียบความละเอียดได้

ในการทดลอง C-AFM ปลายสุดของหัวเข็มที่เป็นส่วนนำไฟฟ้าเป็นเพียงส่วนหนึ่งของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่สัมผัสกับตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหัวเข็มและชิ้นงานจึงมีความสำคัญมาก เนื่องจาก ส่งผลต่อความความละเอียดของข้อมูลที่ได้ และความน่าเชื่อถือในผลของการทดลอง อย่างไรก็ตามระบบของหัวเข็มและชิ้นงานก็ยังไม่ได้มีความเสถียรในการตรวจวัดที่สูงมากนัก ระหว่างการทดลอง แรงเสียดทานขนาดใหญ่และสนามไฟฟ้าอาจสร้างให้เกิดการสึกหรอของปลายเข็มและบริเวณชิ้นงาน (ส่วนใหญ่จะพบในโหมด Contact) ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาที่อาจส่งผลต่อการทดลองในส่วนอื่น นอกจากนี้ รอยต่อระหว่างเข็มและชิ้นงานก็ยังสามารถสัมผัสกับสิ่งปนเปื้อนได้

2.5.2.1 อันตรกิริยาระหว่างหัวเข็มและพื้นผิวหน้าชิ้นงาน

วิธีการที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในการประเมินพื้นที่การสัมผัสทางกายภาพระหว่างหัวเข็ม C-AFM และชิ้นงาน จะใช้ทฤษฎีการสัมผัสของ Hertz ดังสมการที่ 14 โดยพื้นที่การสัมผัส (A_c) ถูกตรวจวัดด้วยรัศมีการสัมผัส (r_c) อันที่ขึ้นอยู่กับแรงที่เข้ามาสัมผัส (F_c) รัศมีของหัวเข็ม (R_{tip}) มอดดูลัสยืดหยุ่น ($E_{1/2}$) และอัตราส่วนปัวซอง ($v_{1/2}$) ของหัวเข็มและชิ้นงาน ความขรุขระในระดับไมโครเมตรของหัวเข็มและชิ้นงานจะถูกมองข้าม [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

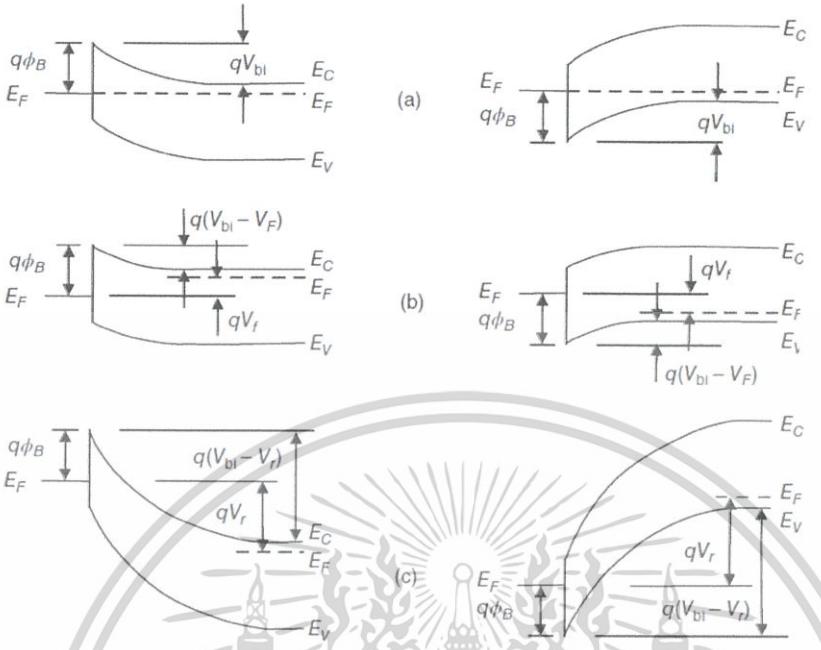
$$A_c = \pi r_c^2 = \pi \left(F_c R_{tip} \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.15)$$

พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับสมการที่ 2.15 สามารถพบได้ในงานวิจัย เนื่องจากโครงสร้างของหัวเข็มและชิ้นงานมีลักษณะของวัสดุที่ต่างชนิดกัน ซึ่งมีความหนามากกว่าสิบนาโนเมตร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าวัสดุใดมีอิทธิพลต่อความยืดหยุ่นโดยรวม [36] ดังนั้นสมมติฐานสองข้อต่อไปนี้จึงมีความเป็นไปได้ คือ 1. สมบัติเชิงกลของหัวเข็มที่ถูกเคลือบถูกกำหนดด้วยวัสดุที่ใช้เคลือบและไม่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำหัวเข็ม 2. สมบัติเชิงกลของชิ้นงานถูกอธิบายอย่างลึกซึ้งทั้งชั้นผิวหน้าหรือฐานรองรับ

2.5.2.2 หัวเข็ม C-AFM บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อหัวเข็ม C-AFM ที่เป็นโลหะถูกนำไปแตะลงบนชิ้นงานที่เป็นสารกึ่งตัวนำ รอยต่อดีพลีชันอาจฟอร์มตัวในสารกึ่งตัวนำถ้าฟังก์ชันงานของโลหะมีขนาดใหญ่กว่าค่า Electron Affinity (สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด n) หรือถ้ามันมีขนาดเล็กกว่าค่า Electron Affinity บวกด้วยช่องว่างระดับชั้นพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิด p ตามรูปที่ 2.14) รอยต่อดีพลีชันนี้จะประพฤติตัวเหมือนการสร้างไดโอดที่มีชั้นกั้นพลังงานศักย์ระหว่างหัวเข็มและด้านล่างของชิ้นงาน ถ้าความต่างศักย์ถูกป้อนเข้าไประหว่างการทำงานของ C-AFM จะเกิดขั้วเหมือนกับชั้นกั้นดีพลีชัน (ไบแอสค่าบวก) รอยต่อแบบโอห์มมิคก็จะก่อตัวเกิดขึ้น และกระแสจะเพิ่มขึ้นในลักษณะของฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเทียบกับความต่างศักย์ (ตามสมการที่ 2.16) ในทางตรงกันข้าม เมื่อป้อนความต่างศักย์ในทางตรงข้าม กระแสไฟฟ้าจะถูกครอบครองด้วยการเปล่งแบบช็อตกี้ [37] (ตามสมการที่ 2.17) ปกติทั่วไป การเปล่งแบบช็อตกี้นั้นจะอ้างตามสูตรการเปล่งแบบเทอร์มิออนิค [38] (ตามสมการที่ 2.20) ซึ่งหมายความว่ากระแสจะถูกควบคุมโดยพาหะที่ถูกกระตุ้นไปสูงเหนือกว่าชั้นกั้นพลังงานศักย์ ในขณะที่เกิดการเปล่งเทอร์มิออนิค ชั้นไดอิเล็กทริกที่ถูกเน้นด้วย E_{ox} (ตามสมการที่ 2.17) ดังนั้น ในรอยต่อของหัวเข็มและสารกึ่งตัวนำ ในทิศทางไปข้างหน้ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียล ในขณะที่ทิศทางตรงกันข้าม กระแสจะมีค่าเพียงเล็กน้อย (ตามตารางที่ 2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 รูปแบบแผนภาพระดับขั้นพลังงานของโครงสร้างสารกึ่งตัวนำโลหะ ชนิด n (ซ้าย) ชนิด p (ขวา) : (a) สมดุลความร้อน (b) ไบแอสไปข้างหน้า (c) ไบแอสย้อนกลับ [38]

ตารางที่ 2.2 กระบวนการนำไฟฟ้าขั้นพื้นฐานในรอยต่อระหว่างหัวเข็มและสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการ	สมการความสัมพันธ์	สมการ	เอกสารอ้างอิง
ไบแอสตรง	$I = I_0 \exp\left(\left(\frac{qV_r}{\eta kT}\right) - 1\right)$	(2.16)	[38]
ไบแอสกลับ	$I_0 = A_{\text{eff}} A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{q}{kT}\left(\phi_B - \sqrt{qE_m/4\pi\epsilon_s}\right)\right)$ $E_m = \sqrt{\frac{2qN}{\epsilon_s}\left(V_r + V_{\text{bi}} - \frac{kT}{q}\right)}$	(2.17)	[38]

I = กระแสไฟฟ้า, A_{eff} = พื้นที่การปลดปล่อยสัมพัทธ์, q = ประจุอิเล็กตรอน, $\emptyset_B$ = ความสูงกำแพงศักย์, A^{**} = ค่าคงที่ริชาร์ดสัน, I_0 = ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัว, η = สัดส่วนในอุดมคติ, V_{bi} = ความต่างศักย์ภายใน

ในรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่ถูกสร้างขึ้นโดยหลักการของชิ้นงานระหว่างหัวเข็มและสารกึ่งตัวนำในเครื่องมือ C-AFM ค่าของ A_{eff} จะไม่ชัดเจนเท่ากับชิ้นงานที่ใช้หลักการระหว่างหัวเข็มและโลหะในเครื่อง C-AFM ถึงแม้ว่าหลายงานจะใช้หลักการของรอยต่อช็อตกี้ของชิ้นงานระหว่างหัวเข็มและสารกึ่งตัวด้วยเครื่อง C-AFM ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปทางการเคลื่อนที่ของประจุ แต่ไม่ได้ศึกษาพารามิเตอร์ของ A_{eff} นอกจากนี้ชิ้นงานที่เป็นสารกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำจำนวนมากถูกวิเคราะห์ด้วย C-AFM (เช่น ซิลิกอน) และคาดว่าผิวหน้าจะรวมตัวเข้าด้วยกันกับชั้นออกไซด์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการกระจายทางด้านข้างและการจำกัดของกระแสในบริเวณที่ต่ำกว่าหัวเข็ม สิ่งที่น่าสนใจคือ งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ถูกตีพิมพ์ในทิศทางนี้ได้วิเคราะห์การเคลื่อนตัวของกระแสไฟฟ้าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสและความต่างศักย์ ซึ่งความไม่เท่ากันในพื้นที่ถูกตรวจวัดด้วยการใช้เข็มในการวัดวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกัน ในบริเวณอื่นของพื้นผิว แต่ก็ยังไม่สามารถรวบรวมแผนผังกระแสได้ ในหลากหลายกรณี จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถทำให้สรุปได้ว่า พารามิเตอร์ A_{eff} ยังไม่ได้มีความสำคัญมากในการวัดชิ้นงานสารกึ่งตัวนำ เนื่องจาก ตามที่ได้กล่าวไปทางด้านบน สมบัติของวัสดุและการป้อนแรงดันสามารถปรับค่าให้เหมาะสมที่บริเวณรอยต่อได้

2.5.2.3 ความแตกต่างของฟังก์ชันงานและแรงดันเริ่มต้น

ใน C-AFM การวัดค่ากระแสไฟฟ้าถูกเชื่อมเข้าหาการวัดความต่างศักย์ของหัวเข็ม (V_{tip}) อย่างไรก็ตาม หากเข็มและชิ้นงานมีความแตกต่างของฟังก์ชันงานและระดับชั้นที่เป็นบทบาทสำคัญ ซึ่งมักเป็นกรณีสำหรับ Metal oxide semiconductor (MOS) และโครงสร้างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดขึ้นอาจจะแตกต่างจากแรงดันที่เข็ม ดังนั้น การตีความที่มีความหมายของการวัด C-AFM จะต้องมีความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่าง V_{ox} และ V_{tip} สำหรับโครงสร้าง MOS (MIS) จะขึ้นอยู่กับ V_{ox} (ตามสมการที่ 2.17 และ 2.19) Frammelsberger และคณะ ได้แนะนำค่าคงที่เริ่มต้นของแรงดัน (V_{off}) สำหรับอุปกรณ์ C-AFM (สมการที่ 2.18) [36, 39] และสมการที่ 2.19 และ 2.20 ป้อนให้สำหรับชนิด p, V_{off}^{p}, และชนิด n, V_{off}^{n}, สารกึ่งตัวนำ ตามลำดับ

$$V_{ox} = V_{tip} - V_{off} = V_{tip} - (V_{FB} + V_s) \tag{2.18}$$

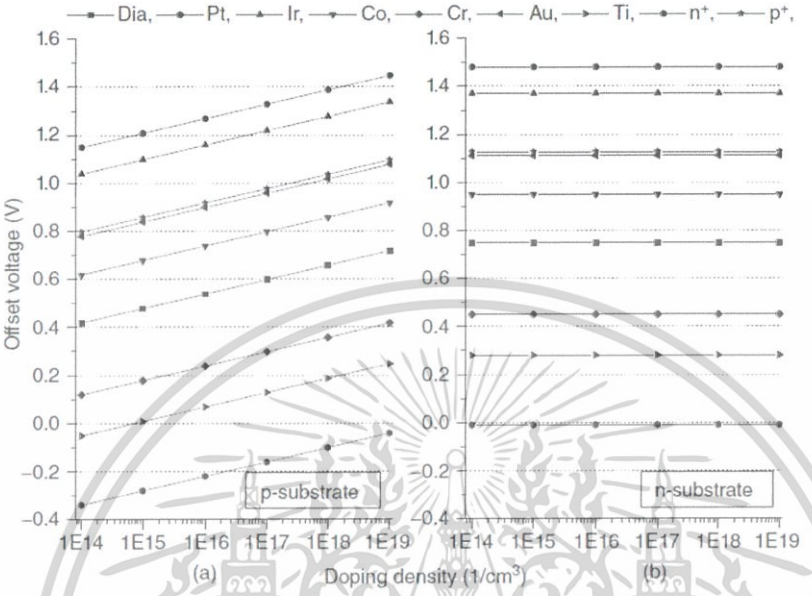
$$V_{off}^{p} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_S^{p}\right) + 2\psi_S^{p} = \phi_m - \chi - \frac{E_g}{2q} + \psi_S^{p} \tag{2.19}$$

$$V_{on}^{p} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_S^{n}\right) + \left(\frac{E_g}{2q} + \psi_S^{n}\right) = \phi_m - \chi \tag{2.20}$$

แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นประกอบไปด้วย แรงดัน Flat-band (VFB) สำหรับเงื่อนไขในอุดมคติ และแรงดันขาลงในฐานรองรับซิลิกอน (V_S) ฟังก์ชันงานของโลหะ คือ ϕ_m, ϕ_s คือ การเปลี่ยนระดับชั้นเฟอร์มิอย่างต่อเนื่อง เนื่องจาก ความเข้มข้นของสารโดป และ χ คือ Electron Affinity ของสารกึ่งตัวนำ ระดับชั้นพลังงาน E_c คือ ระดับพลังงานคอนดักชัน E_v คือ ระดับชั้นพลังงานวาเลนซ์ และ E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จากสมการ 2.19 และ 2.20 รูปที่ 2.15 แสดงหลักการของแรงดันเริ่มต้นตามฟังก์ชันของความหนาแน่นของฐานรองรับ ซิลิกอนชนิด p และ ซิลิกอนชนิด n และวัสดุที่หัวเข็มก็แตกต่างกัน มีความน่าสนใจว่า ค่าฟังก์ชันงานของวัสดุเปล่าในงานวิจัยขึ้นอยู่กับวิธีการวัดและการจัดเรียงตัวผลึก ดังนั้น จึงไม่เป็นที่ชัดเจนของค่าที่ป้อนสำหรับอุปกรณ์ C-AFM ตัวอย่างเช่น Derry และคณะ รายงานค่าไว้ระหว่าง 5.4 และ 6.1 eV สำหรับแพลทตินัม 5.42 และ 6.15 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอิริเดียม และ 5.12 และ 5.6 eV สำหรับทอง ตัวเลขของทั้ง 3 ค่านี้แสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งบอกค่าต่ำสุดที่เป็นค่าที่แนะนำสำหรับการจัดเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.15 แรงดันเริ่มต้นตามฟังก์ชันของความหนาแน่นของฐานรองรับกับความแตกต่างของวัสดุที่ทำหัวเข็ม สำหรับซิลิกอนชนิด p (a) และซิลิกอนชนิด n (b) [36]

Frammelsberger และคณะ, (p-Si, $2\pm1x10^{15}$ cm^{-3}) แสดงค่า V_{off} สำหรับหัวเข็มที่มีความแตกต่างกันที่โลหะที่นำมาเคลือบ ค่าที่ได้ถูกนำเสนอ ตัวอย่างเช่น สำหรับหัวเข็มที่เคลือบด้วย Co-Cr (0.3 V), หัวเข็มที่เคลือบด้วย Co-Cr (0.6 V) และหัวเข็มที่เคลือบด้วย Pt-Ir (1.3 V) อยู่ในค่าตามลำดับของทฤษฎี แต่ความแตกต่างสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 2.15 จาก A_{eff} และ V_{off} แสดงถึงการสัมพันธ์กันของค่าทั้งสองที่ได้รับอิทธิพลมาจากชั้นของน้ำในอากาศ ค่าอาจถือได้ว่ามีประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามากกว่าทางกายภาพ นอกจากนี้ ผลอื่น ๆ สามารถมีอิทธิพลต่อ V_{off} ได้ ตามที่จะบรรยายด้านล่างนี้

Kelvin probe force microscopy (KPFM) [40] และเทคนิคที่เกี่ยวข้องสามารถใช้เพื่อวัดค่าความแตกต่างของศักย์บริเวณรอยต่อ (Contact potential difference: CPD) ระหว่างหัวเข็มและชิ้นงานได้ ในระบบสุญญากาศระดับสูงและในชั้นที่ไม่มีชั้นออกไซด์ สถานะผิวหน้า การปนเปื้อน หรืออุปสรรคอื่น ๆ ค่า CPD โดยทั่วไปจะหมายถึงความแตกต่างของค่าฟังก์ชันงาน มีความเป็นไปได้ที่จะกำหนดค่าฟังก์ชันงานของหัวเข็มจากการทดลองทำให้ง่ายขึ้นเมื่อทราบค่าฟังก์ชันงานของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม สำหรับชิ้นงานที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ระดับชั้นต้องการที่จะเข้าไปยังแถบของมันเอง Melitz และคณะ รายงานว่าระดับชั้นมีความว่องไวต่อการกระจายและสัมผัสกับอากาศของชิ้นงานที่เป็นสารกึ่งตัวนำและอาจเปลี่ยนค่า CPD ได้ แม้ว่าการวัดจะดำเนินการภายใต้ระบบสุญญากาศระดับสูง ชั้น Native ออกไซด์และตัวดูดซับจะเหนี่ยวนำสถานะของผิวหน้าและเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงศักย์

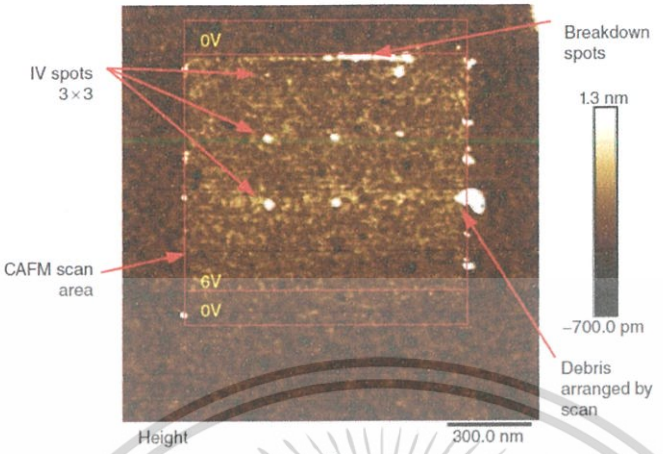
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนพื้นผิว สำหรับการวัดในอากาศจะยิ่งมีความยากขึ้น หัวเข็มและชิ้นงานจะถูกรบกวนและสัมผัสจากอากาศและความชื้นจากน้ำอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น การอ่านค่า CPD ในอากาศนั้นจะทำให้ไม่ได้ค่าฟังก์ชันงานที่ถูกต้องแม่นยำระหว่างหัวเข็มและชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม KPFM ในอากาศมักถูกใช้ดำเนินการเนื่องจากมีการใช้ที่ง่ายและสะดวก แม้ว่าค่า CPD อาจจะแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับในระบบสุญญากาศระดับสูง ความสัมพันธ์ของข้อมูลจะให้ค่าเชิงลึกนำไปสู่โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของรอยต่อและโครงสร้างแบบผสมรวมไปถึงการการเรียงตัวของแถบพลังงาน กลไกของความผิดพลาด และการเหนี่ยวนำโฟตอนบนผิวหน้า นอกจากนี้ Berthold และคณะ ได้ใช้ KPFM ได้ประสบความสำเร็จในอากาศเพื่อแยกแยะความแตกต่างของชนิดออกไซด์ของทองแดงด้วยลักษณะของค่า CPD

Celano และคณะ [41] ได้กำหนดฟังก์ชันงานของหัวเข็มที่เคลือบด้วย Pt-Ir และหัวเข็มที่เคลือบด้วยเพชร ด้วยเทคนิค KPFM ในระบบสุญญากาศขั้นสูง ซึ่งช่วยให้สามารถระบุระดับชั้นของชิ้นงานกราไฟต์ได้ สำหรับหัวเข็ม Pt-Ir พบว่ามีฟังก์ชันงานที่ 4.75 eV และสำหรับหัวเข็มเพชรจะอยู่ 4.1 eV การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ 0.7 eV สำหรับ Pt-Ir และ 0.05 eV สำหรับเพชร ตามลำดับ (χ = 4.05 eV, n-Si) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีในรูป 2.15 ฟังก์ชันงานของหัวเข็มและค่า V_{off} (n-Si) จะมีค่าน้อยมากประมาณ 0.68 eV สำหรับแพลทตินัม และ 0.7 eV สำหรับเพชร การใช้ค่า V_{off} ทางทฤษฎีสำหรับ เข็ม Pt-Ir และเข็มเพชร ตามลำดับ จะสามารถประมาณค่า d_{ox} ได้ประมาณ 0.48 นาโนเมตร, 0.20 นาโนเมตร และประมาณ 0.49 นาโนเมตร, 0.21 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังนั้น หากมีความเป็นไปได้ จะพบสิ่งที่แนะนำสำหรับการกำหนดฟังก์ชันงานของหัวเข็มจากการทดลองด้วย KPFM ในระบบสุญญากาศระดับสูง อย่างไรก็ตาม ความเป็นไปได้ที่ฟังก์ชันงานของหัวเข็มจะเปลี่ยนระหว่างการวัด C-AFM แม้ว่าเข็มใหม่จะมีการปนเปื้อนหรือชั้นออกไซด์จากกระบวนการผลิตหรืออากาศทั่วไปก็จะมีอิทธิพลต่อค่า CPD ที่วัดด้วย KPFM ชั้นนี้สามารถเกิดการสึกหรอได้ง่ายระหว่างการวัดด้วย C-AFM นำไปสู่ความแตกต่างของฟังก์ชันงานที่แตกต่างจากการทดลอง นอกจากนี้ เท่าที่ชั้นเคลือบที่ซ้อนกันมีส่วนเกี่ยวข้อง ชั้นด้านนอกอาจสึกหรอระหว่างการวัดด้วย C-AFM และชั้นด้านในอาจจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้า

ในอากาศ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากความเครียดทางไฟฟ้าอาจมีบทบาทสำคัญ ผู้เขียนจำนวนมากรายงานการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญระหว่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ที่ได้สังเกตมาจากความสำคัญของความเครียดทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวหลังการดำเนินการวัดด้วย C-AFM ด้วยหัวเข็มที่ทำไฟฟ้าด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าบวก รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของความเครียดบนพื้นผิว ภาพถูกบันทึกด้วยโหมด Tapping ด้วยการใช้หัวเข็มซิลิกอนที่ไม่เคลือบสารใด ๆ กับคานรองเข็มที่มีความแข็งแรงกว่าเพื่อใช้ในการวัด C-AFM เพื่อที่จะเพิ่มความละเอียดในการวัดให้สูงยิ่งขึ้นในเรื่องของ การสแกน การวัดค่ากระแสและแรงดัน และจุดการเบรกดาวน์ของชิ้นงานสูงขึ้นที่พื้นที่ที่มีความเครียด ในบางครั้ง การเคลื่อนที่ของหัวเข็มในพื้นที่ส่วนเล็ก ๆ จะถูกดำเนินการซ้ำใหม่รอบ ๆ พื้นที่การสแกน การเบรกดาวน์ของไดอิเล็กทริกจะเกิดขึ้นเฉพาะที่จุดการไหลของกระแส ซึ่งอาจบ่งบอกว่าหัวเข็ม C-AFM อาจถูกทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันที่ทำให้ลดปริมาณของกระแส หัวเข็ม ชิ้นงาน และหยดน้ำภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในระดับนาโน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้ว ทั้งหัวเข็มหรือชิ้นงานที่สัมผัสกัน [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ภาพสัณฐานวิทยา (โหมด Tapping) ของชิ้นงานซิลิกอนไดออกไซด์ 1.3 นาโนเมตร ที่ขึ้นอยู่กับความเครียดของ C-AFM พื้นที่ตรงกลางถูกทำให้เกิดความเครียดด้วย V_{tip} = +6 V, 0 และอัตราการแสกน 5 Hz พื้นผิวที่ยื่นออกมาในบริเวณตรงกลางของการวัดกระแสและแรงดัน (V_{tip} = 0 ... + 7 V, 0.3 Hz) C-AFM: หัวเข็มแบบ Cont-Pt (Pt-Ir5) ประมาณ 0.28 N/m [42]

การเกิดออกซิเดชันในแต่ละพื้นที่ของผิวหน้าของชิ้นงานในสภาพแวดล้อมแบบเปียกเป็นที่รู้จัก แต่ไม่ค่อยได้มีการตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบแอนโนดิกของหัวเข็มที่นำไฟฟ้า แม้แต่โลหะและเพชรที่ถูกรายงานว่าสามารถสร้างชั้นออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขการวัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการวัด C-AFM หัวเข็มออกไซด์สามารถส่งผลกับความหนาของทั้งออกไซด์ทั้งหมดได้ แรงดันเริ่มต้นถูกเปลี่ยนผ่านการเปลี่ยนศักย์ที่ผิวหน้าความเครียดทางไฟฟ้าร่วมกับการสึกหรอเนื่องจากการเคลื่อนที่ของเข็ม เป็นเหตุให้เกิดการเติบโตแบบไดนามิกและการกำจัดหัวเข็มออกไซด์และส่งผลต่อการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดัน Polspoel และคณะ แสดงให้เห็นว่าส่วนที่ยื่นออกมาหลังจากการวัดกระแสและแรงดัน การสแกนค่าไบแอส และการเบรกดาวน์ของไดอิเล็กทริกที่มาจากการไบแอสค่าลบเข้าไปที่ชิ้นงานที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประกอบอยู่ด้วย พวกเขาเชื่อมโยงขนาดและรูปร่างของการยื่นออกมาเข้ากับการกระจายความร้อนในชั้นออกไซด์ การกระจายความร้อนในชั้นออกไซด์จะเด่นชัดขึ้นเนื่องจากการหลอมเหลวที่สูงและกระบวนการออกซิเดชัน การกระจายความร้อนขึ้นอยู่กับความต้านทานบนชั้นออกไซด์และความต้านทานการสัมผัสของเข็มและมันจะเพิ่มมากขึ้นหากเพิ่มความต้านทานของชั้นออกไซด์ ขนาดของความต้านทานที่เข็มอาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการออกซิเดชันของหัวเข็มอันที่อธิบายถึงความไม่ต่อเนื่องที่สังเกตได้จากการปรับสภาพพื้นผิวของ C-AFM

โดยสรุปแล้ว แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวัด C-AFM เนื่องจากฟังก์ชันงานของหัวเข็มและชิ้นงานอาจจะแตกต่างและด้วยเหตุนี้แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดการไหลของกระแส ในที่นี้แรงดันออกไซด์ V_{ox} จะมีความแตกต่างของแรงดันของหัวเข็ม ค่าฟังก์ชันงานตามทฤษฎีสำหรับวัสดุแบบบัลก์จะขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกและวิธีการวัดที่ป้อนเข้าไป พวกนี้อาจถูกใช้เป็นแนวทางแรกสำหรับการใช้ C-AFM แต่ไม่จำเป็นต้องสะท้อนถึงค่าทางไฟฟ้าที่ปลายของหัวเข็ม นอกจากนี้ การสัมผัสกับอากาศเพียงอย่างเดียวของหัวเข็มหรือชิ้นงานจะส่งผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันงาน อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่า V_{off} อาจจะถูกกำหนดในการทดลองบนพื้นฐานของการวัด CPD ด้วย KPFM ในระบบสุญญากาศระดับสูง ค่าอาจเปลี่ยนแปลงระหว่างการวัดได้ ในระบบสุญญากาศระดับสูง อาจเกิดเหตุการณ์ส่วนใหญ่ที่เนื่องมาจากผลกระทบจากการสึกหรอ ในอากาศ ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าอาจเปลี่ยนแปลงที่ปลายขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพควบคู่ไปกับการสึกหรอ ดังนั้นในทางปฏิบัติ V_{off} ยังยากที่จะนิยามและอาจไม่ถือเป็นเอกลักษณ์ที่มีเสถียรภาพในการตีความของการวัด C-AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการในการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด รวมทั้งเครื่องมือ วัสดุ และอุปกรณ์ในการวิจัย โดยจะแบ่งการวิจัยออกเป็น 3 กระบวนการ คือ

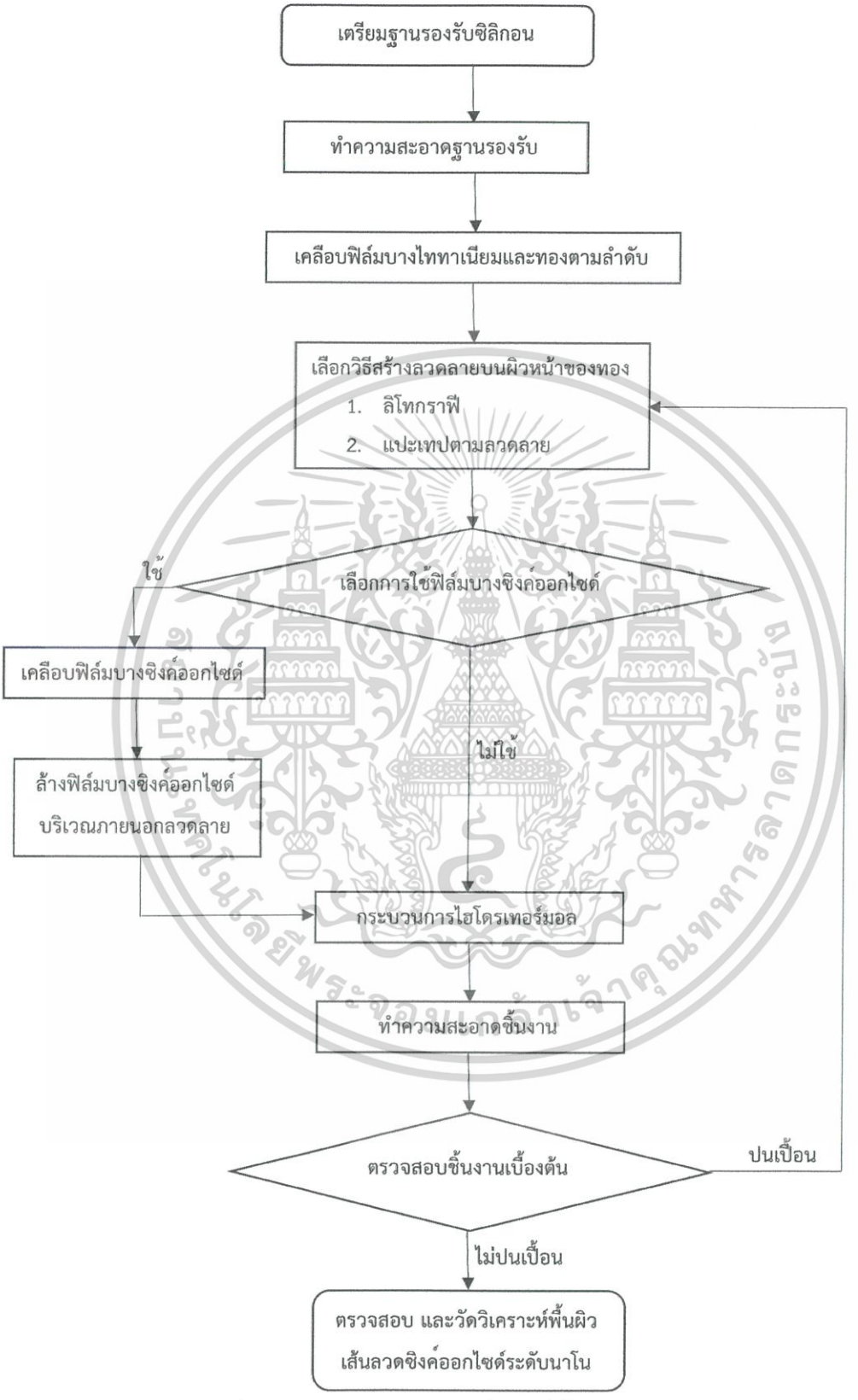
กระบวนการที่ 1 การเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

กระบวนการที่ 2 การตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างของส่วนประกอบบนชิ้นงาน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงาน

กระบวนการที่ 3 การตรวจสอบ และการวัดวิเคราะห์พื้นผิวของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

ซึ่งการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนจะต้องผ่านการตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างของส่วนประกอบบนชิ้นงาน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงาน แล้วนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อปรับเปลี่ยนและเลือกวิธีการที่เหมาะสมเพื่อให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพสูงสุดและมีความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองน้อยที่สุด สำหรับวิธีการทดลองรวมทั้งการกำหนดเงื่อนไข จะมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานและเงื่อนไขที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 กระบวนการที่ 1 การเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

ในกระบวนการนี้จะเป็นการเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และสารละลายเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนบนชิ้นงานที่แต่ละชั้นมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการ

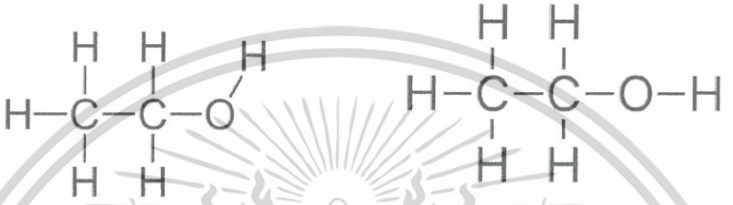
(1) แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon Wafer) – ฐานรองรับชั้นล่างสุดของชิ้นงานจะใช้วัสดุซิลิกอนเวเฟอร์ที่เป็นเซมิคอนดักเตอร์ ชนิด N ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร โดยมีระนาบ (100) ความหนา 525 +/- 25 ไมโครเมตร ความเข้มข้นพาหะประมาณ $1x10^{15}$ cm^{-3} และมีการขัดเงาเพียง 1 ด้าน ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่เป็นเซมิคอนดักเตอร์ ชนิด N

(2) สารประกอบอินทรีย์ในการทำความสะอาด – หลังจากที่ได้ฐานรองรับซิลิกอนตามขนาดที่ต้องการ จะต้องนำฐานรองรับที่ได้ทุกชิ้นมาทำความสะอาดด้วยสารประกอบอินทรีย์ คือ อะซีโตน [$(CH_3)_2CO$], น้ำปราศจากไอออน [H_2O], ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [C_3H_8O] และเอทิลแอลกอฮอล์ [C_2H_5OH] ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.3-3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ คือ อะซีโตน น้ำปราศจากไอออน ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และเอทิลแอลกอฮอล์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ คือ อะซีโตน น้ำปราศจากไอออน ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และเอทิลแอลกอฮอล์ ตามลำดับ

(3) เป้าสารเคลือบไททาเนียม ทอง และซิงค์ออกไซด์ – ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการพลาสมาสปัตเตอร์ริง (Plasma Sputtering) จะต้องใช้เป้าสารเคลือบของชั้นฟิล์มบางที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ต้นกำเนิดไททาเนียม ทอง และซิงค์ออกไซด์ สำหรับกระบวนการพลาสมาสปัตเตอร์ริง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist) – ในกระบวนสร้างลวดลายบนผิวหน้าของชั้นทองนั้น จะต้องเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก แล้วจึงนำชิ้นงานไปเข้ากระบวนการฉายแสงอัลตร้าไวโอเล็ต (UV Exposure) ผ่านหน้ากาก (Mask) ที่เป็นลวดลายตามต้องการ โดยลวดลายบนหน้ากากจะมีลักษณะโปร่งใส สามารถมองทะลุผ่านได้ แต่บริเวณรอบนอกที่ไม่ใช่ลวดลายจะเป็นลักษณะสีดำทึบ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเมื่อปิดผิวหน้าชิ้นงานที่มีน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยหน้ากากแล้วฉายแสง ผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกฉายแสงจะเกิดการหายไปของน้ำยาไวแสงชนิดบวกแล้วจึงเกิดเป็นลวดลาย ในขณะที่ผิวหน้าชิ้นงานบริเวณที่ถูกปิดทับด้วยหน้ากากส่วนที่เป็นสีดำทึบจะยังคงอยู่ซึ่งน้ำยาไวแสงชนิดบวก

รูปที่ 3.6 หน้ากาก

(5) น้ำยากัดลาย (Developer) – หลังจากที่เกิดลวดลายบนผิวหน้าของชั้นทองแล้ว จะต้องนำชิ้นงานมาแช่ในน้ำยากัดลายเพื่อเป็นการล้างน้ำยาไวแสงชนิดบวกในบริเวณที่ถูกฉายแสงให้เหลือแต่เพียงชั้นฟิล์มบางทองเท่านั้น หลังจากนั้นจะเห็นลวดลายที่ต้องการชัดเจนยิ่งขึ้น

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ

(1) เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (Hot Plate) – ใช้เครื่องยี่ห้อ SCILOGEX รุ่น MS7-H550-S ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือนี้ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเพื่อให้ของเหลวบนชิ้นงานระเหยออกโดยปราศจากคราบตกค้าง และใช้ในการกวนสารละลายให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ยี่ห้อ SCILOGEX รุ่น MS7-H550-S

(2) เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา (Plasma Cleaner) – ใช้ในการทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานให้ปราศจากสิ่งปนเปื้อนจากสารอินทรีย์ต่าง ๆ ด้วยพลาสมาของออกซิเจน ภายใต้ห้องใส่ชิ้นงานที่เป็นสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 เครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา

(3) เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet Exposure) – ใช้เครื่องดังรูปที่ 3.9 มีแหล่งกำเนิดแสงเป็น Hg lamp ยี่ห้อ USHIO ซึ่งจะใช้เครื่องนี้ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตลงไปที่ชิ้นงานที่ถูกปิดด้วยหน้ากากแล้วเรียบร้อย แสงที่ฉายลงไปที่พื้นผิวจะทำให้เกิดเป็นลวดลายตามหน้ากากที่นำมาปิด และบริเวณที่ถูกปิดทับด้วยหน้ากากจะไม่ถูกส่งผลกระทบแต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

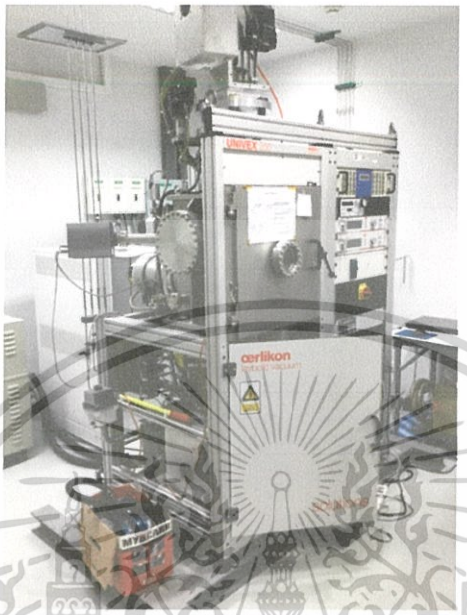
(4) เครื่องเคลือบสารด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง (Spin Coating Machine) – ใช้เครื่อง ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะใช้สำหรับการปั่นเหวี่ยงชิ้นงานที่ถูกหยดด้วยน้ำยาไวแสงบนผิวหน้าเรียบร้อยแล้ว เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน โดยจะวางชิ้นงานลงบนแท่นรองรับแล้วยึดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบที่สูงหรือต่ำจะขึ้นอยู่กับความต้องการที่แตกต่างกันออกไป

รูปที่ 3.10 เครื่องเคลือบสารด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง

(5) เครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยพลาสมา (Plasma Sputtering) – ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจะใช้เครื่องนี้สำหรับการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียม ทอง และซิงค์ออกไซด์ตามลำดับ บนฐานรองรับซิลิกอน ด้วยการกระตุ้นด้วยพลาสมาของแก๊สอาร์กอน โดยจะดำเนินการเคลือบภายใต้ระบบสุญญากาศสูง เพื่อลดการชนระหว่างอนุภาคของสารที่ต้องการกับอนุภาคของอากาศที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลงเหลืออยู่ภายใน จะส่งผลให้ได้ความหนาของฟิล์มบางตามที่ต้องการ และมีความคลาดเคลื่อนน้อย



รูปที่ 3.11 เครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัย

(6) เครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่น (Ultrasonicator) – ใช้เครื่องยี่ห้อ Elma รุ่น S30H ดังรูปที่ 3.12 เป็นเครื่องมือที่ใช้เป็นตัวกลางสำหรับทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลของของเหลวที่ถูกบรรจุอยู่ในเครื่องมือ สามารถตั้งระยะเวลาในการทำงานได้ตามลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ ซึ่งจะช่วยในการทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานไม่ให้มีการหลงเหลืออยู่ของสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ เช่น ฝุ่น คราบไขมัน เป็นต้น

รูปที่ 3.12 เครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่น ยี่ห้อ Elma รุ่น S30H

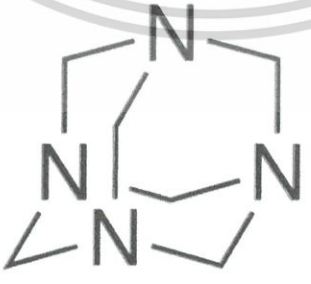
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7) เครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Oven) – ใช้เครื่องดังรูปที่ 3.13 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการอบและให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่จะสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน โดยสามารถตั้งค่าอุณหภูมิ และระยะเวลาในการดำเนินการตามที่ต้องการได้

รูปที่ 3.13 เครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ

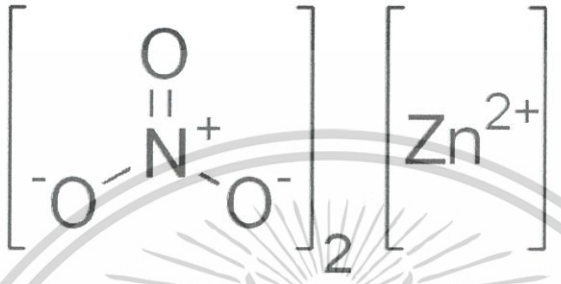
(1) เฮกซะเมททิลลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine) – เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมี คือ $(CH_2)_6N_4$ ดังรูปที่ 3.14 และสามารถละลายได้ในน้ำและสารละลายอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็น 1 ใน 2 ของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อให้เกิดการเจริญเติบโตของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน



รูปที่ 3.14 โครงสร้างพันธะของเฮกซะเมททิลลีนเตตระมีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc Nitrate Hexahydrate) – เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมี คือ $[Zn(NO_3)_2\ 6H_2O]$ ดังรูปที่ 3.15 มีลักษณะทางกายภาพภายนอกเป็นสีขาว มีโครงสร้างเป็นของแข็ง และสามารถละลายได้ในน้ำและแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็น 1 ใน 2 ของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อให้เกิดการเจริญเติบโตของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน



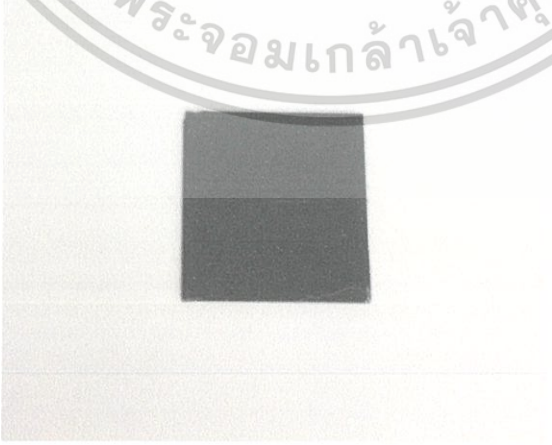
รูปที่ 3.15 โครงสร้างพันธะของซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต

3.1.4 วิธีการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

ในการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนนั้นจะถูกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับและฟิล์มบาง และขั้นตอนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

3.1.4.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับและฟิล์มบาง

(1) ตัดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2x2 cm^2 ดังรูปที่ 3.16 โดยใช้ปากกาสำหรับตัดกระจก



รูปที่ 3.16 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ถูกตัดแล้ว ขนาด 2x2 cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วมาเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดโดยเท อะซีโตน น้ำปราศจากไอออน ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และ

(3) เมื่อแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์แต่ละชิ้นที่ทำความสะอาดเสร็จแล้ว ให้รีบคีบนำมาวางให้ความร้อนบนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที

(4) นำชิ้นงานที่ได้ไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยพลาสมา กำลัง 18 วัตต์ เป็นระยะเวลา 5 นาที

(5) นำชิ้นงานทั้งหมดมาเตรียมเพื่อเข้าสู่กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียม และฟิล์มบางทองด้วยพลาสมา (Plasma Sputtering) โดยแปะชิ้นงานที่ต้องการจะเคลือบฟิล์มบางลงบน Holder ของเครื่องมือ จากนั้นเตรียมเป้าสารเคลือบไททาเนียมยึดลงที่แท่น DC ในเครื่อง Sputtering และเตรียมเป้าสารเคลือบทองยึดลงที่แท่น RF2 ในเครื่อง Sputtering แล้วจึงบรรจุชิ้นงานทั้งหมดเข้าไปในเครื่อง จากนั้นให้ตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญของเครื่องดังนี้

- Working Pressure: 4.0×10^{6} mbar
- Titanium Layer 5 nm thickness:
  - Power Setpoint = 120 watt
  - Setpoint Flow = 20 sccm
  - Setpoint Opening = 48.5%
  - Pre-Sputtering = 10 min
  - Sputtering = 20 min
- Gold Layer 100 nm thickness:
  - Power Setpoint = 60 watt
  - Setpoint Flow = 20 sccm
  - Setpoint Opening = 48.5%
  - Pre-Sputtering = 6 min
  - Sputtering = 8 min

(6) กระบวนการลิโทกราฟี ก่อนเริ่มกระบวนการให้เป่าบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานด้วยลมไนโตรเจนก่อนอีกครั้ง เพื่อไม่ให้มีสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้า จากนั้นวางชิ้นงานบนแท่นวางในเครื่องเคลือบสารด้วยวิธีการปั่นเหวี่ยง แล้วตั้งค่าเครื่อง ดังนี้

- Step 1: V = 500 rpm t = 5 sec a = 500 sccm
- Step 2: V = 3000 rpm t = 30 sec a = 500 sccm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วจึงหยดน้ำยาไวแสงชนิดบวกลงบนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยให้หยดอยู่เพียงบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน ไม่ต้องหยดกระจายไปทั่วบริเวณ แล้วกดเริ่มการทำงานของเครื่อง เมื่อเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานมาวางบนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 นาที เมื่อครบตามเวลาแล้วให้นำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ชิ้นงานเย็นลง

(7) กระบวนการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยให้นำชิ้นงานทีละชิ้นมาวางที่บริเวณจุดวางชิ้นงานของเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต แล้ววางทับชิ้นงานด้วยหน้ากากตามลวดลายที่ต้องการ สุดท้ายจึงวางทับหน้ากากด้วยกระจกควอร์ซ แล้วจึงเริ่มฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นระยะเวลา 20 วินาที เสร็จแล้วให้นำชิ้นงานมาวางบนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียน เป็นระยะเวลา 1 นาที

(8) นำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำยากัดลาย โดยเทน้ำยาลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วใส่ชิ้นงานลงไป โดยกดให้ชิ้นงานจมลงไปในน้ำยา จากนั้นใช้มือคอย ๆ แกว่งบีกเกอร์วนไปเบา ๆ เป็นระยะเวลา 1 นาที แล้วนำชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เสร็จแล้วเป่าให้แห้งด้วยลมไนโตรเจน

(9) กระบวนการเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ด้วยพลาสมา โดยแปะชิ้นงานที่ต้องการจะเคลือบฟิล์มบางลงบน Holder ของเครื่องมือ จากนั้นเตรียมเป้าสารเคลือบซิงค์ออกไซด์ยึดลงที่แท่น RF2 ในเครื่อง Sputtering แล้วจึงบรรจุชิ้นงานทั้งหมดเข้าไปในเครื่อง จากนั้นให้ตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญของเครื่องดังนี้

- Working Pressure: 4.0×10^{-6} mbar
- Zinc Oxide Layer 20 nm thickness:
  - Power Setpoint = 100 watt
  - Setpoint Flow = 20 sccm
  - Setpoint Opening = 47%
  - Pre-Sputtering = 20 min
  - Sputtering = 10 min

(10) ล้างชั้นน้ำยาไวแสงและชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่อยู่บนชั้นโฟโตรีซิสออก โดยเทอะซีโตนลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปตั้งแช่ไว้ในเครื่องทำความสะอาดด้วยการสั่นที่บรรจุน้ำสะอาดไว้ภายในเครื่องในระดับที่ท่วมสูงจากตะแกรงด้านล่างประมาณ 2 เซนติเมตร แล้วจึงนำชิ้นงานแช่ลงไปในบีกเกอร์อะซีโตน โดยกดให้ชิ้นงานจมลงไป หมุนกำหนดเวลาการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเครื่องเป็น 10 นาที แล้วกดปุ่มเริ่มการทำงาน เมื่อเสร็จแล้วให้ล้างผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วเป่าให้แห้งด้วยลมไนโตรเจน

(11) เตรียมสารเคมีสำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยหากชิ้นงานมีขนาด 2x2 cm^2 จะต้องใช้สารเคมี 200 มิลลิลิตร/ชิ้นงานที่จะบรรจุลงในขวดทดลอง โดยจะต้องเตรียมเฮกซะเมททิลลีนเตตระมีน (HMTA) 20 มิลลิโมลา ปริมาณสาร 0.564 กรัม และซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc Nitrate) 20 มิลลิโมลา ปริมาณสาร 1.190 กรัม จากนั้นนำสารทั้ง 2 ชนิดนี้มาเทรวมกันในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วใส่น้ำปราศจากไอออนลงไปอีก 200 มิลลิลิตร จากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic Bar) ลงไปภายในขวดทดลอง แล้วปิดฝาให้ไม่แน่นและไม่หลวมจนเกินไป จึงยกขวดทดลองไปตั้งบนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ปล่อยให้เกิดการกวนสารเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

(12) ติดชิ้นงานลงบนกระจกสไลด์ โดยใช้เทปสองหน้าติดด้านหลังชิ้นงาน แล้วใช้เทปใสติดยึดมุมทั้ง 4 ของชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.17 เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานหลุดออกจากกระจกสไลด์ขณะอยู่ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

รูปที่ 3.17 การติดชิ้นงานลงบนกระจกสไลด์ก่อนการเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

(13) เมื่อกวนสารจนครบเวลา 4 ชั่วโมง แล้ว ให้นำแท่งแม่เหล็กกวนสารออกจากขวดทดลอง แล้วจึงนำกระจกสไลด์ที่ติดชิ้นงานใส่ลงไปในขวดทดลอง โดยคว่ำให้ผิวหน้าของชิ้นงานหันลงไปทางด้านล่างของขวดทดลอง และให้กระจกสไลด์วางอยู่ในลักษณะเอียง ดังรูปที่ 3.18 จากนั้นปิดปากขวดทดลองด้วยพลาสติกใส จึงปิดฝาให้แน่นพอประมาณ แล้วนำขวดทดลองเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในเครื่องอบความร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อบเป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.18 การวางกระจกสไลด์ในขวดทดลองก่อนเข้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

(14) เมื่อครบเวลากระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ให้นำขวดทดลองออกจากเครื่องอบความร้อนและตั้งไว้ภายใต้อุณหภูมิห้องจนกว่าอุณหภูมิของขวดทดลองจะลดลงมาสู่อุณหภูมิห้อง

(15) เทไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จึงนำไปตั้งแช่ไว้ในเครื่องทำความสะอาดด้วยแรงสั่นที่บรรจุน้ำสะอาดไว้ภายในเครื่องในระดับที่ห่วมสูงจากตะแกรงด้านล่างประมาณ 2 เซนติเมตร หลังจากอุณหภูมิของขวดทดลองลดลงมาที่อุณหภูมิห้องแล้ว ให้นำกระจกสไลด์ที่มีชิ้นงานติดอยู่ออกจากขวดทดลอง ลอกเทปทั้งหมดออก แล้วคีบชิ้นงานมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วจึงนำชิ้นงานแช่ลงไปในบีกเกอร์ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ โดยกดให้ชิ้นงานจมลงไป หมุนกำหนดเวลาการทำงานของเครื่องเป็น 10 นาที แล้วกดปุ่มเริ่มการทำงาน เมื่อเสร็จแล้วให้ล้างผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำปราศจากไอออน จึงนำชิ้นงานไปวางบนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที เสร็จแล้วให้นำชิ้นงานมาเป่าด้วยลมไนโตรเจน

(16) วางชิ้นงานในจานเพาะเชื้อ แล้วจึงนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นก่อนการใช้งานต่อไป เพื่อไม่ให้เกิดความชื้นบนผิวหน้าของชิ้นงาน อันเป็นที่มาของสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ

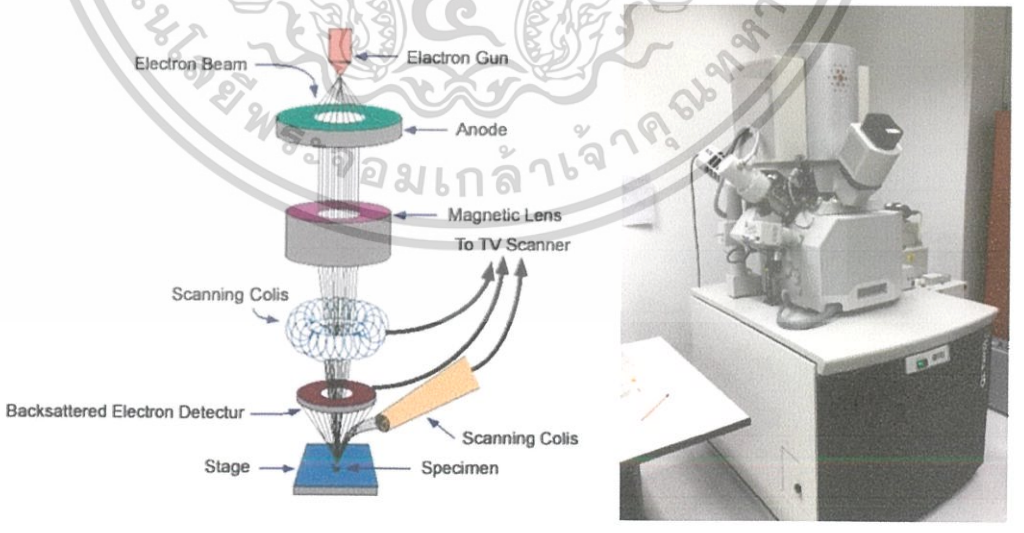
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการที่ 2 การตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างของส่วนประกอบบนชิ้นงาน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงาน

การตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างของส่วนประกอบบนชิ้นงาน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงาน จะทำได้โดยการใช้เครื่องมือต่อไปนี้

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope | SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปยังตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนนี้จะผ่านระบบเลนส์แม่เหล็กแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.19 การสร้างภาพจากเครื่อง SEM ทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ได้ทำการตรวจวัด ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงทำให้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างได้อย่างละเอียด สำหรับหลักการทำงานของเครื่องนั้นจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนให้กับระบบ โดยอิเล็กตรอนจำนวนมากที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้อิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัด จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการศึกษา จากนั้นเมื่อลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอคอมพิวเตอร์ต่อไป [43]



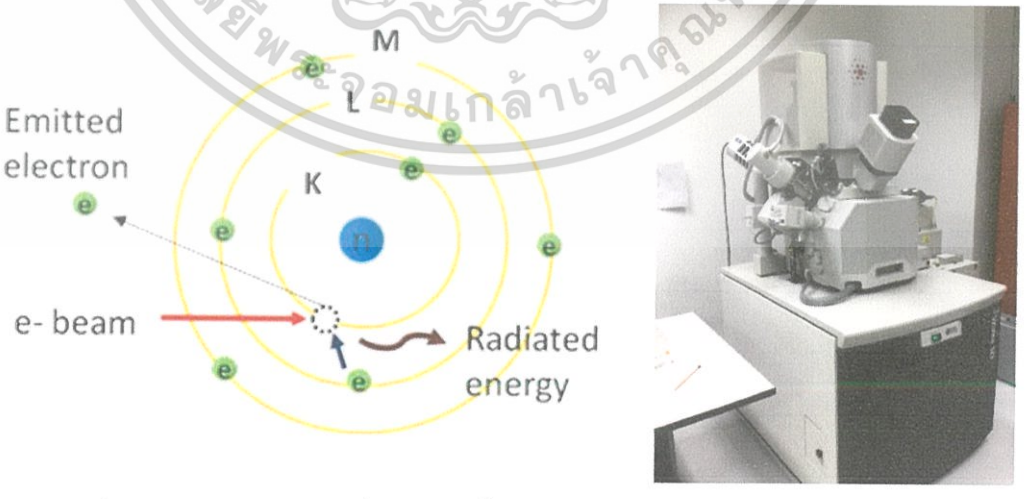
รูปที่ 3.19 แผนภาพของเครื่อง SEM (ซ้าย) [43] และรูปเครื่อง SEM ที่ใช้ในการวิจัย (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดในงานวิจัยนี้ จะถูกใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาความสูง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ตั้งค่ากำลังของลำอิเล็กตรอนอยู่ที่ 20 keV. และใช้กำลังขยายของภาพที่ x10k, x20k, x40k, x80k และ x120k โดยตรวจสอบชิ้นงานทั้งบริเวณผิวหน้า (Top View) และบริเวณตัดขวางด้านข้าง (Cross Section) ซึ่งการตรวจสอบบริเวณผิวหน้าจะตรวจสอบบริเวณภายในลวดลายทั้งหมด 4 จุด และบริเวณภายนอกลวดลายทั้งหมด 4 จุด จากนั้นตรวจสอบด้วยลักษณะของภาพตัดขวางบริเวณภายในลวดลาย 2 จุด และบริเวณภายนอกลวดลาย 2 จัด ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะเป็นข้อมูลในการสนับสนุนกระบวนการที่ 1

3.2.2 เครื่องวัดการกระจายของพลังงานรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy | EDX or EDS)

เป็นเครื่องมือที่ใช้งานควบคู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ซึ่งมีหลักการในการทำงานเหมือนกัน มีข้อแตกต่างกันอยู่ที่ ใน EDS นั้น การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง อันได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Tube) อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็วและมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้ผ่านเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่าง บางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ในการชนนี้ก็จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกไปจากอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดที่ว่างขึ้น ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้ อิเล็กตรอนก็จะต้องปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปของรังสีเอ็กซ์เฉพาะแบบ (X-Ray Characteristic) ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมีองค์ประกอบธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอ็กซ์เฉพาะแบบที่แตกต่างกันออกไป จึงเกิดข้อได้เปรียบในการใช้เทคนิค EDS คือ สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณได้ในเวลาอันรวดเร็ว และตรวจได้ครั้งละหลายธาตุพร้อมกัน นอกจากนี้ยังไม่ทำลายตัววัสดุหรือชิ้นงานให้สูญเสียสภาพ และสามารถใช้วัตถุในลักษณะของแข็งได้ [44]



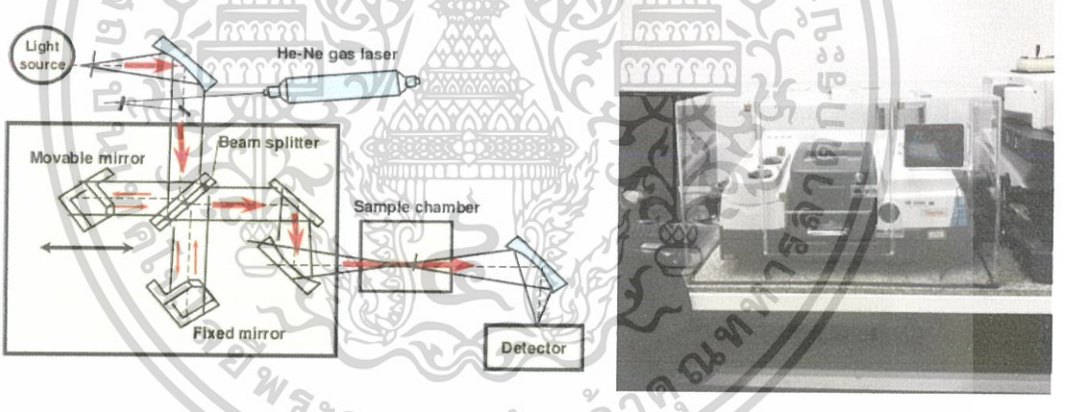
รูปที่ 3.20 หลักการทำงานของเครื่องมือ EDS (ซ้าย) [44] และเครื่องมือ EDS ที่ใช้ในการวิจัย (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเครื่องวัดการกระจายของพลังงานรังสีเอ็กซ์นี้ จะถูกใช้วัดเพื่อตรวจสอบธาตุที่ประกอบอยู่บนชิ้นงาน และปริมาณที่มีอยู่จากอัตราส่วนน้ำหนักทั้งหมด ซึ่งเครื่องมือนี้มีข้อจำกัดที่ว่าไม่สามารถตรวจวัดได้เป็นบริเวณกว้าง สามารถวัดได้เพียงบริเวณในขนาดตารางไมโครเมตร ทำให้ในการตรวจวัดนั้นจะต้องเลือกตรวจวัดภายในลวดลาย 4 จุด และภายนอกลวดลาย 4 จุด เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้และให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง

3.2.3 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟาเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer | FT-IR)

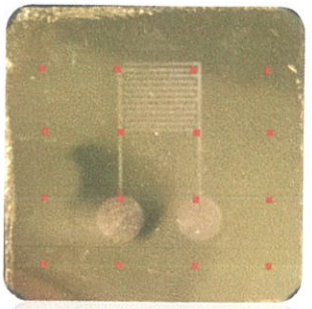
เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ เพื่อตรวจสอบวิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลรวมกับเทคนิคอื่น โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟาเรด ดังรูปที่ 3.21 (Middle Infrared Region) ประมาณ 400-4000 cm^{-1} เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟาเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการหมุน (Bending) ของพันธะโคเวเลนซ์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสง และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave Number) ได้ผลเป็นสเปคตรัม ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน [45]



รูปที่ 3.21 หลักการทำงานของเครื่อง FT-IR (ซ้าย) [45] และเครื่องมือ FT-IR ที่ใช้ในงานวิจัย (ขวา)

โดยในเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้การวัดเป็นจุดตามที่เราต้องการบนชิ้นงาน ไม่สามารถวัดเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ และเนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ ในขณะทำการคว่ำชิ้นงานลงบนเครื่องมือ จะไม่สามารถกำหนดระยะหรือจุดที่ต้องการวัดบนผิวหน้าชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจึงต้องใช้การวัดเป็นจุดทั้งหมด 16 จุด ทั่วผิวหน้าของชิ้นงาน ตามแผนภาพจำลองการวัด ดังแสดงในรูปที่ 3.22 แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้นั้นมาเฉลี่ยเพื่อตรวจสอบพันธะที่เกิดขึ้นทั้งหมดบนผิวหน้าของชิ้นงาน

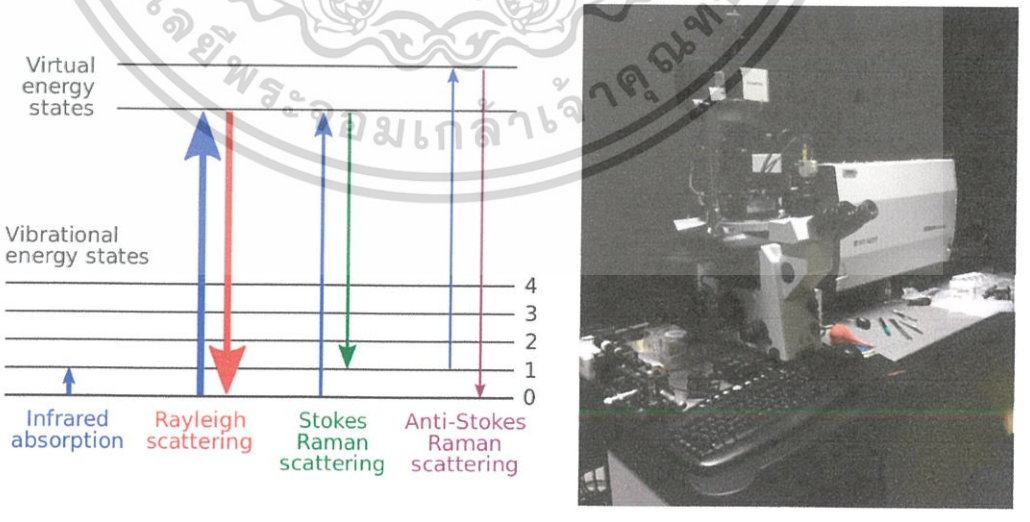
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แผนภาพจำลองการวัดบนผิวหน้าของชิ้นงาน ตามจุดสีแดงที่ปรากฏ

3.2.4 เครื่องรามานสเปคโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer)

ปรากฏการณ์รามานเกิดจากการที่เมื่อเรายิงแสงเลเซอร์ความเข้มสูงเข้าสู่วัสดุ โมเลกุลในวัสดุจะถูกกระตุ้นแล้วทำให้เกิดการกระเจิงของแสงออกมา ซึ่งเป็นเหตุการณ์ปกติของวัสดุทั่ว ๆ ไป โดยแสงที่กระเจิงออกมานี้จะมีค่าความยาวคลื่นเดียวกันกับลำแสงของเลเซอร์ที่มากระตุ้น ในที่นี้จะเรียกแสงนี้ว่า แสงเรย์ลี (Rayleigh Scatter) ส่วนลำแสงอีกส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก จะมีการกระเจิงแสงที่ความยาวคลื่นต่างออกไป ซึ่งเราจะเรียกลำแสงส่วนนี้ว่า รามาน (Raman Scatter) ดังแสดงในรูปที่ 3.23 นอกจากนี้เทคนิคทางรามานยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบตามลักษณะการวัด คือ 1. แบบ Dispersive Raman ที่ใช้หลักการโฟกัสสัญญาณแสงรามานที่เกิดบนเกรตติง ลำแสงเหล่านี้ก็จะถูกส่งต่อไปยังตัวตรวจวัดที่เรียกว่า CCD (Charge Coupled Device) ซึ่งโดยปกติแล้วตัว CCD มักจะเป็นสารประกอบของซิลิกอนที่มีค่าความว่องไวสูง ซึ่งก็มีข้อจำกัดในแบบนี้คือ มีการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งจะมีค่าที่สูงกว่าสัญญาณรามานที่ตรวจวัดได้ ดังนั้นฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นจะไปบดบังสัญญาณของรามานได้ โดยแบบที่ 2 คือ FT-Raman เนื่องจากเทคนิค Dispersive Raman นั้นค่อนข้างมีปัญหาทางด้านการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ จึงใช้เทคนิคที่ 2 นี้ โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นสูงที่มีพลังงานต่ำเข้าไปกระตุ้นสารเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ [46]



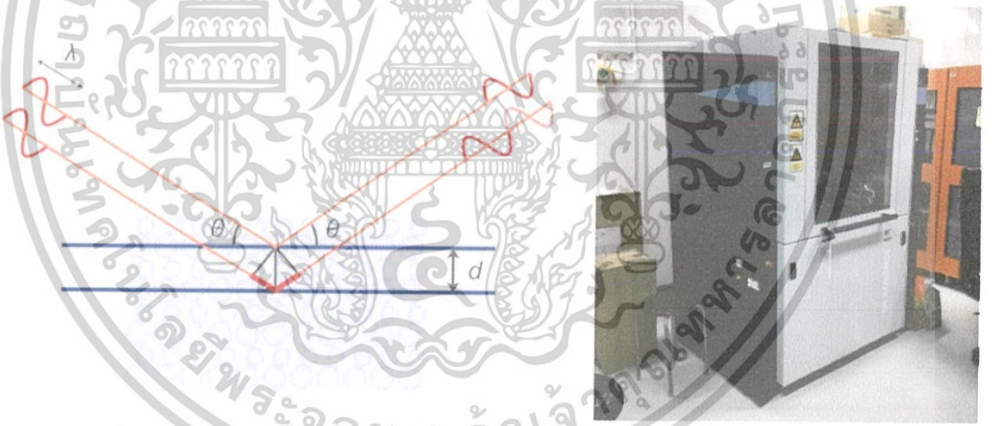
รูปที่ 3.23 การทำงานของเครื่องรามานสเปคโตรมิเตอร์ (ซ้าย) [46] และเครื่องรามานที่ใช้ในงานวิจัย (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในเทคนิคนี้จะใช้การวัดแบบ Dispersive Raman ในโหมดของ Raman Shift ใช้ลำแสงเลเซอร์สีแดงที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร อยู่ในช่วง 100-1900 cm^{-1} เพื่อให้เห็นครอบคลุมทุกพันธะที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน โดยจะวัดบริเวณภายในลวดลายบนผิวหน้าของชิ้นงานจำนวน 2 จุด และวัดซ้ำจุดละ 10 ครั้ง หลังจากนั้นวัดบริเวณภายนอกลวดลายบนผิวหน้าของชิ้นงานจำนวน 2 จุด และวัดซ้ำจุดละ 10 ครั้ง เหมือนกับบริเวณภายในเช่นกัน

3.3.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer | XRD)

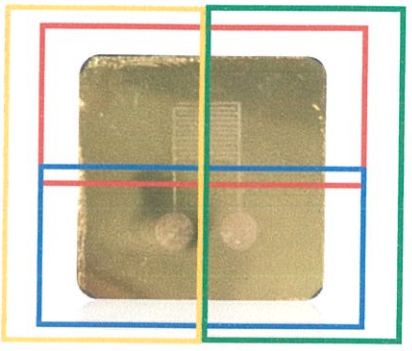
เครื่องมือชนิดนี้ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.24 สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของยูนิตเซลล์ที่ไม่เท่ากันทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาองค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละยูนิตเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย [47]



รูปที่ 3.24 หลักการที่ใช้ในเครื่อง XRD (ซ้าย) [47] และเครื่อง XRD ที่ใช้ในงานวิจัย (ขวา)

โดยเทคนิคนี้จะถูกใช้เพื่อตรวจสอบสารที่ประกอบอยู่บนชิ้นงานตั้งแต่ชั้นด้านล่างสุด นั่นคือ ฐานรองรับซิลิกอน ฟิล์มบางไททาเนียม ฟิล์มบางทอง ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่เนื่องด้วยเครื่องมือวัด XRD มีการวัดในระยะที่กว้างหรือวัดได้ในขนาดพื้นที่ใหญ่ ไม่สามารถกำหนดจุดโดยเฉพาะแต่ละจุดได้ จึงต้องใช้วิธีการวัดแต่ละด้านของชิ้นงานโดยใช้ลวดลายตรงกลางชิ้นงานเป็นจุดอ้างอิง แล้วจึงวัดครึ่งหนึ่งของชิ้นงานส่วนด้านบนลวดลาย วัดครึ่งหนึ่งของชิ้นงานส่วนด้านล่างลวดลาย วัดครึ่งหนึ่งของชิ้นงานส่วนซ้ายมือของลวดลาย วัดครึ่งหนึ่งของชิ้นงานส่วนขวามือของลวดลาย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ดังนั้นในชิ้นงาน 1 ชิ้น จะได้ข้อมูลของ XRD มาทั้งหมด 4 ชุดข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



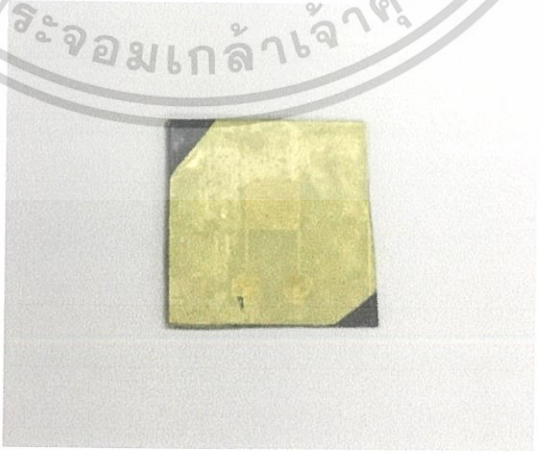
รูปที่ 3.25 การตรวจวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง XRD ที่ด้านต่าง ๆ บนชิ้นงาน จำนวน 4 ด้าน (ตามสีที่ปรากฏ 4 สี)

3.3 กระบวนการที่ 3 การตรวจสอบ และวัดวิเคราะห์พื้นผิวของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

กระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการสุดท้ายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 โดยกระบวนการนี้จะเป็นการเน้นวิธีการตรวจสอบ และวัดวิเคราะห์บนผิวหน้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโน และสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ลักษณะของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนนี้

3.3.1 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการ

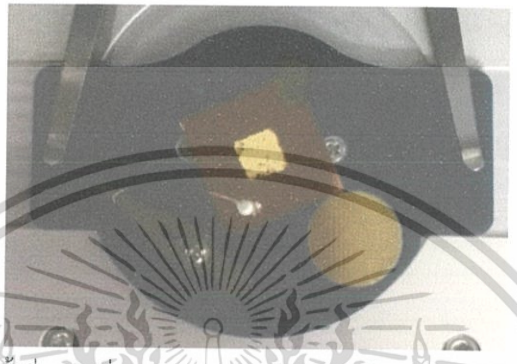
(1) ชิ้นงานที่สร้างจากกระบวนการที่ 1 และผ่านการตรวจวัดเบื้องต้นจากกระบวนการที่ 2 – โดยหลังจากทำการสร้างชิ้นงานตามกระบวนการทั้งหมดจากกระบวนการที่ 1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.26 จะได้ชิ้นงานที่ประกอบไปด้วย ฐานรองรับซิลิกอน ฟิล์มบางไททาเนียม ฟิล์มบางทอง ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ และลวดลายที่มีเส้นลวดซิงค์ออกไซด์อยู่ภายในตามลำดับ ชิ้นงานก็จึงได้ถูกนำไปตรวจวัดวิเคราะห์ในเบื้องต้นด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ตามกระบวนการที่ 2 สุดท้ายจึงนำชิ้นงานชิ้นนี้มาเข้าสู่กระบวนการที่ 3 นี้



รูปที่ 3.26 รูปชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 เสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) กาวซิลเวอร์และเส้นลวด – วัสดุสองชนิดนี้จะถูกนำเพื่อต่อเป็นขั้วบนผิวหน้าของทอง ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งทองมีสมบัติในการนำไฟฟ้าตามปกติแล้ว แต่จะถูกต่อสายไฟออกมาเพื่อให้ Probe ของเครื่องมือ CAFM สามารถยึดกับสายไฟเส้นที่ต่อออกมาจากผิวหน้าทอง แต่ยังคงสมบัติการนำไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าของทองกับเส้นลวดที่ต่อเพิ่มออกมา โดยวิธีการนี้ถูกดำเนินการเพื่อลดความเสียหายบนผิวหน้าของทองที่อาจถูก Probe ของเครื่องมือ CAFM ขูดขีดจนเป็นรอยขณะบรรจุชิ้นงานเข้าสู่เครื่องมือ หรือขณะนำชิ้นงานออกจากเครื่องมือได้



รูปที่ 3.27 ขั้วที่ถูกต่อเพิ่มออกมาจากผิวหน้าของทองด้วยกาวซิลเวอร์และเส้นลวด

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ

(1) เครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Oven) – ใช้เครื่องดังรูปที่ 3.28 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการอบและให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ถูกสร้างขั้วเพื่อนำไฟฟ้าออกมาจากผิวหน้าของชั้นฟิล์มทอง โดยสามารถตั้งค่าอุณหภูมิ และระยะเวลาในการดำเนินการตามที่ต้องการได้

รูปที่ 3.28 เครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (Conductive Atomic Force Microscope | C-AFM) – ใช้เครื่องของบริษัท JPK Instrument ดังแสดงในรูปที่ 3.29 มีลักษณะคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบทั่วไป (AFM) ที่มีหลักการ คือ ใช้หัวเข็มที่มีขนาดเล็กลากผ่านผิวหน้าชิ้นงาน หรือแตะตามจุดต่าง ๆ บนผิวหน้าชิ้นงาน ในขณะเดียวกันจะใช้ลำแสง LASER ส่องมาที่ปลายของหัวเข็มให้แสง LASER สะท้อนกลับไปเข้าตัวตรวจจับ (Detector) ซึ่งหากพื้นผิวมีความขรุขระ ก็จะทำให้หัวเข็มที่ใช้นั้นมีปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของพื้นผิว ทำให้แสงเลเซอร์ที่ตกลงบนปลายของหัวเข็มนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยหลักการของ C-AFM ก็จะคล้ายกันกับหลักการของ AFM ต่างกันเพียงแค่ C-AFM จะมีการป้อนความต่างศักย์ให้ระหว่างหัวเข็มและชิ้นงานที่ต้องการจะวัด และงานวิจัยนี้จะดำเนินการในโหมด Quantitative Imaging (QI Mode) ดังนั้นหากชิ้นงานนำไฟฟ้า เมื่อหัวเข็มแตะ สัมผัส หรือเข้าใกล้ชิ้นงาน ก็จะทำให้กระแสสามารถไหลได้ครบวงจร จึงสามารถตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของชิ้นงานได้

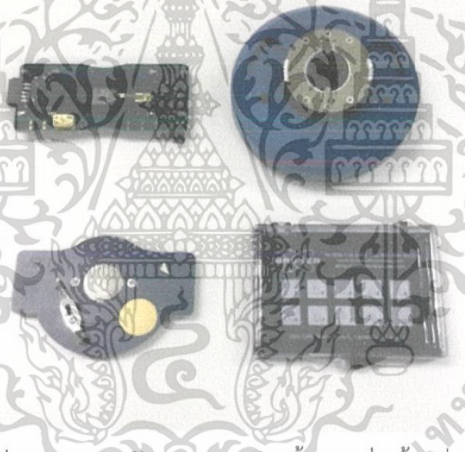
รูปที่ 3.29 เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (C-AFM)

ส่วนประกอบหลักขณะการเตรียมชิ้นงานเพื่อเข้าเครื่อง CAFM (แสดงในรูปที่ 3.30)

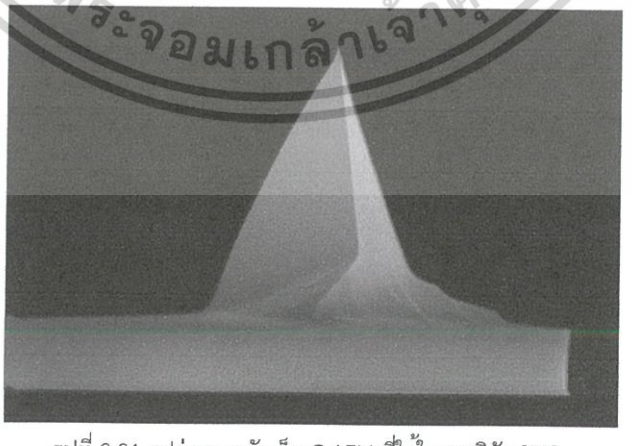
1. บอร์ดวงจร ทำหน้าที่รองรับเข็ม CAFM ที่จะใช้ แล้วเชื่อมต่อวงจรเข้ากับเครื่องมือ
2. คานบีบ ทำหน้าที่จับหรือบีบเข็ม CAFM ไม่ให้เคลื่อนที่ และติดอยู่บนบอร์ดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ฐานวางชิ้นงาน ทำหน้าที่รองรับชิ้นงาน และจะมี Probe ที่มีสมบัตินำไฟฟ้าสำหรับแตะลงที่พื้นผิวด้านหน้าของชิ้นงาน
4. ฐานวางบอร์ดวงจร ทำหน้าที่รองรับบอร์ดวงจร ขณะทำการบรรจุเข็ม CAFM ลงบนบอร์ด
5. เข็ม CAFM เป็นเข็มของบริษัท BRUKER มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (แสดงในรูปที่ 3.31)
    a. Model: SCM-PIT-V2
    b. Material: 0.01-0.025 ohm-cm Antimony (n) doped Si
    c. Cantilever: T = 2.8 um, L= 225 um, f_0 = 75 kHz, k = 3 N/m
    d. Coating:
        i. Front Side = Conductive Pt-Ir
        ii. Back Side = Reflective Pt-Ir
    e. Wafer: A057/03



รูปที่ 3.30 ส่วนประกอบหลักขณะการเตรียมชิ้นงานเพื่อเข้าเครื่อง C-AFM



รูปที่ 3.31 รูปร่างของหัวเข็ม C-AFM ที่ใช้ในงานวิจัย [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 วิธีดำเนินการตรวจสอบ และวัดวิเคราะห์พื้นผิวเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

ในการตรวจสอบ และวัดวิเคราะห์พื้นผิวเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนนั้นจะถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมขั้วนำไฟฟ้าบนผิวหน้าของชั้นฟิล์มบางทองของชิ้นงาน ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและหัวเข็ม C-AFM เพื่อบรรจุเข้าเครื่อง C-AFM และขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบและวัดวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง C-AFM

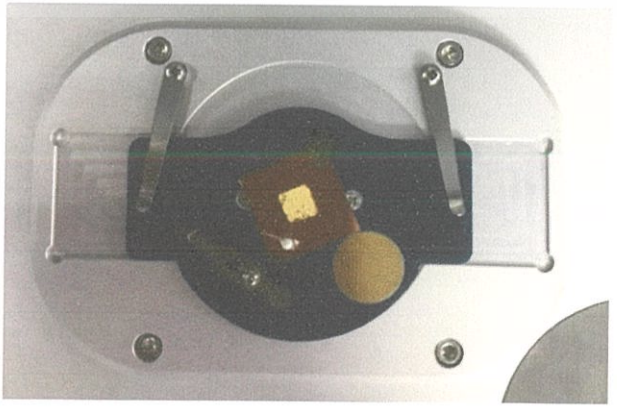
3.3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วนำไฟฟ้าบนผิวหน้าของชั้นฟิล์มบางทองของชิ้นงาน

(1) นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการที่ 1 และกระบวนการที่ 2 เรียบร้อยแล้ว ไปทำความสะอาดด้วยการเป่าบริเวณผิวหน้าด้วยลมไนโตรเจน เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนบริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน

(2) ตัดเส้นลวดให้มีความยาว 3 เซนติเมตร จากนั้นนำเส้นลวดที่ได้มาวางบนผิวหน้าของชิ้นงาน บริเวณส่วนที่เป็นผิวหน้าของฟิล์มบางทอง โดยให้ปลายด้านหนึ่งของเส้นลวดอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางทอง และปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นลวดอยู่บริเวณด้านนอกของชิ้นงาน อาจหาวัสดุอื่น ๆ มารองรับปลายด้านหนึ่งของเส้นลวดที่อยู่บริเวณด้านนอกของชิ้นงาน ให้ยกตัวสูงขึ้นจากพื้น เพื่อให้มีความสูงสมมาตรกับปลายอีกด้านหนึ่งที่อยู่บริเวณด้านบนผิวหน้าของฟิล์มบางทอง

(3) นำไม้จิ้มฟันจุ่มลงในกาวซิลเวอร์ แล้วนำมาแตะบนปลายด้านหนึ่งของเส้นลวดที่อยู่บริเวณบนผิวหน้าของฟิล์มบางทอง โดยแตะให้กาวซิลเวอร์เกาะตัวเป็นปุ่มนูนขึ้นมาและทับอยู่บนเส้นลวด เพื่อให้มีความหนาของกาวเพียงพอที่จะยึดไม่ให้เส้นลวดหลุดออกจากผิวหน้าฟิล์มได้

(4) นำชิ้นงานที่ติดเส้นลวดบนผิวหน้าของฟิล์มบางทองเรียบร้อยแล้ว เข้าไปวางอบให้ความร้อนในเครื่องอบความร้อนในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และปรับค่าการเอียง (Flap) เป็น 100% หลังจากครบตามเวลาให้สังเกตว่าบริเวณที่ติดกาวซิลเวอร์นั้นจะมีลักษณะเป็นสีขาวเทา ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่ากาวซิลเวอร์แห้งตัวแล้ว จากนั้นให้นำชิ้นงานออกมาวางเพื่อลดอุณหภูมิในอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 3.32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

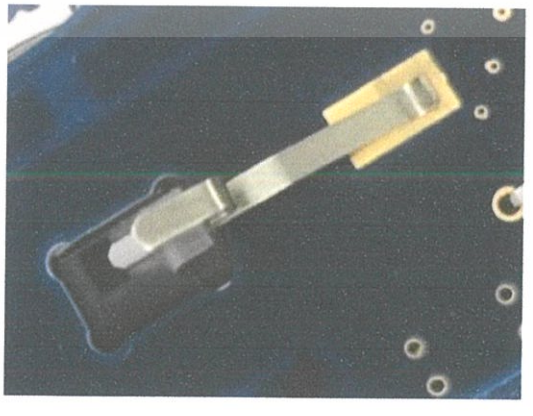
รูปที่ 3.32 ชิ้นงานที่ต่อขั้วนำไฟฟ้าบนผิวหน้าของฟิล์มบางทองเสร็จเรียบร้อยแล้ว

3.3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและหัวเข็ม C-AFM เพื่อบรรจุเข้าเครื่อง C-AFM

(1) วางบอร์ดวงจรลงบนฐานรองรับบอร์ดวงจร โดยให้วางให้สลงล็อกของฐานแล้วเลื่อนปุ่มให้ล็อก (ปุ่มอยู่บริเวณข้างฐาน) เพื่อไม่ให้บอร์ดวงจรเคลื่อนที่ โดยให้ฝั่งที่มีช่องต่อสายไฟชี้ขึ้นไปทางด้านบนของฐานรองรับ จากนั้นค่อย ๆ คีบเข็มมาวางบนบอร์ดวงจร (ระวังอย่าให้เข็มตก หากเข็มตก จะเสียหายแล้วไม่สามารถนำมาใช้งานได้อีก) โดยให้ปลายเข็มที่มีคานชิ้นเล็ก ๆ ปรากฏอยู่วางยื่นออกมาถึงบริเวณที่โปร่งใสพอประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.33

รูปที่ 3.33 การวางเข็ม C-AFM ลงบนบอร์ดวงจร

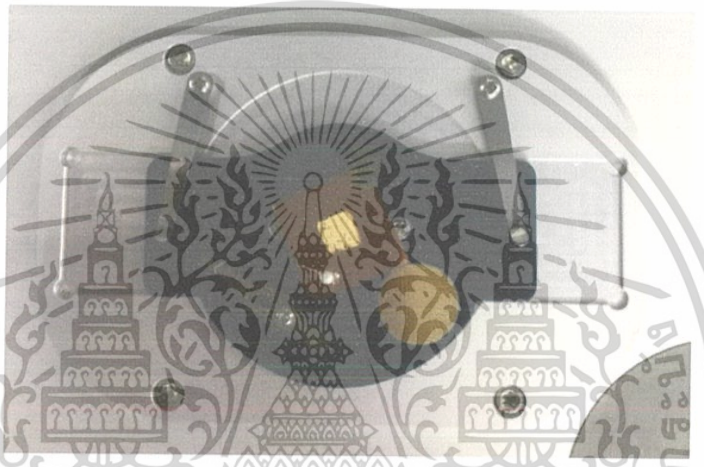
(2) คีบคานบีบขึ้นมาประกบทับลงไปบนเข็ม โดยระวังไม่ให้คานบีบ ปัดหรือดีดเข็มขณะทำการประกบ ซึ่งควรบีบให้ปากคานบีบอ้าให้กว้างที่สุด แล้วจึงค่อย ๆ สอดคานบีบเข้าไปประกบกับหัวเข็ม จากนั้นจึงค่อย ๆ ปล่อยคานบีบให้บีบลงไปทับกับเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.34 การสอดคานบีบเข้าไปประกบกับเข็ม C-AFM

(3) นำชิ้นงานที่ต่อขั้วไฟฟ้าเสร็จแล้วมาวางบนฐานวางชิ้นงาน โดยสามารถใช้เทปกาวแปะบริเวณขอบของชิ้นงานกับฐานรองรับ เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ หลังจากนั้นให้เลื่อน Probe ที่อยู่บนฐานรองรับ มาแตะกับปลายอีกข้างหนึ่งของเส้นลวดที่ต่อออกมาจากผิวหน้าฟิล์มบางทองบนชิ้นงาน แล้วจึงใช้ไขควงหกเหลี่ยมไขลงบน Probe ให้แน่นและแตะกับปลายเส้นลวด ดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 การวางชิ้นงานลงบนฐานวางชิ้นงาน

(4) หลังจากที่วางชิ้นงานลงบนฐานวางชิ้นงานแล้ว ให้นำมัลติมิเตอร์มาวัดคร่อมตามจุดต่าง ๆ เพื่อเช็คการนำไฟฟ้า โดยให้วัดคร่อมระหว่าง ผิวหน้าฟิล์มทองและเส้นลวด ผิวหน้าฟิล์มทองและ Probe ผิวหน้าฟิล์มทองและขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับ Probe ซึ่งถ้าหากวัดทั้ง 3 เงื่อนไขนี้แล้วแสดงการนำไฟฟ้า จึงจะสามารถเตรียมนำอุปกรณ์ชุดนี้เข้าบรรจุในเครื่อง C-AFM ได้

(5) นำอุปกรณ์ของชิ้นงานวางลงบนแท่นวางชิ้นงานของเครื่อง C-AFM แล้วจึงนำบอร์ดวงจรและฐานรองรับวงจรวางลงบนแท่นวางฐานรองรับวงจรเช่นกัน เสร็จแล้วให้เลือกพื้นที่ที่ต้องการจะทำการตรวจสอบ จากนั้นปรับโฟกัส และปรับตำแหน่งของแสงเลเซอร์ให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.3 ขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบและวัดวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง C-AFM

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับงานวิจัยนี้ โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโปรแกรมการวัดวิเคราะห์ของเครื่องมือ C-AFM เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ทั้งข้อมูลทางสัณฐานวิทยา และข้อมูลแผนภาพการนำไฟฟ้าบนผิวหน้าของชั้นฟิล์ม ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญและจำเป็นต่อการวัดวิเคราะห์ของ C-AFM มีดังนี้

(1) Feedback Control
   a. IGain
   b. PGain
   c. Setpoint
(2) Quantitative Imaging Control
   a. Setpoint
   b. Z Length
   c. Extend Time
   d. Retract Time
(3) Grid (Square Image)
   a. Fast
   b. Slow
   c. X Offset
   d. Y Offset
   e. Grid Angle
   f. Pixels
   g. Pixel Ratio
(4) Advanced Settings
   a. Update Time or Speed
   b. Extend Sample Rate
   c. Extend Time
   d. Extend Speed
   e. Retract Sample Rate
   f. Retract Time
   g. Retract Speed
   h. Add. Retract
   i. Motion Time
   j. Acceleration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k. Baseline

l. Adjust Baseline

m. Next Line Delay

n. Next Line Retract

(5) Voltage Output Settings

a. Working Voltage

พารามิเตอร์ด้านบนเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อข้อมูลที่ต้องการ ซึ่งหากกำหนดค่าได้ไม่ถูกต้องหรือเหมาะสม จะส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มามีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้มีค่าที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่ข้อมูลที่แม่นยำ และสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

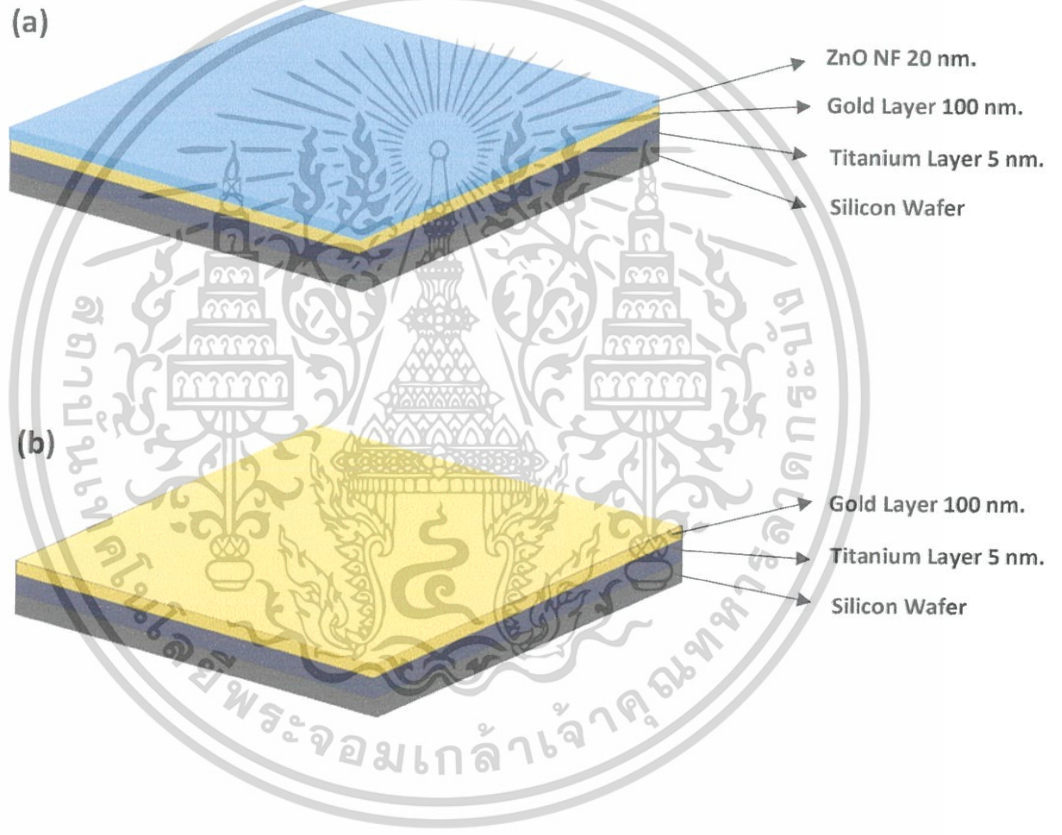
ในผลการทดลองของงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยผลการทดลองจาก 3 กระบวนการ อ้างอิงจากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 คือ กระบวนการที่ 1 กระบวนการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงชั้นต้นกำเนิดซิงค์ออกไซด์ กล่าวคือ ในการทดลองจะสร้าง 2 เงื่อนไข คือ การใช้ชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และการไม่ใช้ชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เป็นชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน เพื่อศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา และส่วนประกอบภายในเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากนั้นจึงเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดเพื่อนำเข้าสู่การทดลองการวัดสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน กระบวนการที่ 2 กระบวนการตรวจสอบเบื้องต้นเพื่อระบุลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างของส่วนประกอบบนชิ้นงาน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงาน กระบวนการนี้จะตรวจวัดลักษณะของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบระหว่าง 2 เงื่อนไขที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นในกระบวนการที่ 1 เพื่อระบุและตรวจสอบการเกิดขึ้นของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ รวมไปถึงการตรวจสอบการปนเปื้อนจากอะตอมหรือโมเลกุลอื่นภายนอกที่อาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ถูกตรวจวัดในกระบวนการนี้ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น จะถูกนำไปใช้ในการตั้งค่ากระบวนการวัดในกระบวนการที่ 3 เพื่อให้ได้ข้อมูลการวัดวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ กระบวนการที่ 3 การตรวจสอบ และการวัดวิเคราะห์พื้นผิวเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนเพื่อศึกษาสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการนี้เป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย จะดำเนินการตรวจวัดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนเพื่อตรวจสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา และตรวจสอบสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ในด้านการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้า (C-AFM) จากนั้นจะสามารถสร้างแบบจำลอง Electronic Band Diagram ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนนี้ได้ ซึ่งผลการทดลองทั้ง 3 กระบวนการที่กล่าวมาด้านบน จะแสดงผลและอภิปรายดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการเตรียมและสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

4.1.1 การสร้างชั้นฐานรองรับก่อนเข้ากระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการตรวจสอบผิวหน้าของฐานรองรับก่อนกระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ของทั้งสองเงื่อนไขการสังเคราะห์ กล่าวคือ เงื่อนไขการใช้ชั้นต้นกำเนิดซิงค์ออกไซด์ และเงื่อนไขการไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดซิงค์ออกไซด์ ตามแบบจำลองด้านล่าง เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนจากธาตุหรือส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ และการปนเปื้อนนี้อาจส่งผลต่อการวัดประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน

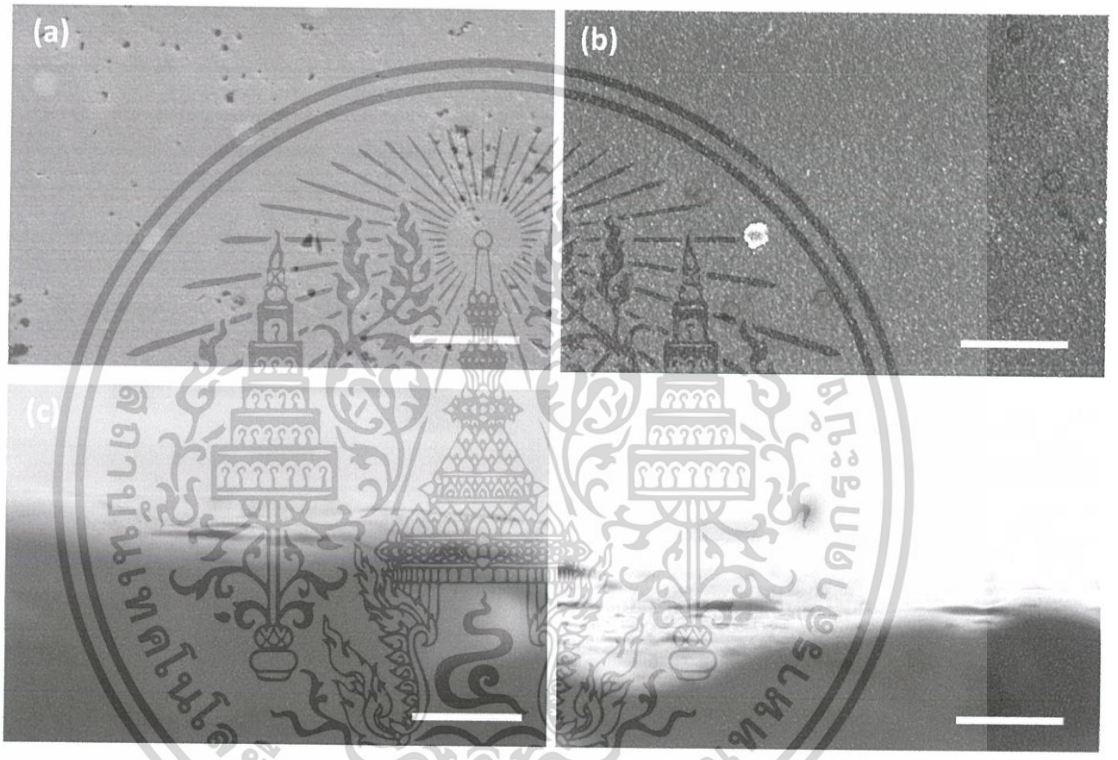


รูปที่ 4.1 การจำลองการสร้างชั้นฐานรองรับก่อนเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน (a) เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะประกอบไปด้วย 4 ชั้นจากล่างขึ้นบน คือ Silicon, Titanium, Gold, และ ZnO NF ที่มีความหนาเป็น 2 มม., 5, 100, และ 20 นาโนเมตร ตามลำดับ และ (b) เงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะประกอบไปด้วย 3 ชั้นจากล่างขึ้นบน คือ Silicon, Titanium, และ Gold ที่มีความหนาเป็น 2 มม., 5, และ 100 นาโนเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

โดยจะตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานจากทั้งสองเงื่อนไขด้วยเครื่องมือ Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) เพื่อระบุการเกิดขึ้นของชั้น Titanium, Gold, และ ZnO Nanofilm (ZnO-NF) ของเงื่อนไขที่ 1 และระบุการเกิดขึ้นของชั้น Titanium, และ Gold ของเงื่อนไขที่ 2 ว่ามีการเกิดขึ้นด้วยความหนาที่ใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์หรือไม่ ด้วยภาพด้านบน (Top View) และภาพตัดขวาง (Cross-section View)



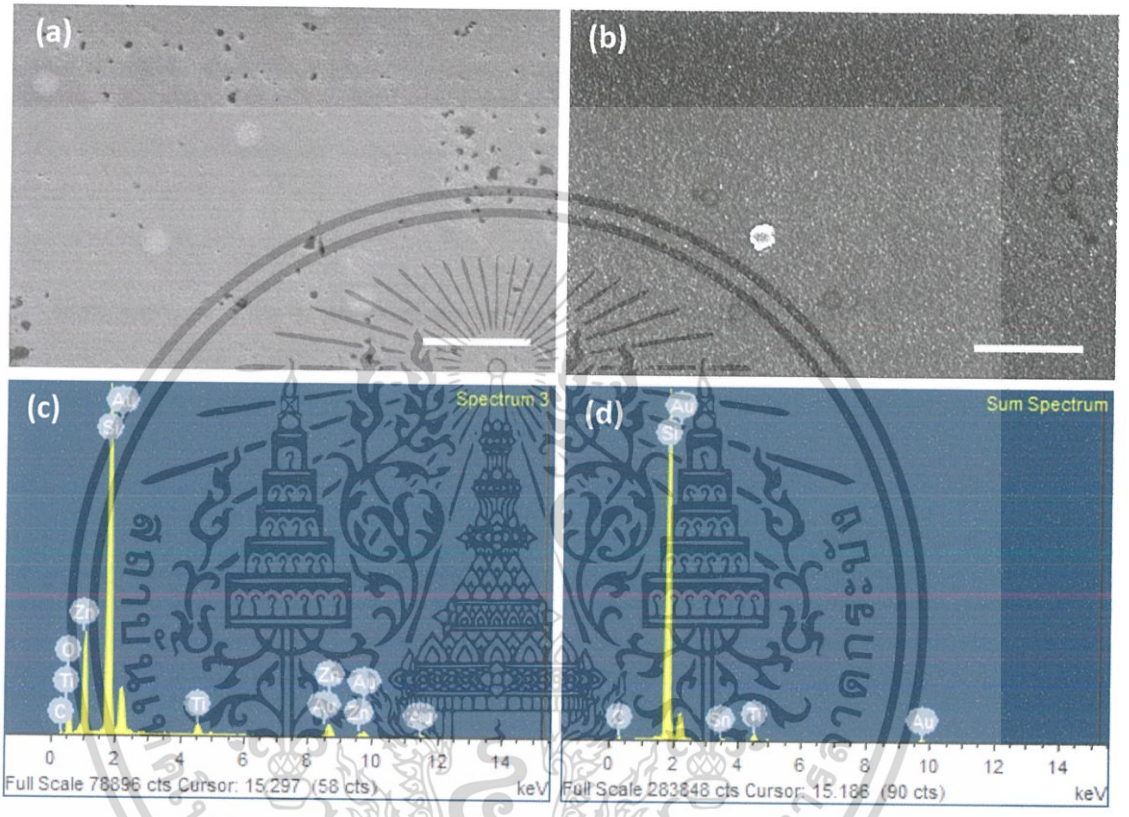
รูปที่ 4.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (a) และ (c) ในรูปแบบ Top View และ Cross-Section View ตามลำดับ ของเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในขณะเดียวกัน (b) และ (d) เป็นรูปแบบ Top View และ Cross-Section View ตามลำดับ ของเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ โดยความยาวของ Scale Bar ในแต่ละรูป คือ 1 ไมโครเมตร

จะพบว่าชิ้นงานจากทั้งสองเงื่อนไข มีลักษณะภายนอกทั่วไปหากมองผ่านผลการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ FE-SEM แล้วจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน อาจแตกต่างกันเพียงในด้านของสีที่ปรากฏขึ้นในภาพที่ตามองเห็น และความขรุขระของพื้นผิวหน้า แต่ยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าชั้นที่พบนั้นเป็นชั้นของวัสดุชนิดใด ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองต่อด้วยเครื่องมือชนิดถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงาน

โดยจะตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานจากทั้งสองเงื่อนไขด้วยเครื่องมือ Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) เพื่อระบุส่วนประกอบที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานแต่ละเงื่อนไข ซึ่งส่วนประกอบที่ตรวจวัดได้ต้องมีความสัมพันธ์กันกับส่วนประกอบที่เกิดขึ้นขณะสร้างฐานรองรับของแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 4.3 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงาน (a) และ (c) เป็นภาพการเปรียบเทียบระหว่างภาพ SEM และกราฟแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน ตามลำดับ ของเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ขณะเดียวกัน (b) และ (d) เป็นภาพการเปรียบเทียบระหว่างภาพ SEM และกราฟแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน ตามลำดับ ของเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน โดยความยาวของ Scale Bar ในรูป (a,b) คือ 1 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a)

Element	% Weight	% Atomic
C	5.33	13.95
O	17.00	33.41
Si	35.65	39.91
Ti	3.05	2.00
Zn	14.03	6.75
Au	24.94	3.98

(b)

Element	% Weight	% Atomic
C	10.58	28.28
Si	56.52	64.60
Ti	3.37	2.26
Sn	0.48	0.13
Au	29.05	4.73

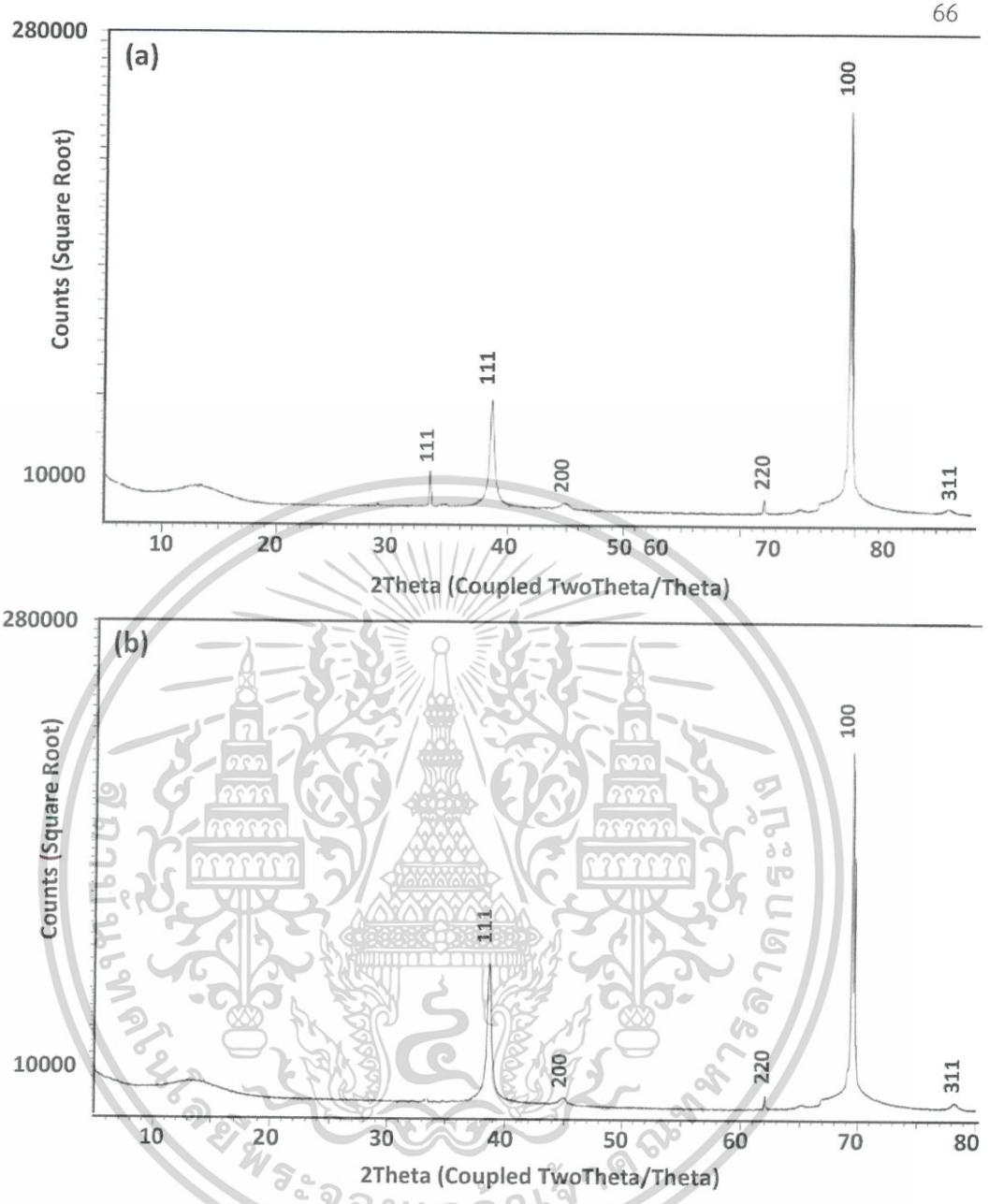
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน (a) ในเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และ (b) ในเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน โดยการแปรผลมาจากกราฟในรูปที่ 4.3(c,d) ตามลำดับ

ซึ่งจากผลการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ EDS ด้านบน พบว่าเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน มีส่วนประกอบของธาตุ Silicon (Si), Titanium (Ti), Gold (Au), Zinc (Zn), และ Oxygen (O) ตรงตามวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่ไม่เพียงแต่มีเฉพาะธาตุที่กล่าวไปทางด้านบนทั้ง 5 ธาตุ แต่ยังพบธาตุอื่น เช่น Tin (Sn) หรือ Carbon (C) ที่ถูกตรวจพบเป็นหนึ่งในส่วนประกอบทั้งหมดในชิ้นงานที่เงื่อนไขนี้ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะพบว่ามีส่วนประกอบของธาตุ Silicon (Si), Titanium (Ti), และ Gold (Au) ตรงตามวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และยังตรวจพบธาตุอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนสังเคราะห์เช่นเดียวกันกับเงื่อนไขแรก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมาคล้ายคลึงกันทั้งสองเงื่อนไข จึงเป็นข้อสรุปได้ว่า ธาตุอื่นที่ถูกตรวจพบและไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ อาจมาจากการปนเปื้อนขณะชิ้นงานอยู่ในเครื่องมือวัดหรือขณะเคลื่อนย้าย ซึ่งจากปริมาณที่เล็กน้อยนี้จึงทำให้เราสามารถมองข้ามผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของชิ้นงานจากธาตุเหล่านี้ได้

4.1.1.3 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของวัสดุ

เนื่องด้วยวิธีการตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยเครื่องมือ EDS นั้น พบว่ามีการปนเปื้อนจากธาตุชนิดอื่นที่ไม่อยู่ในกระบวนการสร้างชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือให้กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ EDS จึงต้องใช้การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานอีกครั้ง ด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งจะเป็นการแสดงผลการตรวจวัดออกมาในรูปแบบระนาบของธาตุที่ประกอบอยู่บนชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของเครื่อง XRD (a) เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และ (b) เงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าชิ้นงานทั้งสองชิ้นจากทั้งสองเงื่อนไขถูกตรวจพบส่วนประกอบที่ประกอบอยู่บนชิ้นงานด้วยเครื่องมือ XRD และส่วนประกอบที่ถูกตรวจพบของทั้งสองชิ้นเป็นส่วนประกอบหลักที่ถูกตรวจพบด้วยเครื่องมือ EDS กล่าวคือ บนชิ้นงานที่สร้างด้วยเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะตรวจพบระนาบของ Silicon (100), Titanium (111 และ 200), Gold (220 และ 311), และ Zinc Oxide (111) ซึ่งทั้งหมดนี้ถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักของชิ้นงานในเชิงปกติ ในขณะเดียวกัน บนชิ้นงานที่สร้างด้วยเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้น

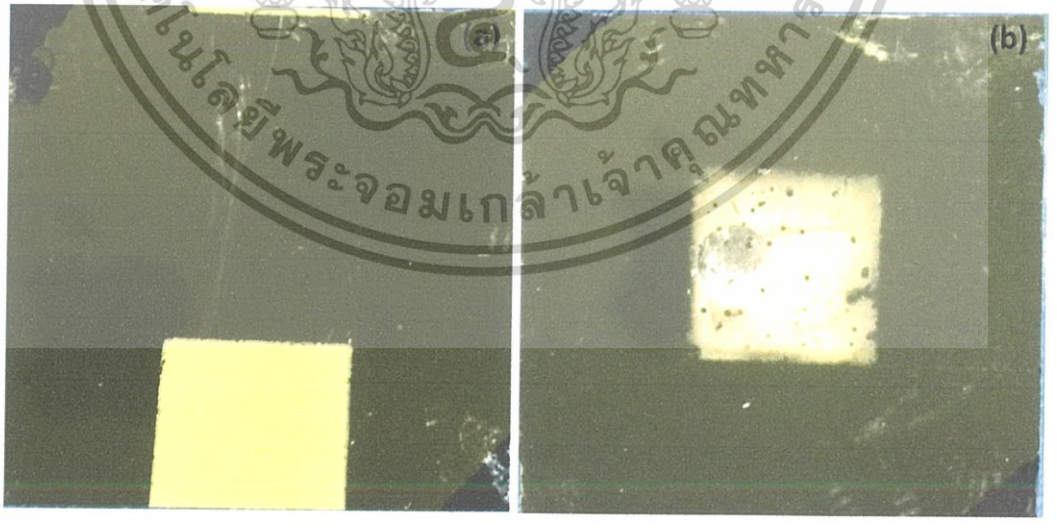
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดซิงค์ออกไซด์ ก็จะตรวจพบระนาบของ Silicon (100), Titanium (111 และ 200), และ Gold (220 และ 311) ซึ่งตรงตามผลที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ EDS เช่นเดียวกันกับเงื่อนไขแรก แต่ผลการตรวจวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง XRD ของทั้งสองเงื่อนไขนี้ ไม่พบระนาบของธาตุที่ไม่เกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างชิ้น นั่นคือ Tin (Sn) และ Carbon (C) จึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของสมมติฐานของการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง EDS ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ธาตุส่วนเกินที่ถูกตรวจพบนั้น มีแหล่งที่มาจากเครื่องมือวัดที่ดำเนินการวัดขณะนั้น ๆ มิได้เป็นผลมาจากการปนเปื้อนจากบรรยากาศภายนอก

ดังนั้น จากผลการตรวจสอบชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่กล่าวมาทั้ง 3 กระบวนการด้านบนนั้น สามารถยืนยันผลลัพธ์ของชิ้นงานได้ว่า ชิ้นงานที่สร้างขึ้นทั้งถูกประกอบไปด้วยธาตุตามวัตถุประสงค์ของการสร้างชิ้นงาน และไม่มีการปนเปื้อนด้วยธาตุชนิดอื่นแต่อย่างใดบนผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งสามารถนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้โดยจะไม่มีค่าความผิดพลาดขณะทำการวัดขั้นต่อไปแต่อย่างใด

4.1.2 การสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ภายหลังการเตรียมฐานรองรับ

ในขั้นตอนนี้เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนจะถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล บนชิ้นงานที่ผ่านการสร้างด้วยสองเงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งก่อนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ขึ้น เราจะเห็นลักษณะทั่วไปของชิ้นงานจากทั้งสองเงื่อนไขที่ปราศจากเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขั้นตอนนี้จึงจะแสดงภาพของชิ้นงานจากทั้งสองเงื่อนไขหลังเสร็จสิ้นกระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพปกติที่สามารถพบได้ด้วยตาเปล่า (a) เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และ (b) เงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

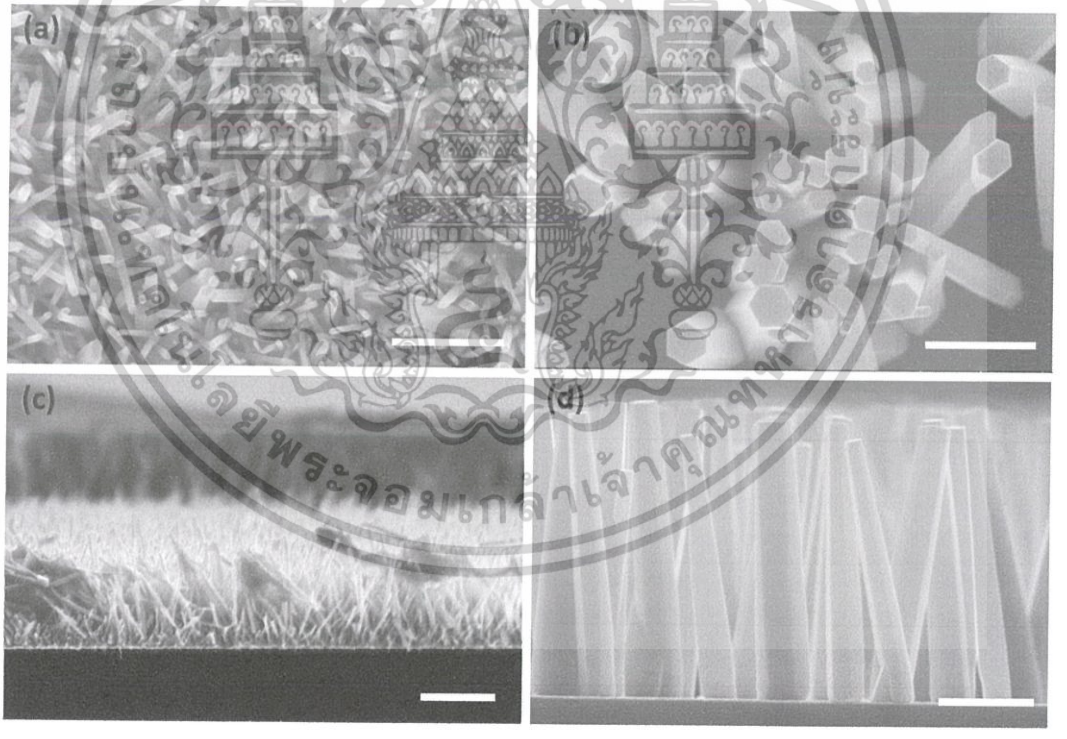
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าทั้งสองเงื่อนไขที่สังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ขึ้น หากมองด้วยตาเปล่าจะพบคราบสีขาวขึ้นอยู่ตามบริเวณที่ถูกสร้างเป็นรูปแบบสำหรับการเติบโตของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งก่อนหน้ากระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ยังไม่พบคราบสีขาวเหล่านี้ จึงสามารถสันนิษฐานได้ว่า คราบที่ขาวที่เกิดขึ้นเป็นเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แต่การตรวจสอบการเกิดขึ้นของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในเบื้องต้นจะถูกยกไปกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2 ผลการตรวจสอบเบื้องต้นของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่เกิดขึ้น

4.2.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

โดยจะตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จากทั้งสองเงื่อนไขด้วยเครื่องมือ Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) เพื่อระบุสมบัติเชิงกายภาพทั่วไปของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ เช่น ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนาแน่น เป็นต้น ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกันด้วยภาพ Top View และ Cross-Section View



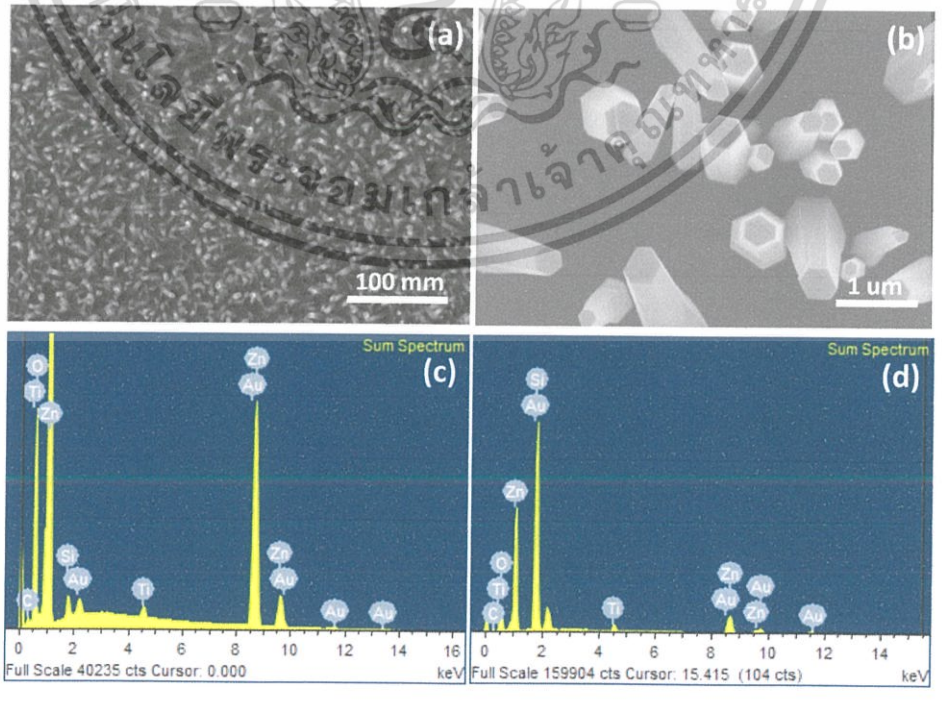
รูปที่ 4.6 เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM ที่กำลัง 20 kV. ของ (a) และ (c) เป็นเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ด้วยภาพ Top View และ Cross-Section View ตามลำดับ ในขณะเดียวกัน (b) และ (d) เป็นเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ด้วยภาพ Top View และ Cross-Section View ตามลำดับ โดยความยาวของ Scale Bar ในแต่ละรูป คือ 1 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากรูปที่ 4.6(a,c) เป็นภาพเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนของเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น มีลักษณะปลายยอดของแท่งเส้นลวดคล้ายรูปทรงเรขาคณิตแบบหกเหลี่ยม เจริญเติบโตอย่างไม่เป็นระเบียบ มีความหนาแน่นของเส้นลวดสูงในทุกบริเวณของชิ้นงาน มีการเอียงไปมาของเส้นลวดแต่ละแท่งแบบสุ่ม และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์อยู่ในช่วง 20-100 นาโนเมตร ขณะที่ความสูงอยู่ในช่วง 2-2.5 ไมโครเมตร ในขณะเดียวกันรูปที่ 4.6(b,d) เป็นภาพเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนของเงื่อนไขที่ไม่ใช้ต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น มีลักษณะปลายยอดของแท่งเส้นลวดคล้ายรูปทรงเรขาคณิตแบบหกเหลี่ยมเช่นเดียวกันกับเงื่อนไขแรก มีการเจริญเติบโตในลักษณะแบบการจับกลุ่ม ความหนาแน่นของเส้นลวดต่ำ กล่าวคือ บางบริเวณมีเส้นลวดเกิดขึ้นเป็นกลุ่ม แต่บางบริเวณก็ไม่มีเส้นลวดเกิดขึ้น จึงกลายเป็นบริเวณว่างเปล่า พบแต่เพียงชั้นทองกฎขึ้น เส้นลวดส่วนใหญ่ที่ตรวจพบมีลักษณะเป็นแท่งตรง มีเพียงส่วนน้อยที่มีลักษณะแท่งเอียงไขว้กันไปมา แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดจะใหญ่ถึง 200-500 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าเส้นลวดที่ถูกสังเคราะห์ด้วยเงื่อนไขแรกกว่า 3-4 เท่า ขณะที่ความสูงอยู่ในช่วง 2-3 ไมโครเมตร

4.2.2 การตรวจสอบส่วนประกอบบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

หลังจากฐานรองรับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ถูกตรวจสอบส่วนประกอบแล้วด้วยเครื่องมือ EDS ผลปรากฏว่าไม่พบการปนเปื้อนจากธาตุอื่นใดบนผิวหน้าของฐานรองรับ ดังนั้นภายหลังการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์เรียบร้อยแล้ว จึงควรตรวจสอบส่วนประกอบบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จากฐานรองรับที่สร้างมาจากทั้งสองเงื่อนไขด้วยเครื่องมือ EDS อีกครั้ง เพื่อระบุส่วนประกอบที่เกิดขึ้นหรือปนเปื้อนในบริเวณที่เกิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ซึ่งส่วนประกอบที่ตรวจวัดได้ต้องมีความสัมพันธ์กันกับส่วนประกอบที่เกิดขึ้นขณะสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ของแต่ละเงื่อนไข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 การตรวจสอบส่วนประกอบบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ (a) และ (c) เป็นรูปการเปรียบเทียบระหว่างรูป SEM และกราฟแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน ตามลำดับ ของเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ขณะเดียวกัน (b) และ (d) เป็นรูปการเปรียบเทียบระหว่างภาพ SEM และกราฟแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน ตามลำดับ ของเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

(a)

Element	% Weight	% Atomic
C	3.36	10.02
O	21.88	48.93
Si	1.13	1.44
Ti	0.81	0.61
Zn	70.49	38.58
Au	2.33	0.42

(b)

Element	% Weight	% Atomic
C	4.72	12.33
O	17.71	34.72
Si	32.70	36.51
Ti	1.97	1.29
Zn	25.94	12.45
Au	16.95	2.70

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงอัตราส่วนของส่วนประกอบบนชิ้นงาน (a) ในเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และ (b) ในเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน โดยการแปรผลมาจากกราฟในรูปที่ 4.3(c,d)

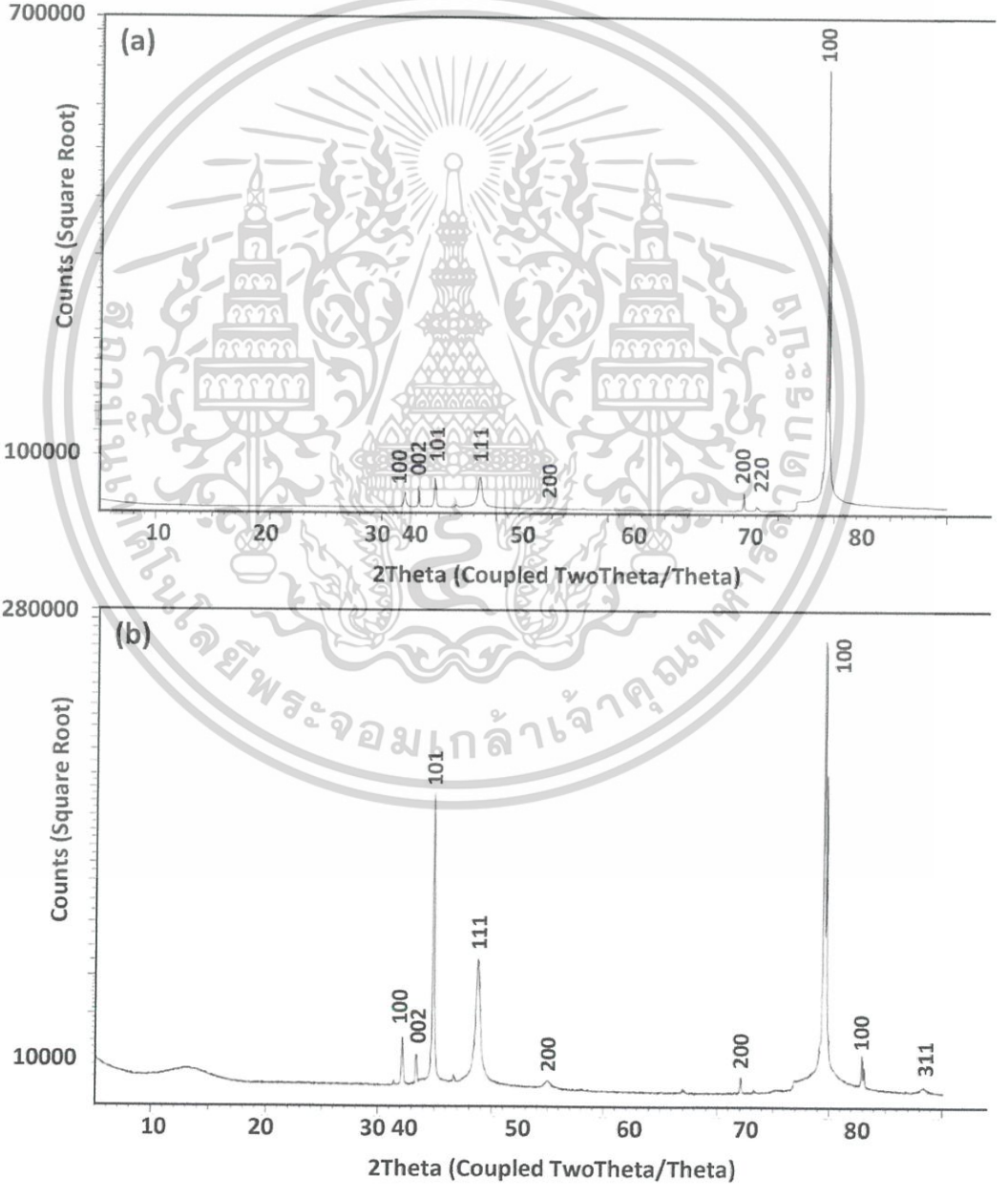
ซึ่งจากผลการตรวจสอบด้วยเครื่องมือ EDS ด้านบน พบว่าชิ้นงานที่สร้างด้วยเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน มีส่วนประกอบของธาตุ Silicon (Si), Titanium (Ti), Gold (Au), Zinc (Zn), และ Oxygen (O) ตรงตามวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่ไม่เพียงแต่มีเฉพาะธาตุที่กล่าวไปทางด้านบนทั้ง 5 ธาตุ แต่ยังพบธาตุอื่น เช่น Carbon (C) ที่ถูกตรวจพบเป็นหนึ่งในส่วนประกอบทั้งหมดในชิ้นงานที่เงื่อนไขนี้ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะพบว่ามีส่วนประกอบของธาตุ Silicon (Si), Titanium (Ti), Gold (Au), Zinc (Zn), และ Oxygen (O) ตรงตามวัตถุประสงค์ของการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และยังตรวจพบธาตุอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนสังเคราะห์เช่นเดียวกันกับเงื่อนไขแรก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ออกมาคล้ายคลึงกันทั้งสองเงื่อนไข จึงเป็นข้อสรุปได้คล้ายกับการตรวจวัดก่อนหน้านี้ว่า ธาตุอื่นที่ถูกตรวจพบและไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ อาจมาจากการปนเปื้อนขณะชิ้นงานอยู่ในเครื่องมือวัดหรือขณะเคลื่อนย้าย ซึ่งจากปริมาณที่เล็กน้อยนี้จึงทำให้เราสามารถมองข้ามผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับประสิทธิภาพการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไฟฟ้าของชิ้นงานจากธาตุเหล่านี้ได้ และหากจะยืนยันสมมติฐานที่กล่าวมานี้ จึงต้องนำชิ้นงานทั้งสองชิ้นไปตรวจสอบอีกครั้งด้วยเครื่องมือ XRD

4.2.3 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของวัสดุ

เนื่องด้วยวิธีการตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยเครื่องมือ EDS นั้น พบว่ามีการปนเปื้อนจากธาตุชนิดอื่นที่ไม่อยู่ในกระบวนการสร้างชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือให้กับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ EDS จึงต้องใช้การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานอีกครั้ง ด้วยเครื่องมือ X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งจะเป็นการแสดงผลการตรวจวัดออกมาในรูปแบบระนาบของธาตุที่ประกอบอยู่บนชิ้นงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 การตรวจสอบส่วนประกอบบนชิ้นงานด้วยการตรวจจับระนาบของเครื่อง XRD (a) เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน และ (b) เงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าชิ้นงานทั้งสองชิ้นจากทั้งสองเงื่อนไขถูกตรวจพบส่วนประกอบที่ประกอบอยู่บนชิ้นงานด้วยเครื่องมือ XRD และส่วนประกอบที่ถูกตรวจพบของทั้งสองชิ้นเป็นส่วนประกอบหลักที่ถูกตรวจพบด้วยเครื่องมือ EDS กล่าวคือ บนชิ้นงานที่สร้างด้วยเงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะตรวจพบระนาบของ Silicon (100), Titanium (111 และ 200), Gold (200), และ Zinc Oxide (100, 002, และ 101) ซึ่งทั้งหมดนี้ถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักของชิ้นงานในเชิงปกติ ในขณะเดียวกัน บนชิ้นงานที่สร้างด้วยเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ก็จะตรวจพบระนาบของ Silicon (100), Titanium (111 และ 200), Gold (200), และ Zinc Oxide (100, 002, 100, และ 101) ซึ่งตรงตามผลที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือ EDS เช่นเดียวกันกับเงื่อนไขแรก แต่ผลการตรวจวัดชิ้นงานด้วยเครื่อง XRD ของทั้งสองเงื่อนไขนี้ ไม่พบระนาบของธาตุที่ไม่เกี่ยวข้องในกระบวนการสร้างชิ้นงาน นั่นคือ Carbon (C) จึงเป็นการยืนยันความถูกต้องของสมมติฐานของการตรวจสอบชิ้นงานด้วยเครื่อง EDS ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ธาตุส่วนเกินที่ถูกตรวจพบนั้น มีแหล่งที่มาจากเครื่องมือวัดที่ดำเนินการวัดขณะนั้น ๆ มิได้เป็นผลมาจากการปนเปื้อนจากบรรยากาศภายนอก

ดังนั้น หากพิจารณาผลจากการตรวจสอบทั้งสองช่วงที่ผ่านมา คือ ช่วงการสร้างฐานรองรับ และช่วงการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน จากชิ้นงานที่ถูกสร้างมาจากสองเงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จึงสามารถสรุปได้ว่า การทดลองเพื่อศึกษาสภาพการนำไฟฟ้าของชิ้นงานในการทดลองสุดท้ายนี้ เราจะเลือกใช้เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนฐานรองรับที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ไปดำเนินการทดลองต่อ เนื่องจาก หากพิจารณาภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องมือ FE-SEM แล้วนั้น พบว่ามีการไขว้ไปมาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้บริเวณแท่งของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์บางต้นไปสัมผัสกับบริเวณแท่งของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์แท่งอื่น ซึ่งจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์แต่ละแท่ง นอกจากนี้ การเจริญเติบโตของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ยังไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน เป็นการเจริญเติบโตที่ไม่เป็นระเบียบแบบแผนถึงแม้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณยอดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์แต่ละแท่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันก็ตาม และอีกหนึ่งเหตุผล คือ ในการประกอบวงจรไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานที่มีเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เข้ากับเครื่องมือ C-AFM จะมีการต่อขั้วอิเล็กโทรดด้านหนึ่งเข้ากับชั้นทอง และอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับปลายเข็มที่ใช้ในการตรวจวัด ดังนั้นหากชิ้นงานมีชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์คั่นระหว่างชั้นอิเล็กโทรดทองและแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ สิ่งนี้อาจเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้สภาพการนำไฟฟ้า หรือเส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าแตกต่างออกไปเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนฐานรองรับที่ไม่มีชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์บนฐานรองรับที่ไม่มีชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ เพื่อให้เส้นทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดเป็นแนวตรงข้ามผ่านเฉพาะรอยต่อระหว่างหัวเข็ม C-AFM กับยอดแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และข้ามผ่านโคนแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์กับผิวหน้าของขั้วอิเล็กโทรดทอง ได้โดยตรง

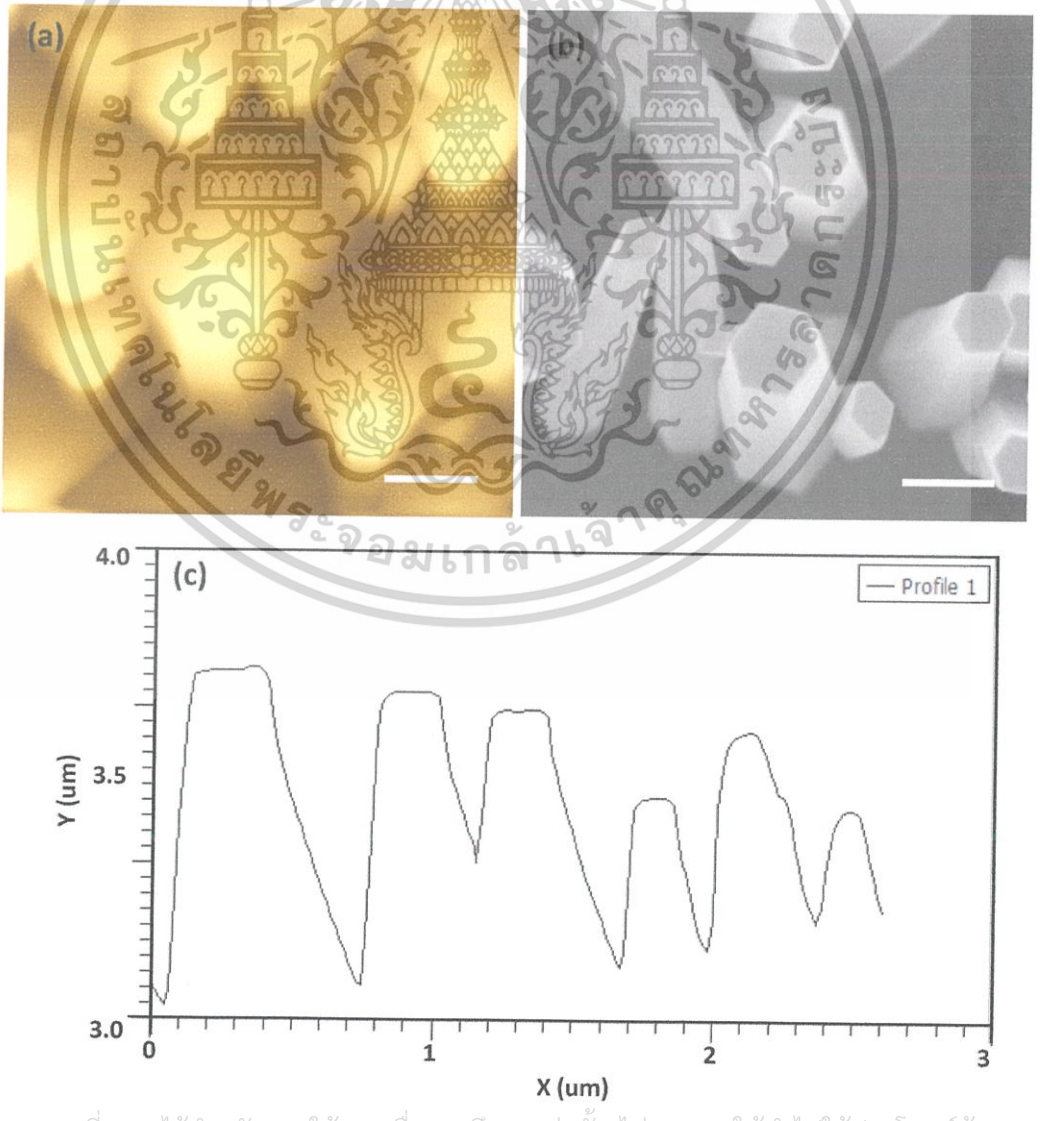
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์บนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

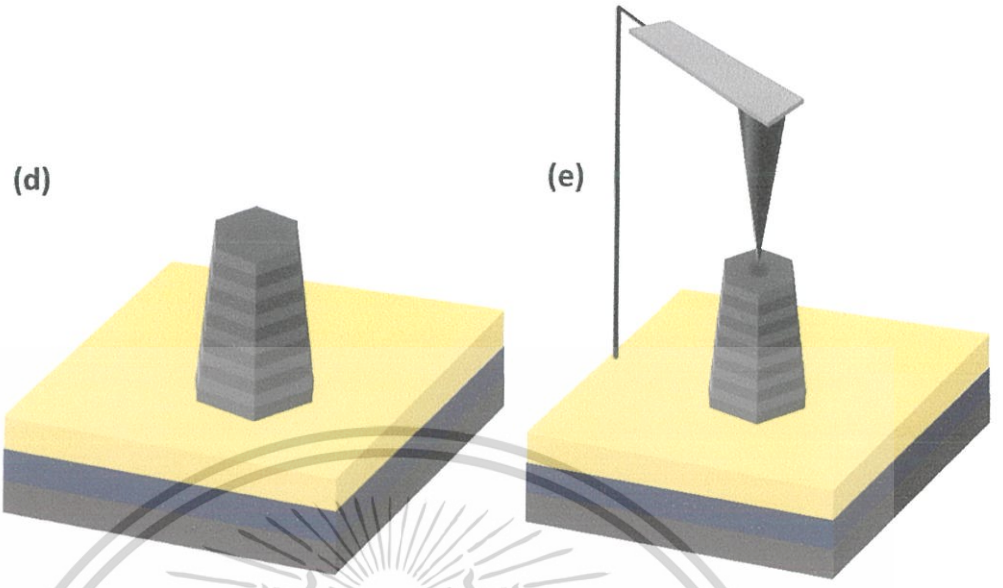
ในขั้นตอนนี้จะนำชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนภายใต้เงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์มาเข้ากระบวนการตรวจสอบสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ หรือที่เรียกว่าสภาพการนำไฟฟ้า โดยชิ้นงานจะถูกดำเนินการภายใต้เครื่องมือวัด Conductive atomic force microscope (C-AFM) ด้วยโหมดการวัดแบบ Quantitative Imaging (QI Mode)

4.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

หลังจากที่ทราบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลภายใต้เครื่องมือ FE-SEM แล้ว เราจะนำชิ้นงานนี้มาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องมือ C-AFM อีกครั้ง เพื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบให้มีความเหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่นำมาตรวจวัดและสามารถตรวจวัดชิ้นงานชนิดนี้ได้แม้ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการสังเคราะห์ นอกจากนี้เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลจากการตรวจสอบด้วยเครื่อง FE-SEM ในการทดลองก่อนหน้านี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



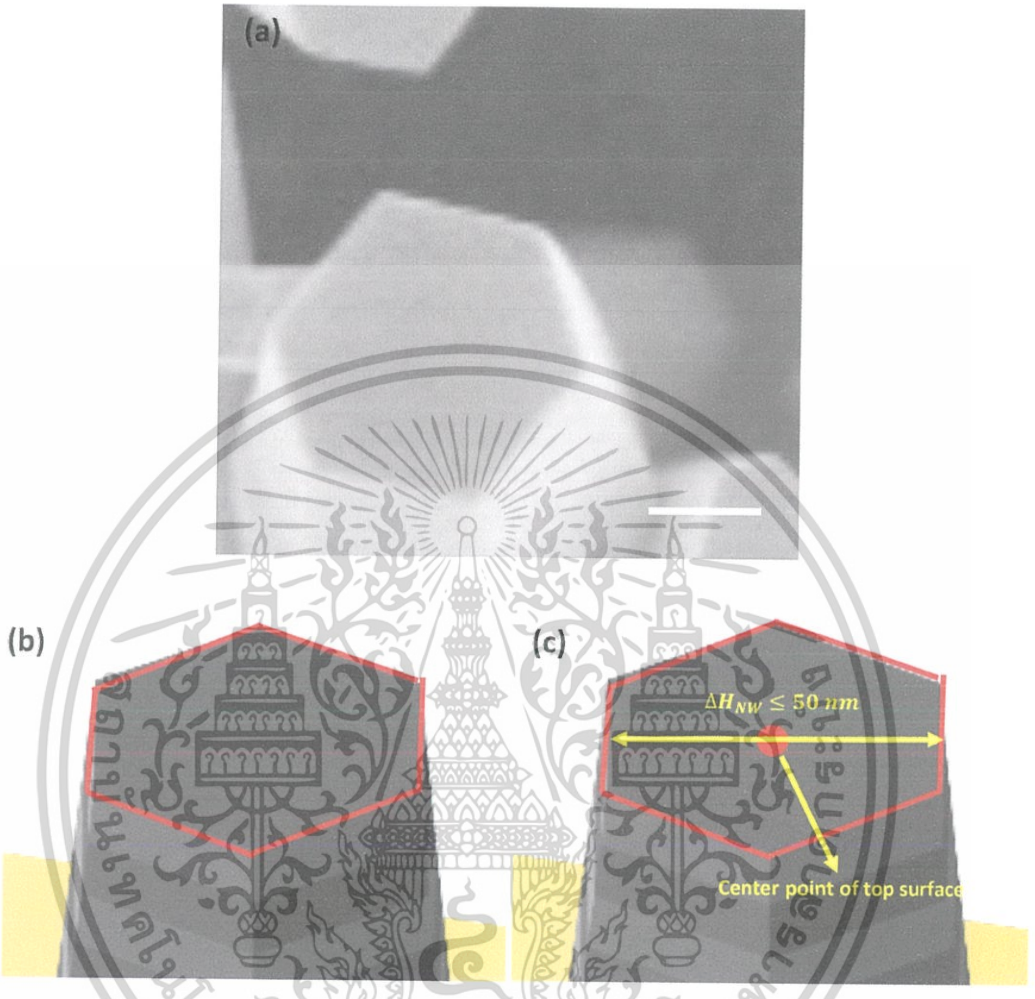
รูปที่ 4.9 (a) ลักษณะภายนอกที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือ C-AFM ในโหมดแบบ QI และสามารถเปรียบเทียบผลกับ (b) ลักษณะภายนอกที่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือ FE-SEM ซึ่งความสูงของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่ตรวจสอบได้ แสดงให้เห็นในรูป (c) จึงสามารถสร้างแบบจำลองลักษณะภายนอกของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ให้เห็นได้ง่ายขึ้นดังรูป (d) และ (e) แสดงการประกอบโครงสร้างการตรวจวัดด้วย C-AFM โดย Scale Bar ของรูป (a,b) คือ 500 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.9 จะสามารถเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจนว่า ผลการตรวจสอบลักษณะภายนอกของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่องมือ FE-SEM และเครื่องมือ C-AFM มีผลคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ จะพบเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะของปลายยอดเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบหกเหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 200-500 นาโนเมตร และความสูงของเส้นลวดอยู่ในช่วง 3-4 ไมโครเมตร มีความหนาแน่นของการเกิดเส้นลวดไม่สม่ำเสมอ บางบริเวณเส้นลวดเกิดขึ้นเป็นกลุ่ม บางบริเวณไม่มีการเกิดขึ้นของเส้นลวด จึงพบเฉพาะพื้นผิวหน้าของชั้นอิเล็กโทรดทองปรากฏขึ้น นอกจากนี้เส้นลวดส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมีการเจริญเติบโตเป็นแนวเส้นตรงตามแนวตั้ง มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มีการเอียงไปมาและทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างเส้นลวดซิงค์ออกไซด์หลาย ๆ ต้น

ในการทดลองขั้นตอนต่อไป จะเป็นการทดลองการตรวจสอบสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์หรือสภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ โดยการทดลองนี้จะแบ่งบริเวณในการตรวจสอบเส้นลวดซิงค์ออกไซด์แต่ละแท่งเป็น 4 บริเวณด้วยกัน คือ พื้นที่ผิวหน้าด้านบนสุด, ขอบด้านบนสุด, พื้นที่ผิวด้านข้าง, และขอบด้านข้าง ซึ่งในแต่ละบริเวณจะถูกนิยามด้วยข้อมูลต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) พื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

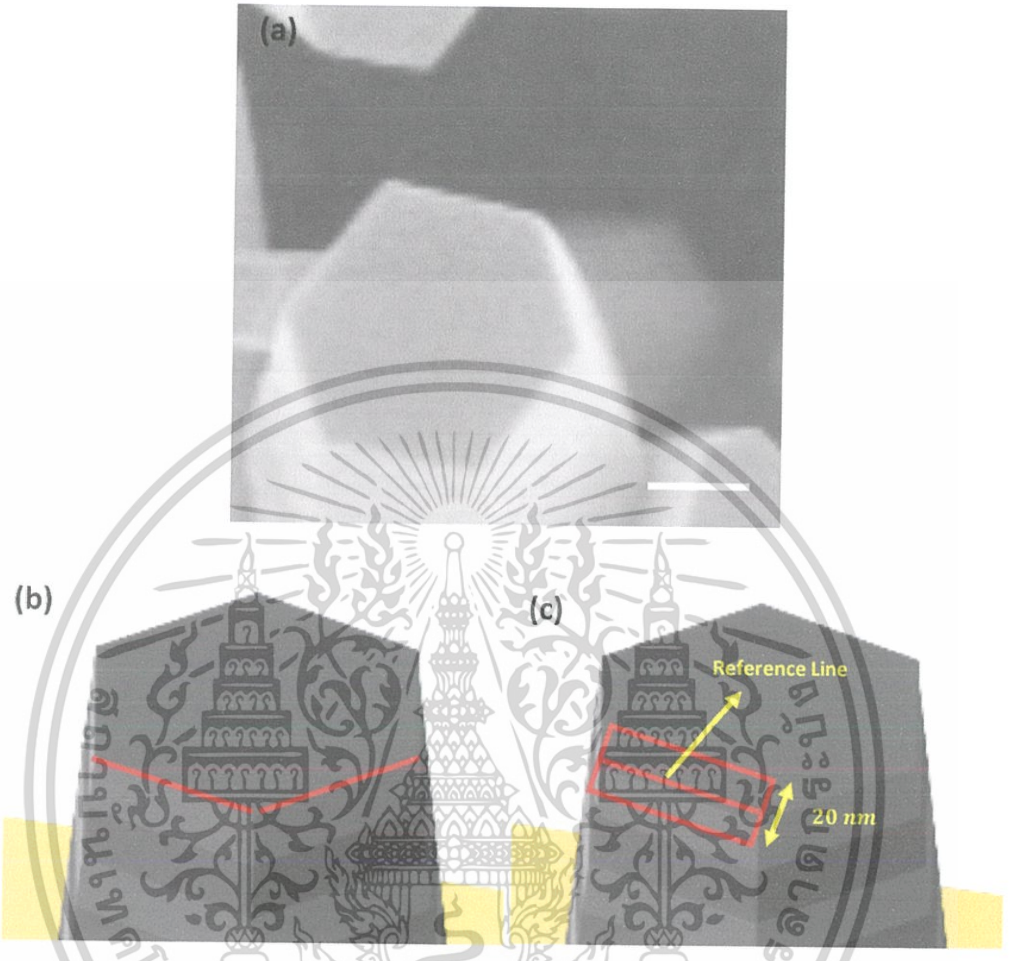


รูปที่ 4.10 (a) รูปบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM ซึ่งมี Scale Bar ขนาด 150 นาโนเมตร (b) เป็นรูปจำลองพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และ (c) รูปจำลองการนิยามศัพท์คำว่า "พื้นที่ผิวด้านบนสุด"

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.10(c) จะต้องกำหนดจุดศูนย์กลางของปลายยอดเส้นลวดก่อน จากนั้นให้ตรวจสอบค่าความสูงของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์บริเวณ ณ จุดศูนย์กลางที่กำหนดไว้เพื่อเป็นจุดอ้างอิง พื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จึงจะต้องเป็นบริเวณที่มีความสูงที่ไม่ควรมากหรือน้อยกว่าความสูง ณ จุดศูนย์กลางเกินกว่า 50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

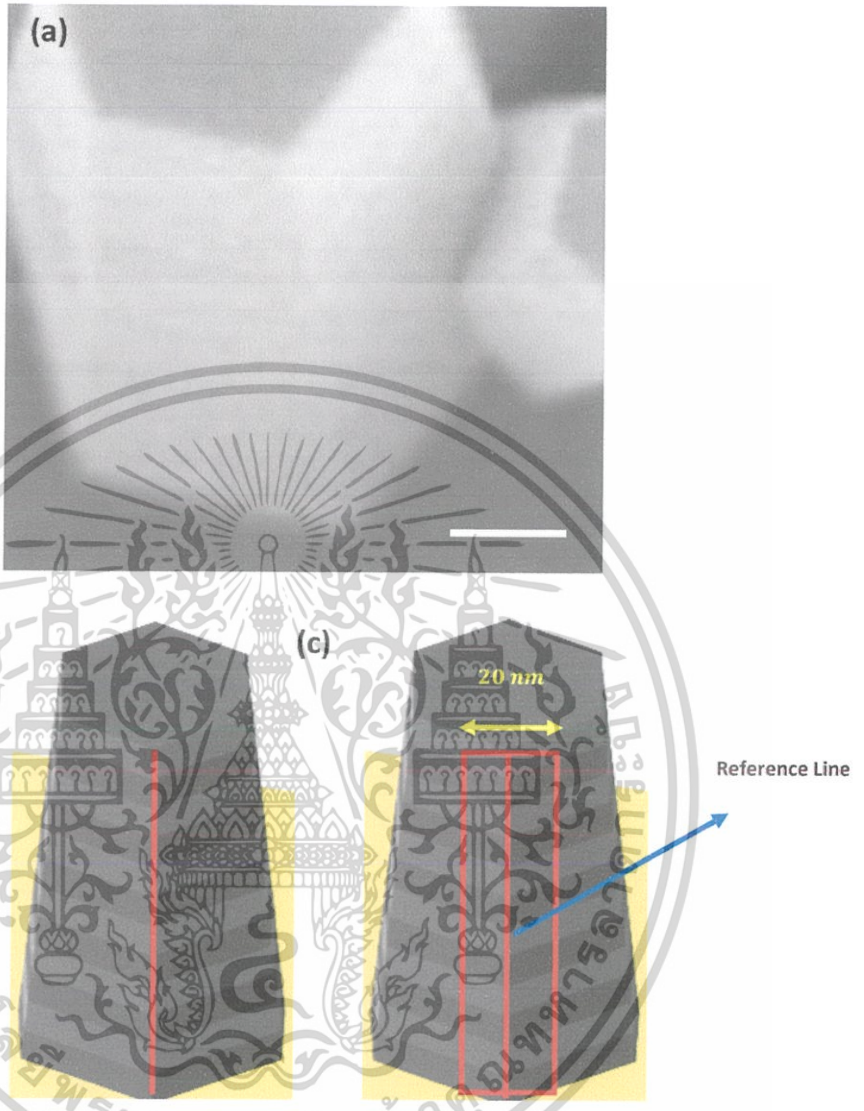


รูปที่ 4.11 (a) รูปบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM โดย Scale Bar มีขนาด 150 นาโนเมตร (b) เป็นรูปจำลองบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และ (c) รูปจำลองการนิยามศัพท์คำว่า "ขอบด้านบนสุด"

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11(a) การที่จะพิจารณาขอบด้านบนสุด ให้กำหนดด้วย Line Profile ของความสูงแท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ โดยให้สร้าง Line Profile จากจุดศูนย์กลางของปลายยอดเส้นลวดไปถึงระยะที่ Line profile ตรวจจับความสูงที่แตกต่างกันเกินกว่า 50 นาโมเมตร ดังนั้นจุดสุดท้ายที่ความสูงของเส้นลวดยังมีค่าไม่เกิน 50 นาโนเมตร จุดนั้นจะเป็นจุดที่แสดงถึงรอยต่อระหว่างพื้นที่ผิวด้านบนสุดกับพื้นที่ผิวด้านข้างเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ หรือขอบด้านบนสุด จากนั้นให้สร้าง Line Profile ด้วยกระบวนการเดิมอีกครั้ง ดั้งนั้นจะเกิดจุดอ้างอิงขึ้นทั้งหมด 2 จุด จึงจะสามารถลากเส้นตรงผ่านจุดสองจุดนั้นเพื่อเป็นเส้นตรงอ้างอิงขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ฉะนั้น การนิยามคำว่าขอบด้านบนสุด คือ ระยะไม่เกินกว่า 10 นาโนเมตร ในทิศทางตั้งฉากกับเส้นตรงอ้างอิงดังรูปที่ 4.11(c) ที่ถูกสร้างขึ้นด้วย Line Profile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ขอบด้านข้าง

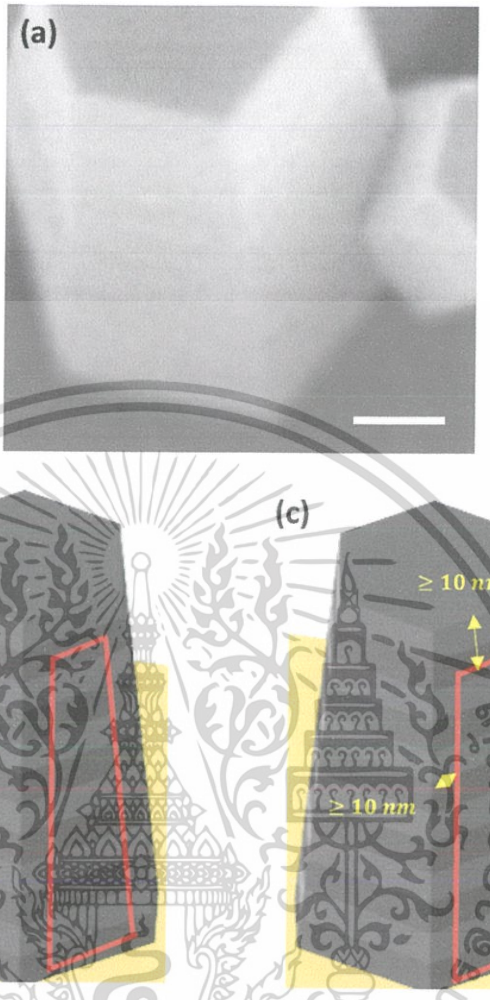


รูปที่ 4.12 (a) รูปบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM ซึ่ง Scale Bar มีขนาด 150 นาโนเมตร (b) เป็นรูปจำลองบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และ (c) รูปจำลองการนิยามศัพท์คำว่า “ขอบด้านข้าง”

ขอบด้านข้างจะถูกนิยามด้วยการลากเส้นตรงตามแนวมุมโค้งของรูปทรงเรขาคณิต ดังรูปที่ 4.12(c) เมื่อได้เส้นตรงที่ลากตามแนวมุมโค้งแล้ว ระยะไม่เกิน 10 นาโนเมตร จากทิศตั้งฉากกับเส้นตรงอ้างอิงจะเป็นพื้นที่บริเวณขอบด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) พื้นผิวด้านข้าง



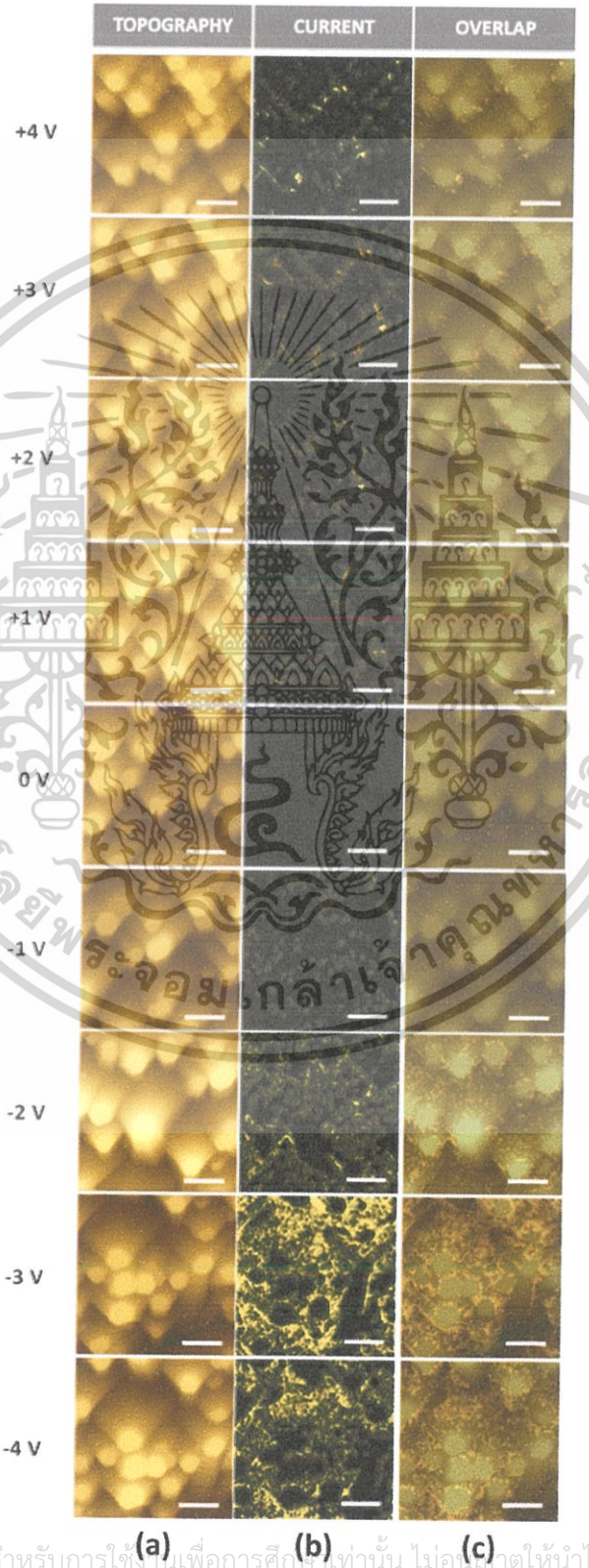
รูปที่ 4.13 (a) รูปพื้นผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ที่ถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM ซึ่ง Scale Bar มีขนาด 150 นาโนเมตร (b) เป็นรูปจำลองบริเวณพื้นผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และ (c) รูปจำลองการนิยามศัพท์คำว่า “พื้นผิวด้านข้าง”

โดยพื้นผิวด้านข้างจะเป็นพื้นที่ที่ไม่ใช่ขอบด้านบนสุดและขอบด้านข้าง ดังนั้นการนิยามพื้นผิวด้านข้างจะนิยามด้วย พื้นที่ที่ถูกปิดล้อมด้วยขอบทั้งสี่ด้าน คือ ขอบด้านบน ขอบด้านซ้าย ขอบด้านขวา และขอบด้านล่าง ขอบด้านบนจะเริ่มตั้งแต่ระยะที่มากกว่า 10 นาโนเมตร เป็นต้นไปจากทิศตั้งฉากกับเส้นตรงอ้างอิงที่บริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขอบด้านซ้ายจะเริ่มตั้งแต่ระยะที่มากกว่า 10 นาโนเมตร เป็นต้นไปจากทิศตั้งฉากกับเส้นตรงอ้างอิงที่บริเวณขอบด้านข้างฝั่งซ้าย ขอบด้านขวาจะเริ่มตั้งแต่ระยะที่มากกว่า 10 นาโนเมตร เป็นต้นไปจากทิศตั้งฉากกับเส้นตรงอ้างอิงที่บริเวณขอบด้านข้างฝั่งขวา และขอบด้านล่างจะเป็นส่วนที่ต่ำสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่สัมผัสกับชั้นอิเล็กโทรดทอง เมื่อกำหนดขอบทั้งสี่ด้านได้แล้ว จะแสดงดังรูปที่ 4.13(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน

การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนนี้ จะดำเนินการภายใต้เครื่องมือ C-AFM ด้วยการป้อนความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทองและปลายเข็ม C-AFM ในช่วง -4 ถึง +4 โวลต์ โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.14 ด้านล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 (a) รูปลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ระหว่างชั้นอิเล็กโทรดทองและหัวเข็ม C-AFM ด้วยค่าความต่างศักย์ในช่วง -4 ถึง +4 โวลต์ ขณะเดียวกันก็จะได้มาซึ่งรูปพื้นที่การนำไฟฟ้า ดังรูป (b) และเพื่อให้สามารถมองเห็นการนำไฟฟ้าในแต่ละบริเวณอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น จึงแสดงรูป (c) ที่เป็นรูปการซ้อนทับกันระหว่างรูปลักษณะทางสัณฐานวิทยาและรูปพื้นที่การนำไฟฟ้า โดยความยาวของเส้น Scale Bar ในแต่ละรูป คือ 500 นาโนเมตร

ในการดำเนินการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ C-AFM แต่ละครั้งนั้น จะได้มาซึ่งผลการตรวจวัดถึง 4 ประเภท พร้อมกัน คือ ภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยา 4.14(a), ภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า 4.14(b), ภาพแสดงความแข็งแรงของวัสดุในแต่ละบริเวณ, และภาพแรงยึดเหนี่ยว โดยภาพแสดงความแข็งแรงและภาพแสดงแรงยึดเหนี่ยวจะยังไม่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ และความละเอียดของภาพที่ตรวจสอบจะสูงถึง 256x256 พิกเซล ด้วยขนาดภาพ 4x4 ตารางไมโครเมตร ดังนั้นในแต่ละพิกเซล (ในปกติแล้วคำว่า "พิกเซล" จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก) จึงมีขนาด 15.625x15.625 ตารางนาโนเมตร อ้างอิงจากสมการด้านล่างนี้

$$Each\ pixel\ size = \frac{Image\ size}{Number\ of\ pixel} \tag{4.1}$$

จึงทำให้เราทราบว่าพิกเซลแต่ละพิกเซลที่มีขนาดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก ที่หัวเข็ม C-AFM กดลงไปที่ชิ้นงานมีขนาดเป็นเท่าใด เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบกับขนาดของหัวเข็ม C-AFM ที่มีลักษณะเป็น Pt-Ir รัศมีปลายเข็มเท่ากับ 25 นาโนเมตร ได้ ด้วยข้อมูลดังกล่าวทำให้เราทราบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนปลายเข็มที่แหลมที่สุดจะมีขนาด 50 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดพิกเซลแต่ละพิกเซลถึง 3.2 เท่า จึงสามารถสรุปได้ว่าปลายเข็มมีพื้นที่สัมผัสกับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์สูงถึง 1.9635 ตารางไมโครเมตร (อ้างอิงจากสูตรคำนวณพื้นที่วงกลม) นอกจากนี้ในขณะที่เข็มกดลงไปในแต่ละพิกเซล จะเกินเนื้อที่ของพิกเซลนั้น ๆ ออกไปถึงพิกเซลทั้ง 8 พิกเซลรอบด้านของพิกเซลที่เข็มกดลงไป

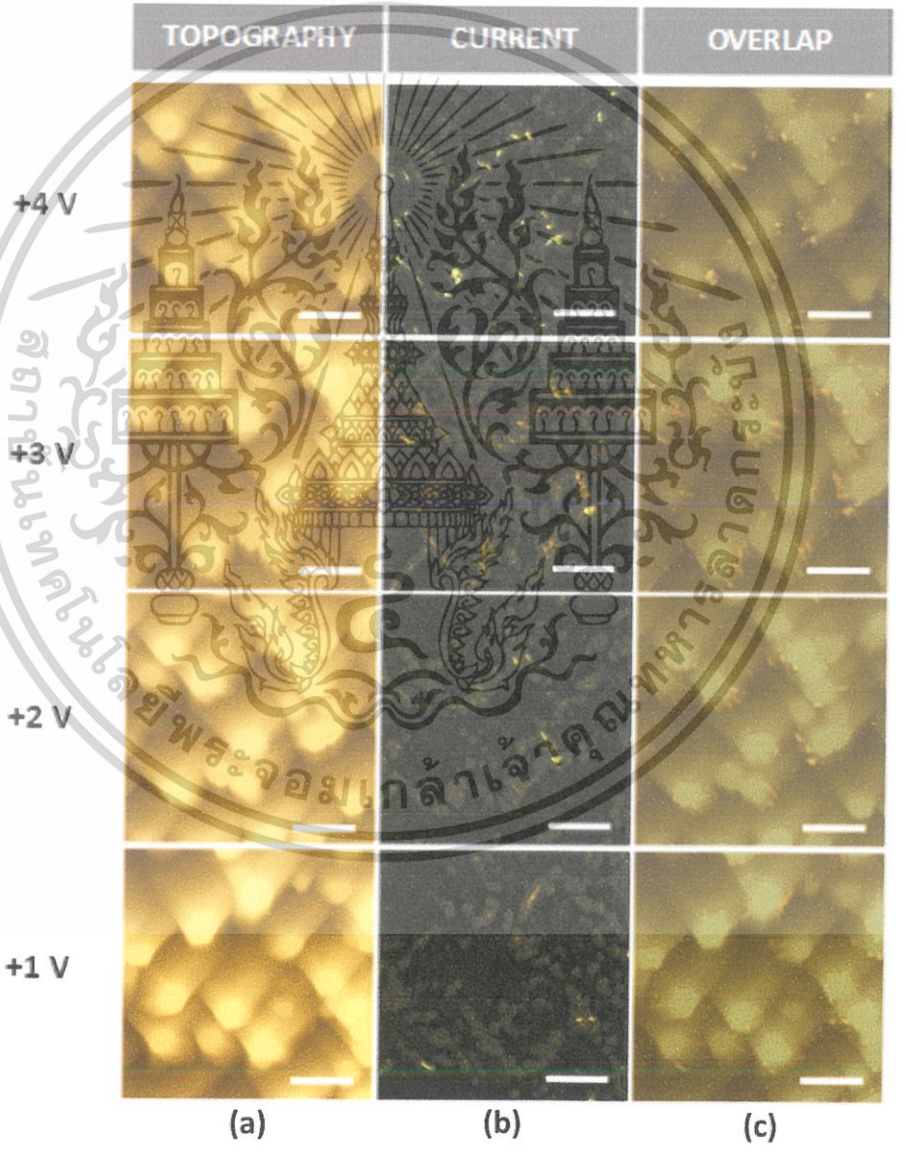
หากพิจารณาทั้งสี่บริเวณที่จะดำเนินการตรวจวัด จะพบว่าบริเวณที่มีพื้นที่น้อยที่สุดจะเป็น ขอบด้านบนสุด และขอบด้านข้าง ซึ่งมีด้านกว้างของพื้นที่ขนาดสี่เหลี่ยมเพียง 20 นาโนเมตร ดังนั้นก็จะสามารถถูกตรวจวัดด้วยหัวเข็ม C-AFM ได้อย่างน้อย 1 พิกเซล (Contained Pixel) และในอีกสองบริเวณสามารถคำนวณจำนวนพิกเซลการตรวจวัดของแต่บริเวณได้จากสมการด้านล่างนี้

$$Contained\ pixel = \frac{Length\ of\ interested\ side}{Each\ pixel\ size} \tag{4.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ภาพแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาในแต่ละความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่ชิ้นงาน จะมีลักษณะเดียวกัน แต่ไม่ใช่บริเวณเดียวกัน เนื่องจาก ขีดจำกัดของเครื่องมือวัดชนิดนี้ในระดับนาโน ไม่สามารถกำหนดพื้นที่การตรวจวัดที่แน่นอนได้ หากเสร็จสิ้นการวัดในแต่ละครั้งแล้ว ถึงแม้ไม่มีเปลี่ยนตำแหน่งใด ๆ การตรวจวัดในครั้งถัดไปก็ไม่สามารถตรวจวัดซ้ำในบริเวณเดิมได้ จึงทำให้บริเวณที่ตรวจวัด เปลี่ยนแปลงไปในทุกการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ แต่หากพิจารณาภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า จะพบว่ามีความสัมพันธ์กับภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาอย่างมีนัยสำคัญ ตามภาพที่ 4.14(c) ซึ่งผลในการตรวจวัดนี้จะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

(1) ผลการตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าบวก (+)



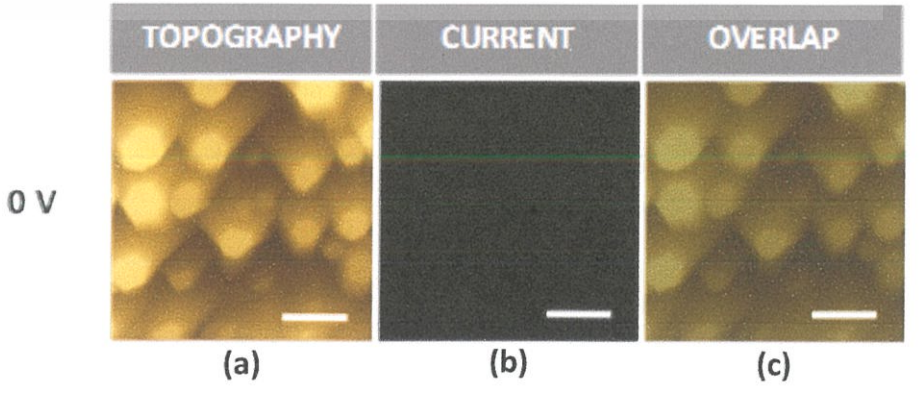
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.15 การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าบวก (+) นำไปสู่การได้มาของ (a) ภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยา (b) ภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า และ (c) ภาพการซ้อนทับกันระหว่างภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาและภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า โดยความยาวของเส้น Scale Bar ในแต่ละรูป คือ 500 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.15(b) จะพบว่าสภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนภายใต้การป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงค่าบวก (+1 ถึง +4 โวลต์) พื้นที่การนำไฟฟ้าจะค่อย ๆ ปรากฏมากขึ้นเมื่อเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้รับความต่างศักย์ด้วยค่าที่สูงขึ้น เมื่อสังเกตที่รูปในความต่างศักย์ +1 โวลต์ พื้นที่การนำไฟฟ้าจะปรากฏให้เห็นเป็นจำนวนน้อย และในบริเวณที่นำไฟฟ้านั้นก็มีค่ากระแสไฟฟ้าที่อยู่ในช่วง 0.1-9 นาโนแอมแปร์ ซึ่งบริเวณที่นำไฟฟ้านี้จะตรงกับบริเวณที่เป็นขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ตามรูปที่ 4.15(c) ขณะที่บริเวณส่วนใหญ่บนชิ้นงานจะเป็นพื้นที่ที่ไม่มีการนำไฟฟ้าแต่อย่างใด นั่นคือ ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 นาโนแอมแปร์ และส่วนที่มีความพิเศษไปกว่านั้น คือ พื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะไม่มีการนำกระแสไฟฟ้าแต่อย่างใด ถึงแม้จะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าที่สูงขึ้นก็ตาม เมื่อกลับมาพิจารณาที่ภาพการนำไฟฟ้าภายใต้การป้อนความต่างศักย์ +2 โวลต์ จะพบว่ามีบริเวณที่นำไฟฟ้ามากขึ้นกว่าชิ้นงานที่ถูกป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +1 โวลต์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้าในบริเวณที่นำไฟฟ้าก็ยังมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-9 นาโนแอมแปร์ แนวโน้มที่พื้นที่การนำไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับความต่างศักย์นี้ถูกสังเกตได้ในช่วงความต่างศักย์ +1 ถึง +3 โวลต์ แต่หากพิจารณาชิ้นงานที่ถูกป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์นั้น จะพบว่ามีพื้นที่การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคล้ายกันกับช่วงความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าที่กล่าวถึงไปก่อนหน้า แต่สิ่งที่พบนอกเหนือจากการเพิ่มพื้นที่การนำไฟฟ้า คือ มีบางบริเวณของพื้นที่การนำไฟฟ้า มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงถึง 119.3 นาโนแอมแปร์ และสังเกตได้ว่าบริเวณเหล่านี้เป็นบริเวณที่เรียกว่าขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่บริเวณอื่น ๆ ภายใต้ความต่างศักย์ +4 โวลต์นี้ ก็ยังให้ค่ากระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1-9 โวลต์เช่นเดิม

ดังนั้นจากผลการตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ค่าบวกนี้ จะพบว่า พื้นที่การนำไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ กล่าวคือ พื้นที่การนำไฟฟ้าหรือความหนาแน่นของบริเวณที่นำไฟฟ้ามีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเมื่อป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าที่สูงขึ้น แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจสอบได้จะไม่แปรผันตามค่าความต่างศักย์ในช่วง +1 ถึง +3 โวลต์ จนกว่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับชิ้นงานจะสูงถึง +4 โวลต์ จึงจะสรุปได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ที่ป้อนให้

(2) ผลการตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าศูนย์ (0)

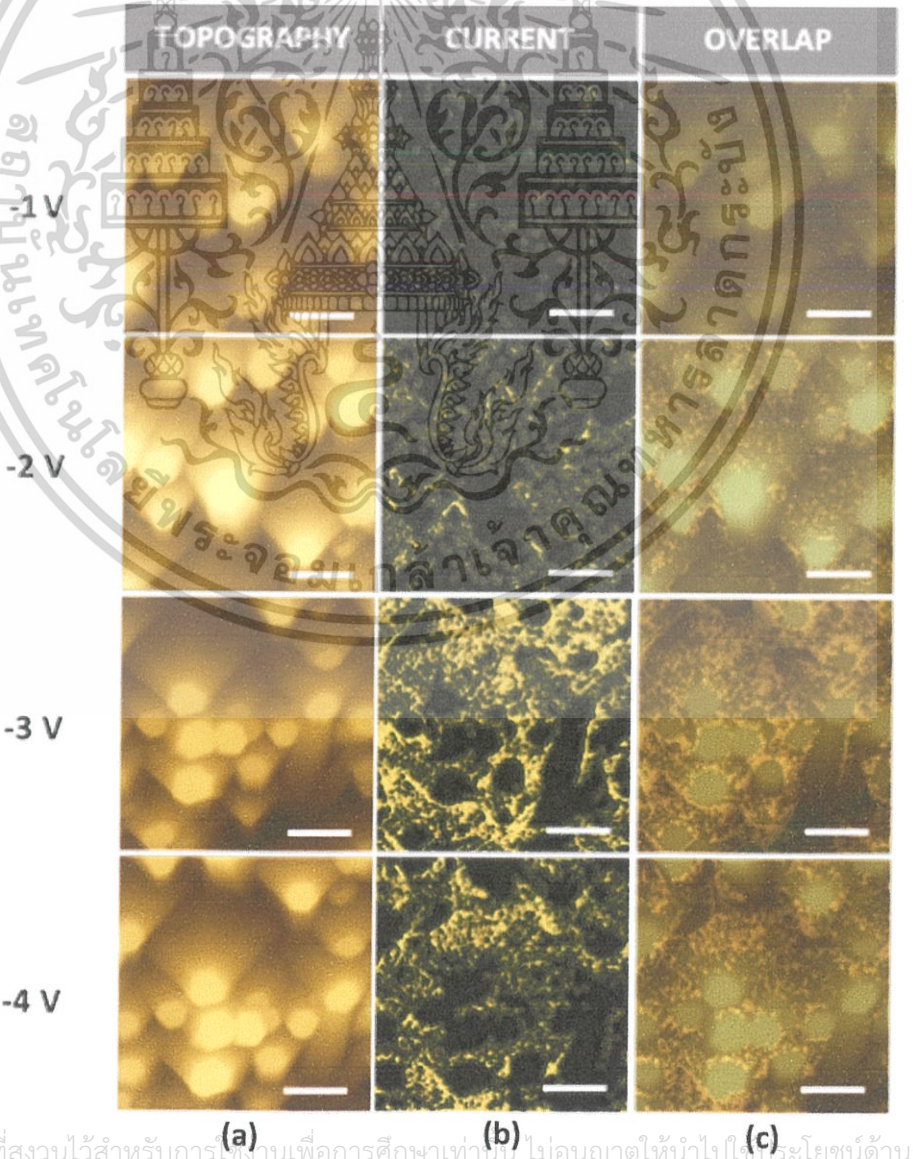


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.16 การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าศูนย์ (0) นำไปสู่การได้มาของ (a) ภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยา (b) ภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า และ (c) ภาพการซ้อนทับกันระหว่างภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาและภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า โดยความยาวของเส้น Scale Bar ในแต่ละรูป คือ 500 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.16(b) จะพบว่าพื้นที่การนำไฟฟ้าบนชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนไม่ถูกตรวจพบภายใต้การป้อนความต่างศักย์ที่ค่าศูนย์ (0) ซึ่งหมายความว่า ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทุกบริเวณของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ หรือค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0 นาโนแอมแปร์ ซึ่งผลการตรวจสอบจากรูปที่ 4.16(b) นี้ ก็จะถูกยืนยันความถูกต้องด้วยรูปที่ 4.16(c) ว่าเมื่อนำภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาและภาพพื้นที่การนำไฟฟ้ามาวางซ้อนทับกันก็จะไม่ปรากฏจุดหรือพื้นที่ใด ๆ ที่สว่างขึ้นเพื่อแสดงถึงการนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นข้อสรุปได้อย่างชัดเจนว่า หากป้อนความต่างศักย์ที่ค่าศูนย์หรือไม่ได้ป้อนความต่างศักย์ให้กับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์และหัวเข็ม จะไม่พบพื้นที่การนำไฟฟ้าตลอดทุกบริเวณทั่วชิ้นงาน

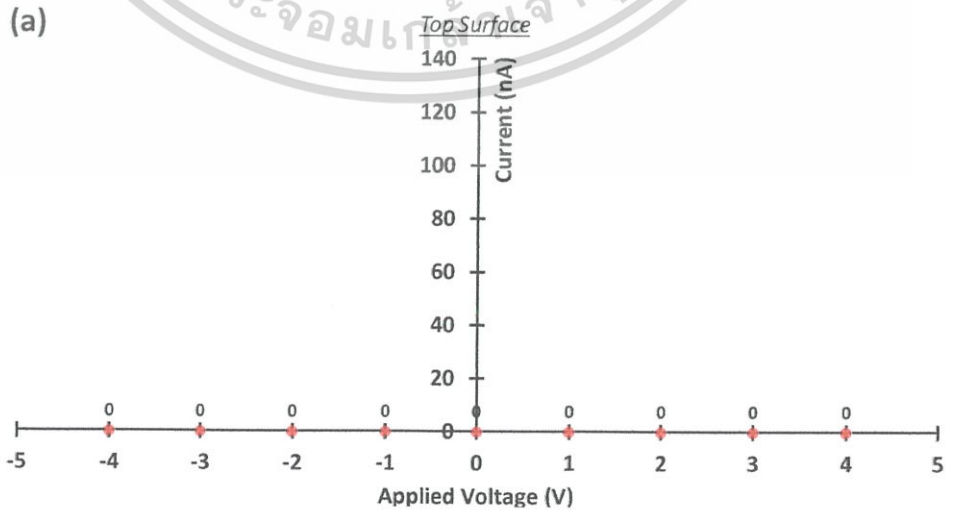
(3) ผลการตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าลบ (-)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

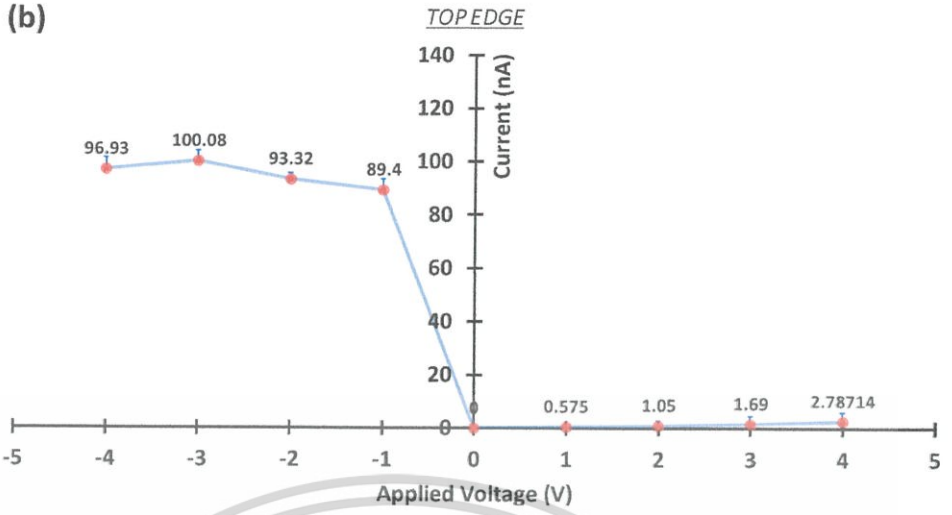
รูปที่ 4.17 การตรวจสอบสภาพการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยการป้อนความต่างศักย์ค่าลบ (-) นำไปสู่การได้มาของ (a) ภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยา (b) ภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า และ (c) ภาพการซ้อนทับกันระหว่างภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาและภาพพื้นที่การนำไฟฟ้า โดยความยาวของเส้น Scale Bar ในแต่ละรูป คือ 500 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.17(b) จะพบว่าพื้นที่การนำไฟฟ้าบนชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนภายใต้การป้อนความต่างศักย์ที่ค่าลบ (-) จะมีปริมาณหรือความหนาแน่นมากกว่าพื้นที่การนำไฟฟ้าภายใต้การป้อนความต่างศักย์ที่ค่าบวกและค่าศูนย์ และสิ่งที่ยังแตกต่างกันออกไปจากผลการตรวจสอบความต่างศักย์ที่ค่าบวกและค่าศูนย์ คือ ในช่วงความต่างศักย์ -1 ถึง -3 โวลต์ นั้น พื้นที่การนำไฟฟ้าจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือ พื้นที่การนำไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ และบริเวณที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ค่าความต่างศักย์ต่ำนั้น ก็คือ บริเวณของด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ดังรูปที่ 4.17(c) ในขณะที่บริเวณด้านอื่น ๆ ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะปรากฏพื้นที่การนำไฟฟ้าขึ้นก็ต่อเมื่อถูกป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าที่สูงขึ้นกว่า -1 โวลต์ และสิ่งที่ยังคงความพิเศษอยู่ ก็คือ พื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะไม่มีการนำไฟฟ้าแต่อย่างใด ถึงแม้จะอยู่ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าที่สูงขึ้นก็ตาม แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ตรวจสอบได้บนพื้นที่การนำไฟฟ้าทุกพื้นที่พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ในช่วง 80-120 นาโนแอมแปร์ ทั้งสิ้น ไม่มีบริเวณอื่นใดที่มีค่ากระแสไฟฟ้าแตกต่างออกไปจากช่วงดังกล่าว ซึ่งแนวโน้มนี้ถูกตรวจสอบพบในชิ้นงานที่อยู่ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ในช่วง -1 ถึง -3 โวลต์เท่านั้น ในขณะที่เมื่อชิ้นงานถูกป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์ จะพบพื้นที่การนำไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่ความหนาแน่นของบริเวณที่นำไฟฟ้าจะลดลงน้อยกว่าความหนาแน่นของบริเวณที่นำไฟฟ้าภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -3 โวลต์ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกตรวจสอบพบบนบริเวณที่นำไฟฟ้าก็ยังมีค่าอยู่ในช่วง 80-120 นาโนแอมแปร์ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ในช่วงการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ ในช่วง -1 ถึง -3 โวลต์ พื้นที่การนำไฟฟ้าบนชิ้นงานจะแปรผันโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ และค่ากระแสไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 80-120 นาโนแอมแปร์เท่านั้น แต่หากป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าจะยังคงอยู่ในช่วง 80-120 นาโนแอมแปร์เช่นเดิม แต่พื้นที่การนำไฟฟ้าจะมีจำนวนหรือความหนาแน่นลดน้อยลง

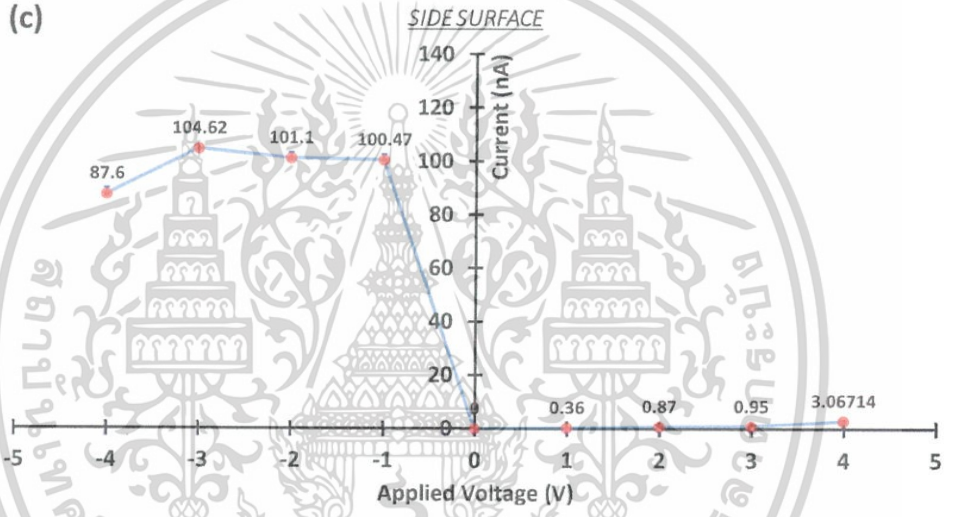


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

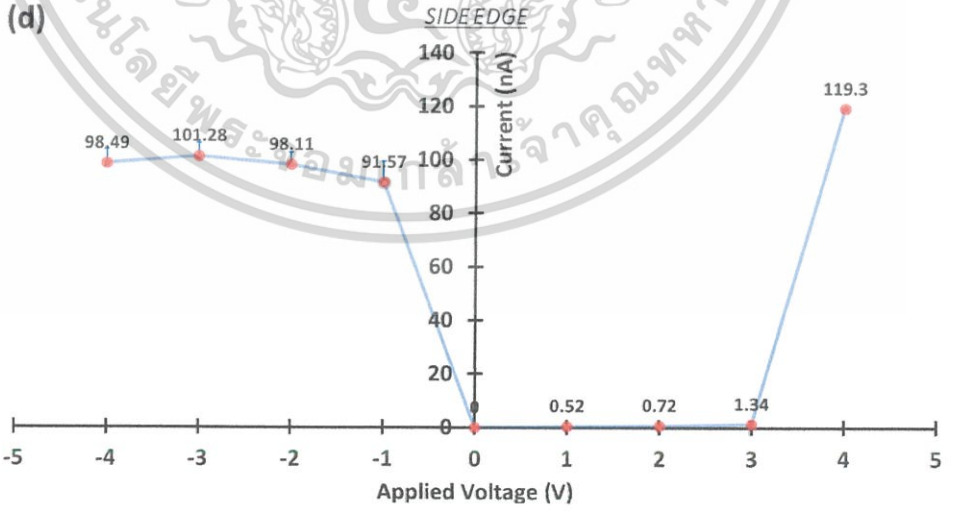
(b)



(c)



(d)



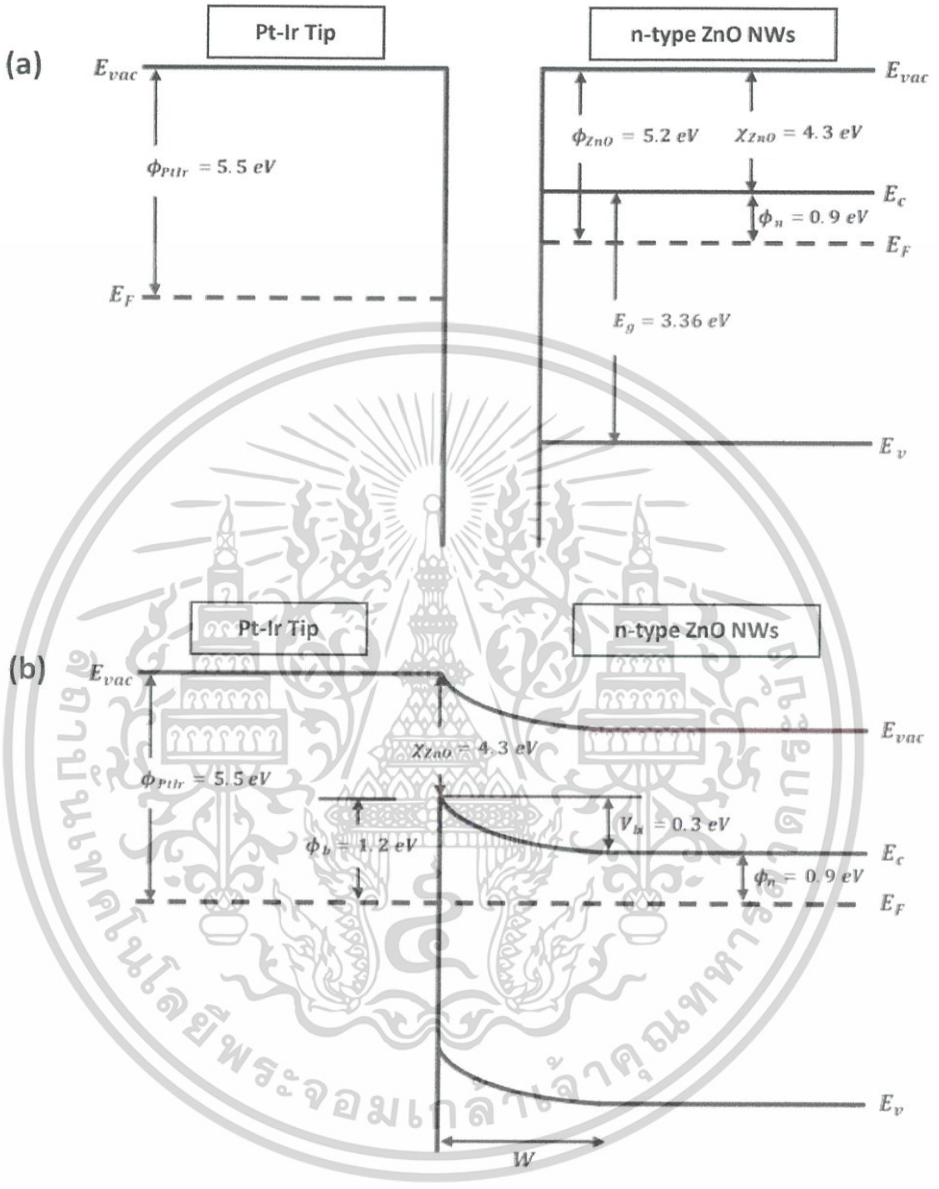
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ (I-V Curve) ของทั้ง 4 บริเวณบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับโนที่ดำเนินการตรวจสอบ คือ (a) พื้นที่ผิวด้านบนสุด (b) ขอบด้านบนสุด (c) พื้นที่ผิวด้านข้าง และ (d) ขอบด้านข้าง

จากกราฟที่ 4.1 จะเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนระหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม C-AFM (I-V Curve) โดยทั้ง 4 บริเวณที่นำมาแสดง ค่าที่ถูกนำเสนอในกราฟของแต่ละความต่างศักย์ จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ถูกเก็บมาจากเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนทั้งหมด 5 แท่ง แท่งละ 10 จุด ดังนั้นค่าที่ถูกแสดงอยู่ในกราฟจึงเป็นค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ทั้ง 50 จุด ซึ่งจากกราฟทั้ง 4 บริเวณการตรวจวัด แสดงให้เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ กราฟที่ 4.1(a) เป็นกราฟของบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งเราจะพบว่า ทุกความต่างศักย์ที่ป้อนให้กับชิ้นงานจะไม่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแต่อย่างใด กราฟจึงแสดงลักษณะเป็นเส้นตรง ในขณะที่กราฟที่ 4.1(b, c) เป็นกราฟของบริเวณขอบด้านบนสุด และพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ตามลำดับ จะพบว่าในฝั่งของการป้อนความต่างศักย์ด้วยลบนั้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่ถูกตรวจสอบจะมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน คือ ช่วง 87.6-104.62 นาโนแอมแปร์ แต่เมื่อป้อนความต่างศักย์ในช่วงศูนย์และบวก ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-3.06 นาโนแอมแปร์เท่านั้น สุดท้ายที่กราฟที่ 4.1(d) เป็นกราฟของบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยในช่วงความต่างศักย์ -4 ถึง +3 โวลต์ จะมีแนวโน้มและช่วงค่ากระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกับ กราฟของบริเวณขอบด้านบนสุดและกราฟของพื้นที่ผิวด้านข้าง แต่จะมีเพียงที่ความต่างศักย์ +4 โวลต์ ที่แสดงค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยถึง 119.3 นาโนแอมแปร์ ซึ่งจากข้อมูลที่สรุปได้ทั้งหมดนี้ จึงสามารถกล่าวได้ว่า บริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์สามารถนำไฟฟ้าได้ดีในช่วงความต่างศักย์ค่าลบทุกค่าที่ป้อนให้กับชิ้นงาน และจะเริ่มนำไฟฟ้าได้ดีเมื่อช่วงความต่างศักย์มากกว่า +4 โวลต์ สำหรับการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก แต่เนื่องด้วยขีดจำกัดของหัวเข็ม C-AFM ภายใต้การดำเนินการป้อนความต่างศักย์ หัวเข็ม C-AFM นี้ไม่สามารถดำเนินการตรวจสอบชิ้นได้เมื่อป้อนความต่างศักย์ที่สูงกว่า -4 โวลต์ และ +4 โวลต์ จึงทำให้ไม่สามารถยืนยันผลในลำดับถัดไปได้ว่า บริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เมื่อป้อนความต่างศักย์ที่ค่าสูงกว่า +4 โวลต์ พื้นที่การนำไฟฟ้าจะยังคงแสดงค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 80-120 นาโนแอมแปร์ ได้ตามแนวโน้มของกราฟที่ถูกวิเคราะห์ขึ้นหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ และ Energy Band Diagram

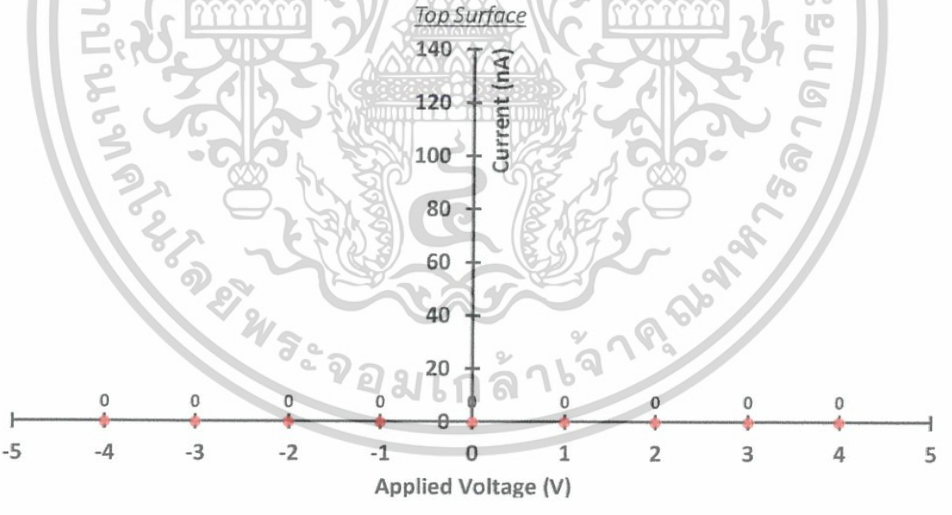


รูปที่ 4.18 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน (Energy band diagram) ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในขณะ (a) หัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ยังไม่สัมผัสกันแต่อย่างใด และ (b) เมื่อหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เคลื่อนมาสัมผัสกันที่จุดสมดุล โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

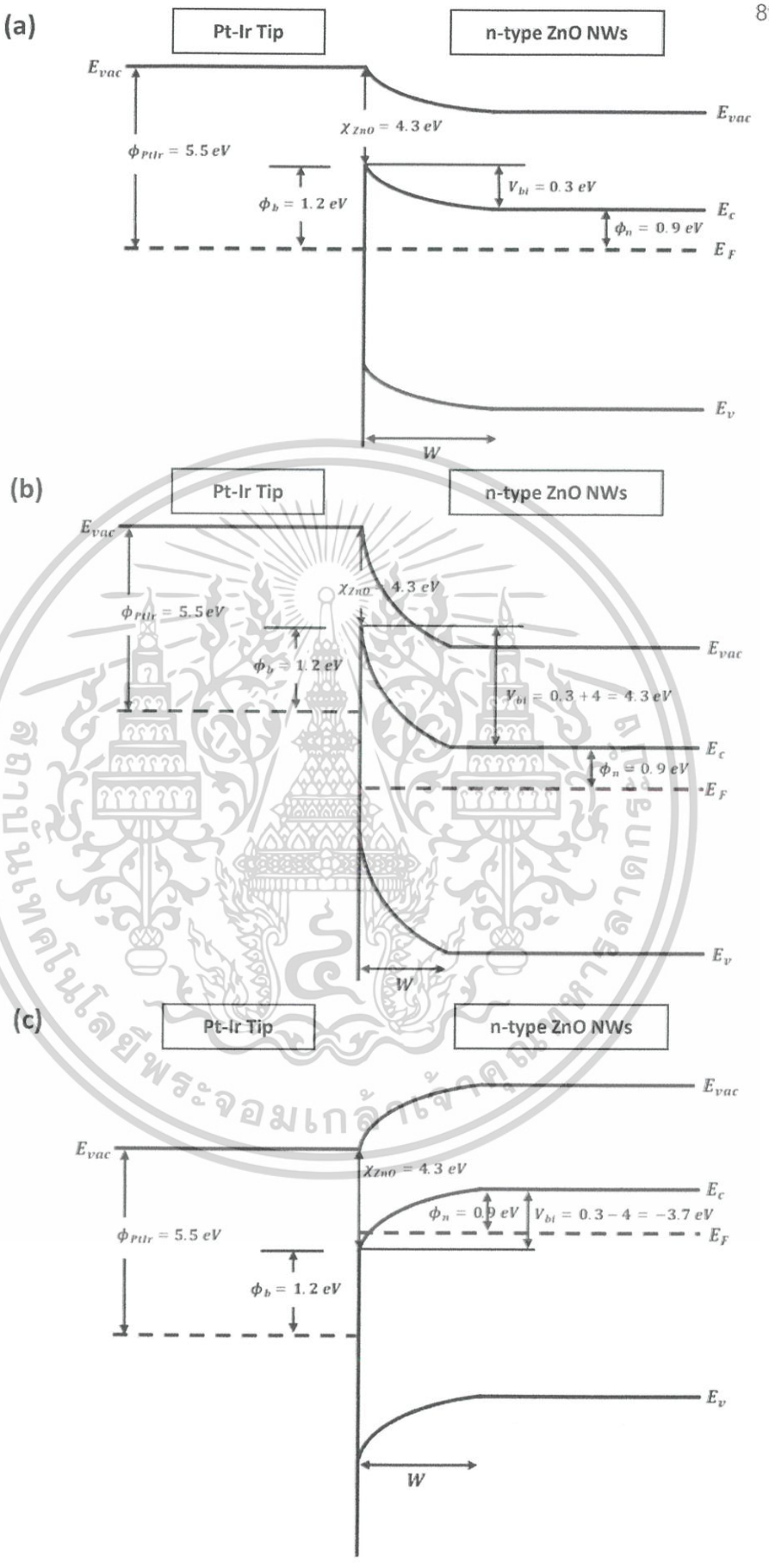
จากรูปที่ 4.18(a) จะแสดงลักษณะของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n เนื่องจากในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนนั้น ไม่มีการเจือหรือป้อนสารหรือธาตุอื่นในหมู่ 5 เพิ่มเติม และสามารถพิจารณาจากกราฟการนำไฟฟ้าทั้ง 4 บริเวณของการตรวจวัด ดังนั้นเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจึงจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n และเมื่อสามารถระบุชนิดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้แล้ว จะสามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้ตามรูปที่ 4.18(a) ขณะที่ทั้งสองวัสดุยังไม่มีการสัมผัสกันแต่อย่างใด โดยหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะมีฟังก์ชันงานเท่ากับ 5.5 และ 5.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ขณะที่หัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เคลื่อนตัวมาสัมผัสกันโดยปราศจากการป้อนความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า จะแสดงในรูปที่ 4.18(b) จะพบว่าระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เคลื่อนตัวลงมาเสมอกับระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิของหัวเข็ม Pt-Ir จึงทำให้เกิดศักย์ภายในเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ขึ้นเท่ากับ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ และเกิดกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุที่มีความสูงเท่ากับ 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อของวัสดุ ซึ่งความสูงของกำแพงนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามความต่างศักย์ที่ป้อนให้ ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

(1) บริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ (Top Surface)



กราฟที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ระหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม C-AFM ที่ค่าต่าง ๆ ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน (Energy band diagram) ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดย (a) ไม่มีการป้อนความต่างศักย์ (No bias) (b) เมื่อป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์ (Reverse bias) และ (c) เมื่อป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์ (Forward bias)

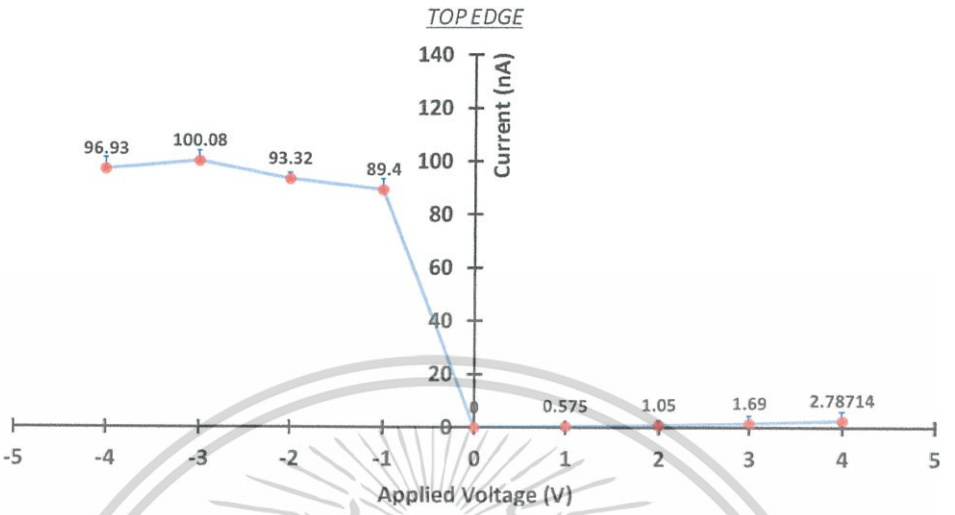
จากกราฟที่ 4.2 จะพบว่าบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ไม่มีการนำกระแสไฟฟ้าแม้จะมีการปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ค่าต่าง ๆ ทุกจุดบนพื้นผิวด้านบนสุดของเส้นลวดจะไม่ปรากฏจุดการนำไฟฟ้าแม้เพียงจุดเดียว จึงทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ป้อนเป็นเส้นตรงทับแกน X ซึ่งแสดงถึงการไม่เกิดการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลอันทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า จึงสามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 4.19(a-c) โดยรูปทั้งสามจะมีค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุเท่ากันทั้งหมด เนื่องจากความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อ (ϕ_b) มีความสัมพันธ์กับสมการ 4.3

$$\phi_b = \frac{k_B T}{q} ln\left(\frac{R^* T^2}{\frac{I_s}{A}}\right) \tag{4.3}$$

ซึ่งหากพิจารณาจากสมการที่ 4.3 แล้ว จะพบว่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดจะแปรผันกับกระแสไฟฟ้าสูงสุดอิ่มตัว (I_s) ที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลจากกราฟที่ 4.2 แล้วไม่พบการเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นทั่วทั้งบริเวณพื้นผิวหน้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จึงทำให้ค่า I_s มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้ค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อ (ϕ_b) ไม่สามารถคำนวณจากสมการที่ 4.3 ได้ ค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองภายใต้การป้อนความต่างศักย์ที่ค่าบวก และลบ จึงมีค่าเท่ากับความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อขณะไม่มีการป้อนความต่างศักย์ กล่าวคือมีค่า ϕ_b= 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งรูปที่ 4.19(a-c) แต่ละรูปนั้นจะแตกต่างกันกันเพียงศักย์ภายในที่เกิดขึ้น แต่เนื่องด้วยความสูงของกำแพงระหว่างรอยต่อมีค่าสูงมากกว่า 1 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถข้ามความสูงของกำแพงหรือทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นได้ กระแสไฟฟ้าจึงไม่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) บริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน (Top Edge)



กราฟที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ระหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม C-AFM ที่ค่าต่าง ๆ ในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

จากกราฟที่ 4.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจากกราฟจะพบว่ามีการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์โดยเฉพาะการป้อนความต่างศักย์ที่ค่าลบ จะพบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดถึง 100.08 นาโนแอมแปร์ และเมื่อนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรงแล้วจะได้ค่ากระแสที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า 0 โวลต์ เป็น 42.87 นาโนแอมแปร์ หรือเป็นจุดตัดแกน Y นั่นเอง ซึ่งจะสามารถคำนวณความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุขณะไม่มีการป้อนความต่างศักย์ให้เข้าไปในระบบ โดยใช้สมการจากด้านล่างนี้ คือ

$$J_s = \frac{I_s}{A} \tag{4.4}$$

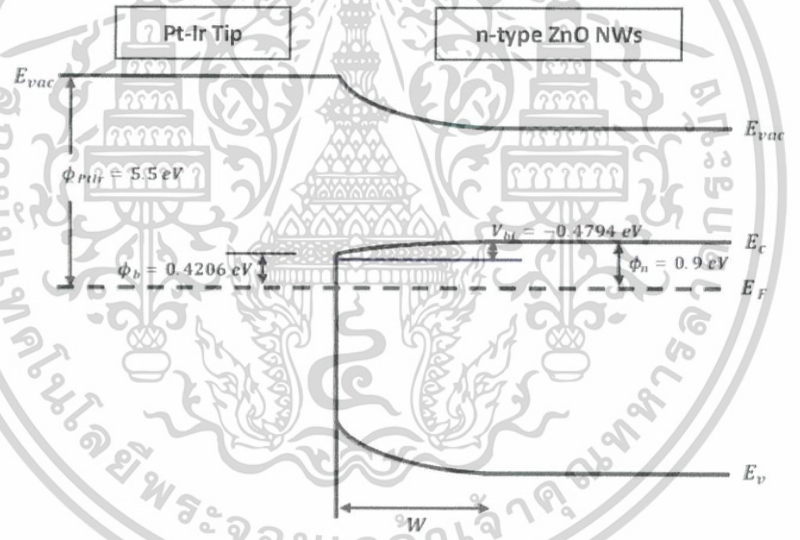
$$R^* = \frac{4\pi q m_e^* k_B^2}{h^3} \tag{4.5}$$

$$J_s = R^* T^2 exp\left(\frac{q\emptyset_b}{k_B T}\right) \tag{4.6}$$

$$\emptyset_b = \frac{k_B T}{q} ln\left(\frac{R^* T^2}{J_s}\right) \tag{4.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย J_s คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวสูงสุดต่อตารางเซนติเมตร, I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวสูงสุด, A คือ พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir กับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์, R^* คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสัน, q คือ ประจุอิเล็กตรอน $(1.602 \times 10^{-19} C)$, m_e^* คือ มวลยังผลของประจุที่เป็นพาหะหลัก นั่นคือ อิเล็กตรอน $(0.24 m_0)$, k_B คือ ค่าคงที่ Boltzmann $(1.3806 \times 10^{-23} J/K)$, h คือ ค่าคงที่ของ Planck $(6.626 \times 10^{-34} J \cdot s)$, T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน $(298\ K)$, และ $\emptyset_b$ คือ ความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิด หลังจากดำเนินการด้วยสมการที่ 4.4 เพื่อคำนวณหาค่า J_s แล้ว โดย I_s จะมีค่าเท่ากับ 42.87 นาโนแอมแปร์ ซึ่งเป็นค่าจุดตัดแกน Y จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ กราฟที่ 4.3 และค่า A ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะมีค่าเท่ากับ $1.963 \times 10^{-7} cm^2$ ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากสมการพื้นที่วงกลม (πr^2) ด้วยการแทนค่ารัศมี (r) ของหัวเข็ม Pt-Ir ด้วยค่า $25\ nm$ เมื่อเสร็จสิ้นการแทนค่าทั้งหมด จะได้ค่าความหนาแน่นของกระแสสูงสุด (J_s) เท่ากับ $0.218\ A/cm^2$ หลังจากนั้นจึงคำนวณค่า R^* ซึ่งจะได้ค่าเท่ากับ $32\ A/cm^2 \cdot K^2$ (กรณีสำหรับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เท่านั้น) ดังนั้นเมื่อเราทราบค่า J_s และ R^* จึงจะสามารถนำทั้งสองค่านี้ แทนค่าลงในสมการที่ 4.3 เพื่อคำนวณความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิด $(\emptyset_b)$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $0.4206\ eV$ และจะสามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้ตามภาพด้านล่าง



รูปที่ 4.20 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงานในอุดมคติ ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ระดับนาโน ในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์ (V=0)

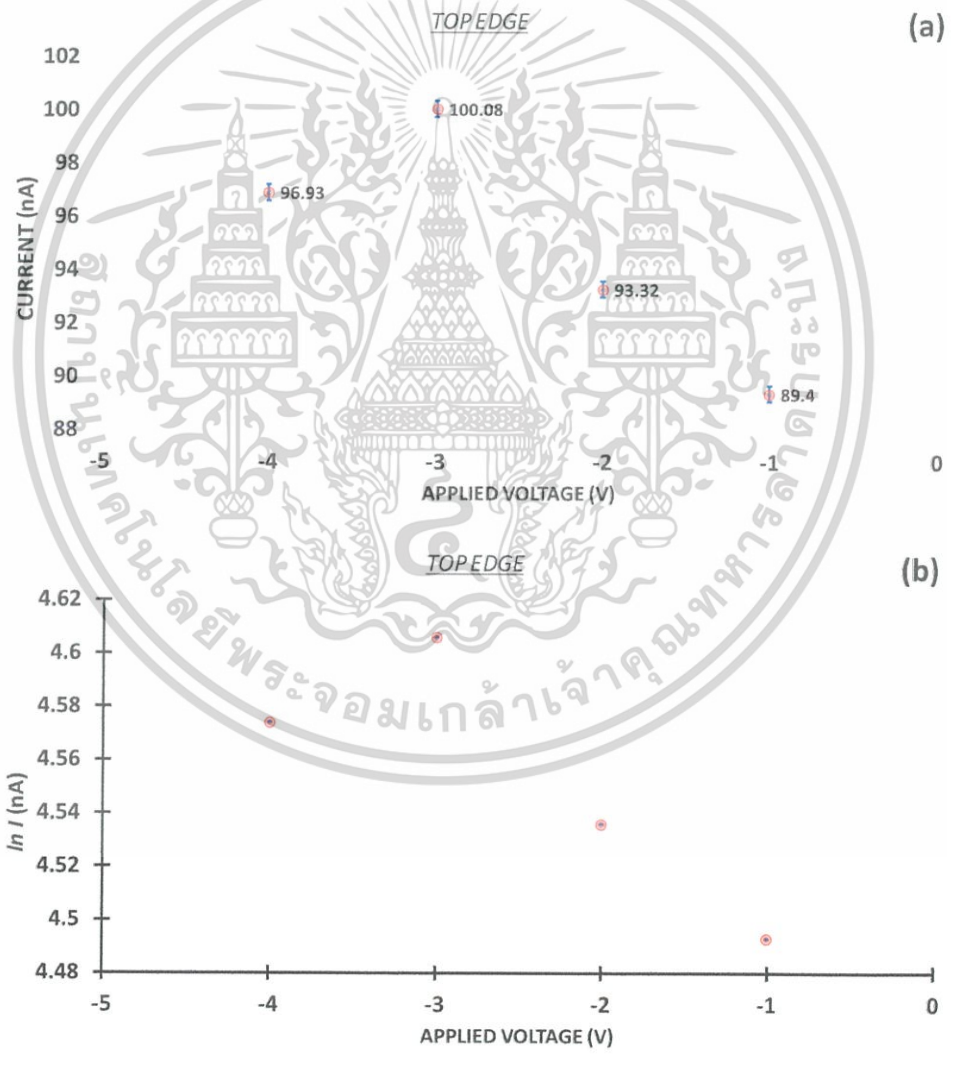
ซึ่งจากรูปที่ 4.20 จะพบว่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดในพื้นที่ขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกตรวจสอบ จะมีความสูงลดลงจากความสูงของกำแพงในบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ถึง 0.794 อิเล็กตรอนโวลต์ หมายความว่ากำแพงมีความสูงที่น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงบริเวณรอยต่อนี้ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่ผลนี้เป็นเพียงผลการตรวจสอบภายใต้การไม่ป้อนความต่างศักย์ (V=0) ซึ่งผลของการตรวจสอบและการสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานขณะที่ป้อนความต่างศักย์ที่ค่าบวกและค่าลบจะแสดงในหัวข้อถัดไป

- **การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ**

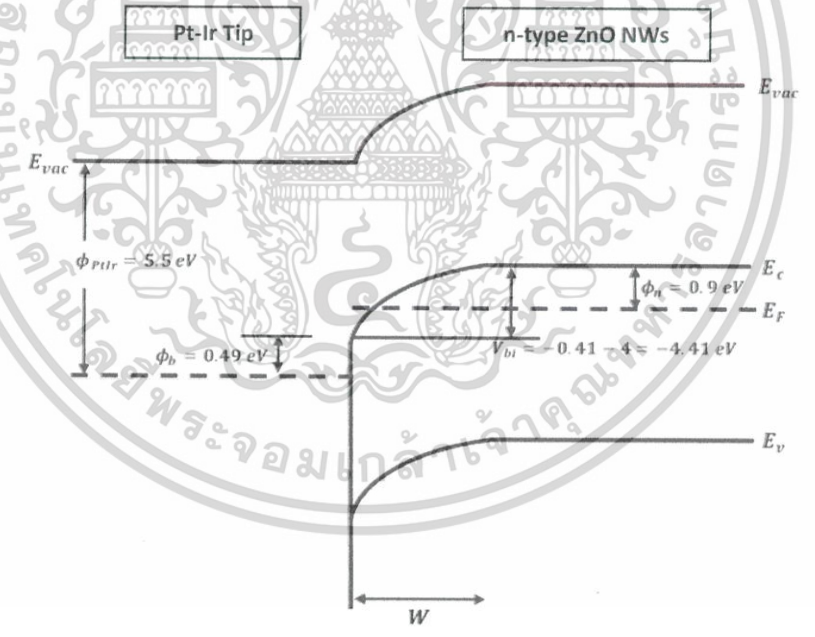
กล่าวคือ เป็นการป้อนความต่างศักย์แบบ Forward Bias เนื่องจากจะป้อนความต่างศักย์ฝั่งค่าบวกให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และป้อนความต่างศักย์ค่าลบให้กับขั้วอิเล็กโทรดทองภายใต้แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Negative Sample Bias โดยจะสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ (I-V Curve Characteristics) ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อน (I-V Curve Characteristics) เฉพาะฝั่งการป้อนความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานที่ค่าลบ (a) กราฟที่สร้างจากค่าที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนและ *ln I*

โดยจากกราฟที่ 4.4 จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณขอบด้านบนสุดนี้จะมีค่าสูงและประมาณอยู่ในช่วง 89.4-100.8 นาโนแอมแปร์ ซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟแนวโน้มของกระแสที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรงได้ตามกราฟที่ 4.4(b) โดยจะพบค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ 87.595 นาโนแอมแปร์ แต่ข้อมูลนี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ยบนเส้นตรงที่โปรแกรมดำเนินการคำนวณออกมา สามารถระบุค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดได้ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งที่อยู่ที่แท้จริงของระดับชั้นพลังงาน Conduction, ระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิ, และระดับชั้นพลังงาน Valence ได้ เนื่องจากการทดลองเป็นการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ที่หลายค่า หากต้องการระบุตำแหน่งที่ชุดเจนของทั้งสามระดับชั้นพลังงานที่กล่าวไป ต้องเลือกใช้ข้อมูลจากการป้อนความต่างศักย์ที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงจะสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานจำลองขึ้นขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวกให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และระบุเพียงค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดด้วยค่าที่แน่นอนเท่านั้น แต่ลักษณะการเคลื่อนที่ของทั้งสามระดับชั้นพลังงานจะถูกสร้างให้เห็นเป็นเพียงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเท่านั้น ดังรูปด้านล่างนี้

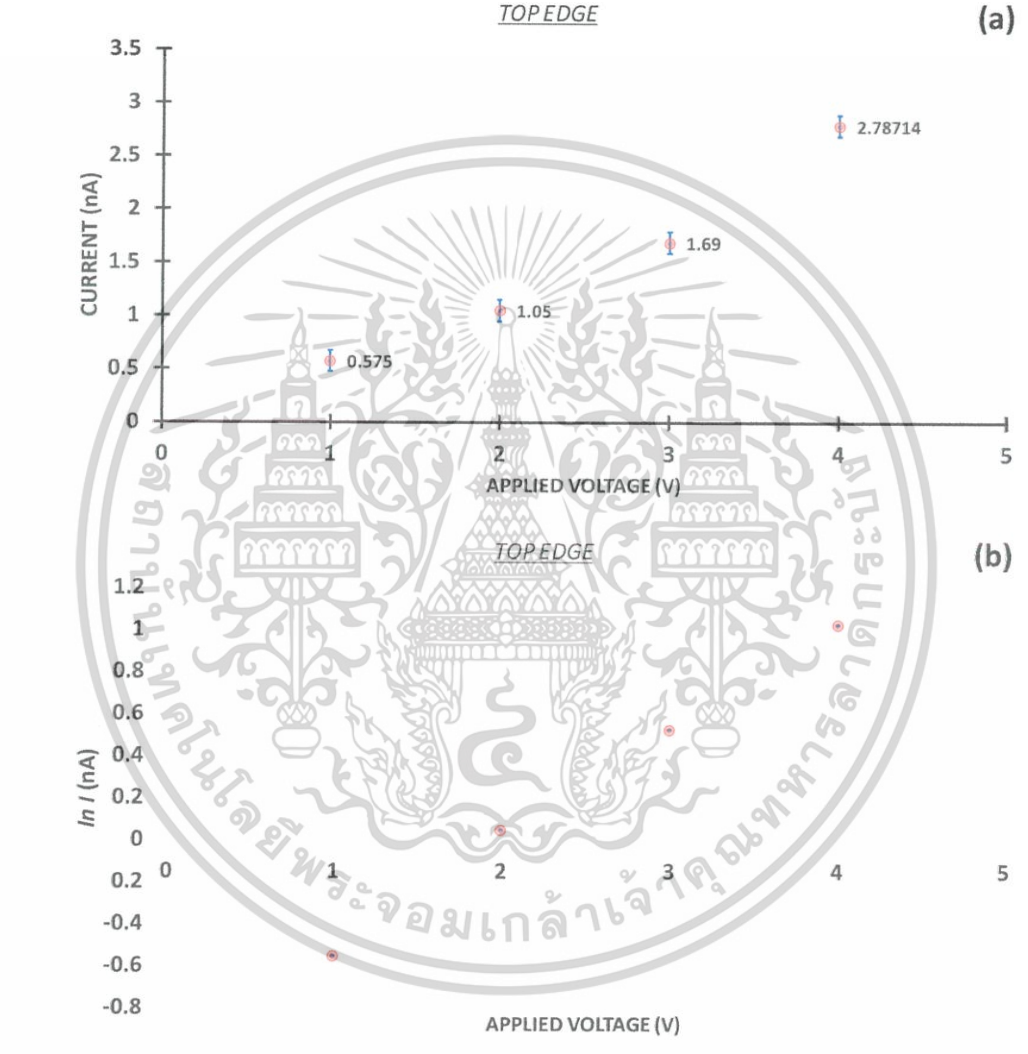


รูปที่ 4.21 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

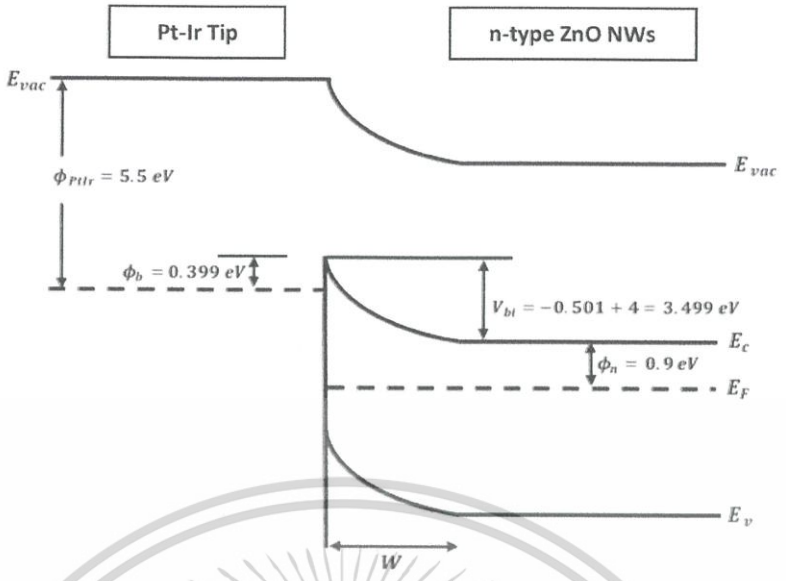
- **การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก**

กล่าวคือ เป็นการป้อนความต่างศักย์แบบ Reverse Bias เนื่องจากจะป้อนความต่างศักย์ฝั่งค่าลบให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และป้อนความต่างศักย์ค่าบวกให้กับขั้วอิเล็กโทรดทองภายใต้แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Positive Sample Bias โดยจะสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ (I-V Curve Characteristics) ได้ดังนี้



กราฟที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อน (I-V Curve Characteristics) เฉพาะฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก (a) กราฟที่สร้างจากค่าที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนและ *ln I*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานด้วยค่าเป็น +4 โวลต์

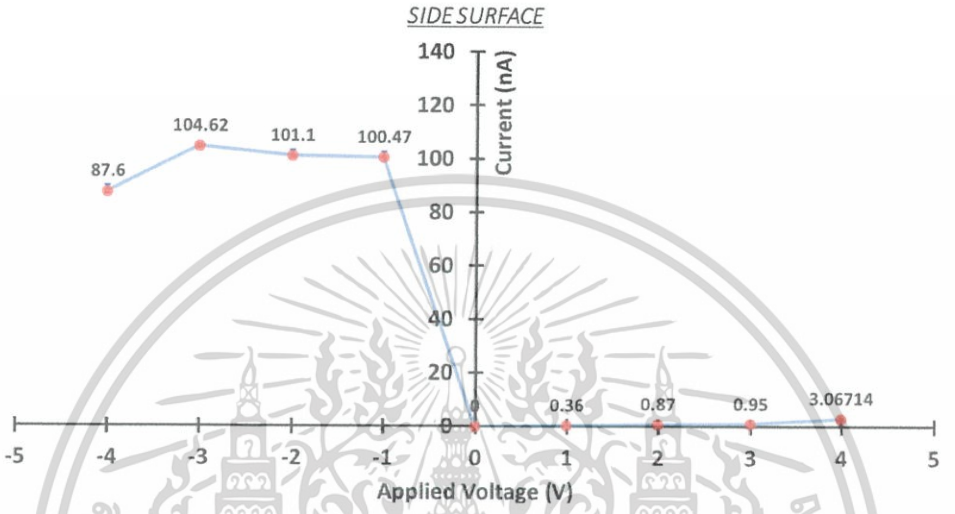
จากกราฟที่ 4.5 จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณอยู่ในช่วง 0.5-2.8 นาโนแอมแปร์ ซึ่งมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ และมีค่ากระแสไฟฟ้า ณ จุดตัดแกน Y เท่ากับ 0.2936 นาโนแอมแปร์ จึงสามารถนำไปคำนวณค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดได้ แต่ก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งของระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้อย่างแน่นอน เช่นเดียวกันกับขณะป้อนความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานด้วยค่าเป็นลบ จึงสามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้ตามรูปที่ 4.22

ดังนั้น จากผลการตรวจวัดการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกและลบนั้น ทำให้พบว่าขณะดำเนินการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกนั้น เส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะเกิดการนำไฟฟ้าที่ค่าต่ำในช่วง 0.5-3 นาโนแอมแปร์ แต่ในขณะเดียวกันที่ป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบนั้น เส้นลวดซิงค์ออกไซด์สามารถนำไฟฟ้าด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงถึง 80-100.3 นาโนแอมแปร์ ซึ่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบนั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนสูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกถึงประมาณ 26 เท่า เป็นผลอันเนื่องมาจากความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดมีความสูงแตกต่างกัน กล่าวคือ ขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบทำให้กำแพงลดความสูงลง อิเล็กตรอนและโฮลจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อของวัสดุไปได้ หรืออาจใช้วิธีการทะลุผ่านกำแพงนั้น (Tunneling) ไป ด้วยความสูงที่มากเกินพอทำให้การโค้งงอของระดับชั้นพลังงานมีความแคบและชิดติดกับรอยต่อ และมีบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างต่ำ แต่ในขณะที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกนั้น ทำให้กำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดขยายตัวสูงยิ่งขึ้น ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามความสูงนี้ได้ และยังไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงนั้นได้อันเนื่องมาจากบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างสูง จึงทำให้ไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

(3) บริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน (Side Surface)

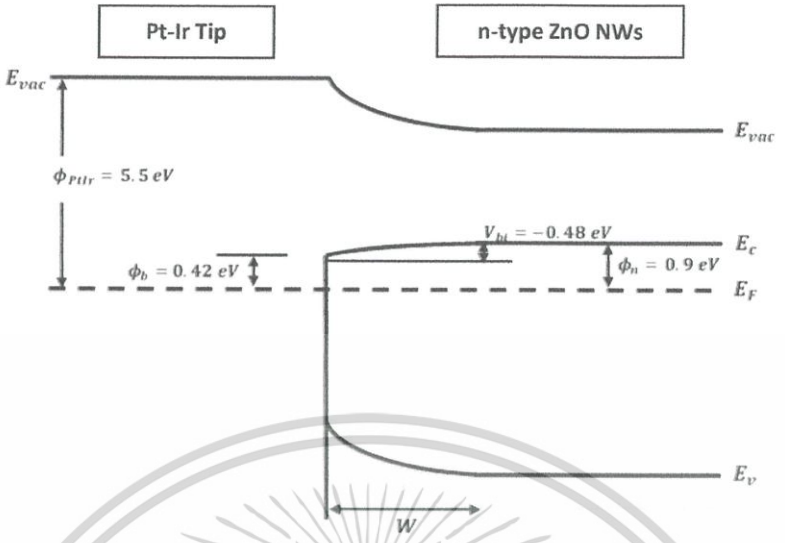


กราฟที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ระหว่างขั้นงานและหัวเข็ม C-AFM ที่ค่าต่าง ๆ ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ โดยแกน X คือ ความต่างศักย์ มีหน่วยเป็น V.

จากกราฟที่ 4.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจากกราฟจะพบว่ามีการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์โดยเฉพาะการป้อนความต่างศักย์ที่ค่าลบ จะพบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดถึง 104.62 นาโนแอมแปร์ และเมื่อนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรงแล้วจะได้ค่ากระแสที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า 0 โวลต์ เป็น 42.87 นาโนแอมแปร์ หรือเป็นจุดตัดแกน Y นั่นเอง ซึ่งจะสามารถคำนวณความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุขณะไม่มีการป้อนความต่างศักย์ให้เข้าไปในระบบ โดยใช้สมการที่ 4.3-4.6

ขณะดำเนินการคำนวณด้วยสมการที่ 4.3-4.6 นั้น ตัวแปรต่าง ๆ จะถูกแทนค่าด้วยค่าเดียวกันกับที่คำนวณจากผลการตรวจสอบในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่เปลี่ยนแปลงเพียงที่สมการที่ 4.4 โดยจะต้องใช้ค่า I_s ด้วยค่าจุดตัดแกน Y ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นกับการป้อนความต่างศักย์ (I-V Curve) แต่ค่าพื้นที่การสัมผัสระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์นั้นยังเป็นค่าคงเดิม จึงทำให้ค่า J_s เปลี่ยนแปลงไปเป็น 0.218 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นหากนำค่า J_s ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ แทนค่าลงในสมการที่ 4.3 ค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อจะเปลี่ยนแปลงไปเป็น 0.4207 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้ดังรูปด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



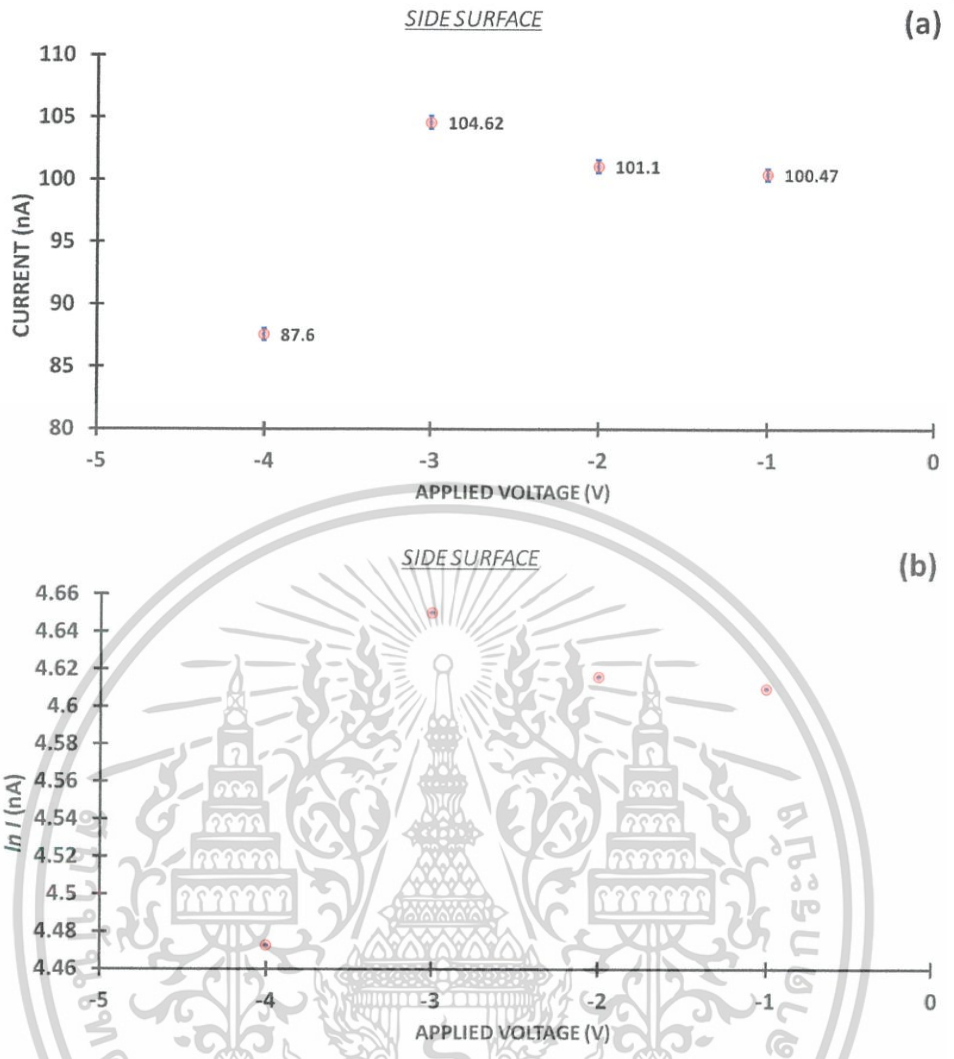
รูปที่ 4.23 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงานในอุดมคติ ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์ (V=0)

ซึ่งจากรูปที่ 4.23 จะพบว่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดในพื้นที่ขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกตรวจสอบ จะมีความสูงลดลงจากความสูงของกำแพงในบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ถึง 0.78 อิเล็กตรอนโวลต์ หมายความว่ากำแพงมีความสูงที่น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงบริเวณรอยต่อนี้ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่ผลนี้เป็นเพียงผลการตรวจสอบภายใต้การไม่ป้อนความต่างศักย์ (V=0) และจะเป็นรูปในอุดมคติ เนื่องจากหากไม่ป้อนความต่างศักย์ ก็จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้า และจะไม่สามารถคำนวณค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดได้จากสมการที่ 4.3 ซึ่งผลของการตรวจสอบและการสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานขณะที่ป้อนความต่างศักย์ที่ค่าบวก และค่าลบจะแสดงในหัวข้อถัดไป

- **การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบ**

กล่าวคือ เป็นการป้อนความต่างศักย์แบบ Forward Bias เนื่องจากจะป้อนความต่างศักย์ฝั่งค่าบวกให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และป้อนความต่างศักย์ค่าลบให้กับขั้วอิเล็กโทรดทองภายใต้แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยจะสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ (I-V Curve Characteristics) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

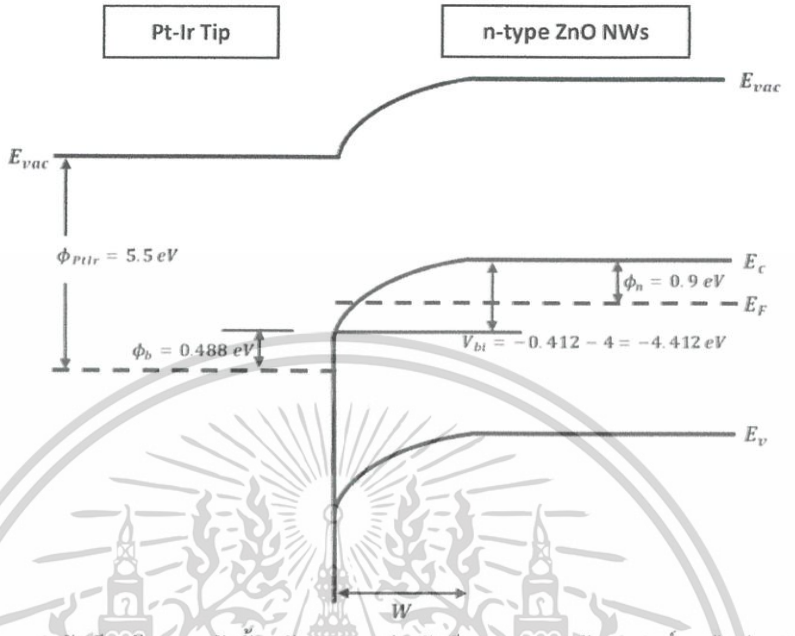


กราฟที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อน (I-V Curve Characteristics) เฉพาะฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ (a) กราฟที่สร้างจากค่าที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนและ $\ln I$

โดยจากกราฟที่ 4.7 จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณขอบด้านบนสุดนี้จะมีค่าสูงและประมาณอยู่ในช่วง 87.6-104.62 นาโนแอมแปร์ ซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟแนวโน้มของกระแสที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรงได้ตามกราฟที่ 4.7(b) โดยจะพบค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ 107.2 นาโนแอมแปร์ แต่ข้อมูลนี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ยบนเส้นตรงที่โปรแกรมดำเนินการคำนวณออกมา สามารถระบุค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดได้ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งที่อยู่ที่แท้จริงของระดับชั้นพลังงาน Conduction, ระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิ, และระดับชั้นพลังงาน Valence ได้ เนื่องจากการทดลองเป็นการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ที่หลายค่า หากต้องการระบุตำแหน่งที่ชุดเจนของทั้งสามระดับชั้นพลังงานที่กล่าวไป ต้องเลือกใช้ข้อมูลจากการป้อนความต่างศักย์ที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงจะสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานจำลองขึ้นขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวกให้กับหัวเข็ม Pt-Ir

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

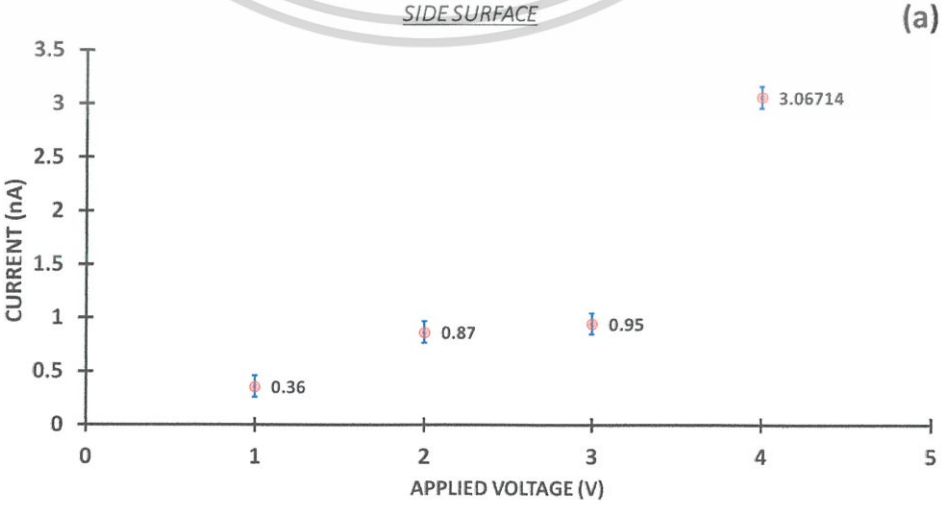
และระบุเพียงค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดด้วยค่าที่แน่นอนเท่านั้น แต่ลักษณะการเคลื่อนที่ของทั้งสามระดับชั้นพลังงานจะถูกสร้างให้เห็นเป็นเพียงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเท่านั้น ดังรูปด้านล่างนี้



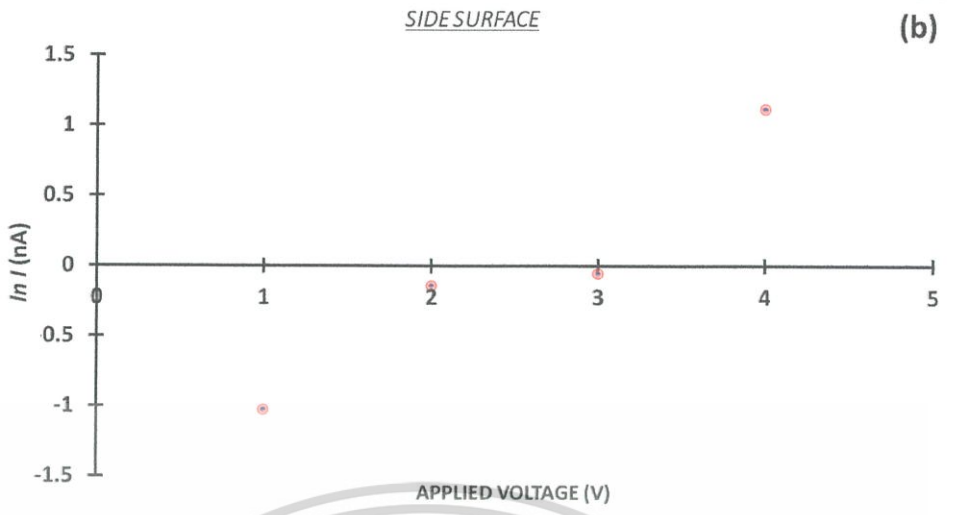
รูปที่ 4.24 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้วภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์

- การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวก

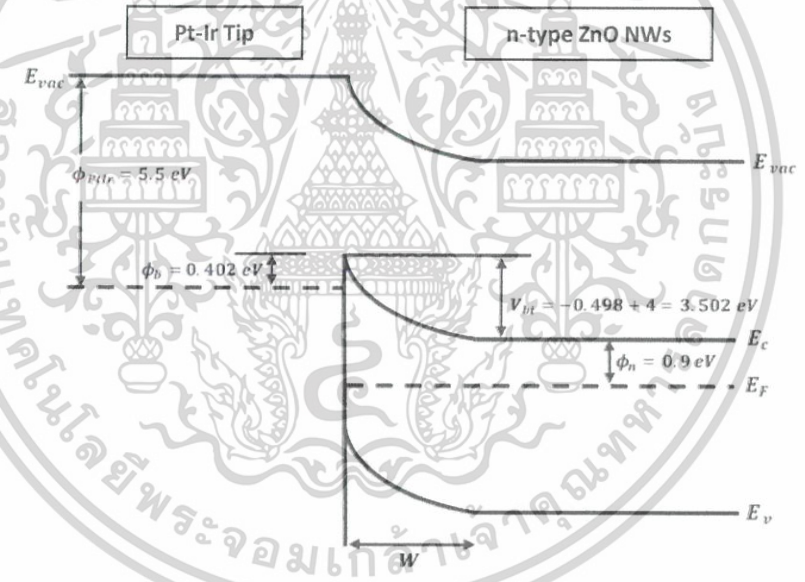
กล่าวคือ เป็นการป้อนความต่างศักย์แบบ Reverse Bias เนื่องจากจะป้อนความต่างศักย์ฝั่งค่าลบให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และป้อนความต่างศักย์ค่าบวกให้กับขั้วอิเล็กโทรดทองภายใต้แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยจะสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ (I-V Curve Characteristics) ได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อน (I-V Curve Characteristics) เฉพาะฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก (a) กราฟที่สร้างจากค่าที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนและ *ln I*



รูปที่ 4.25 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนในบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้วภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์

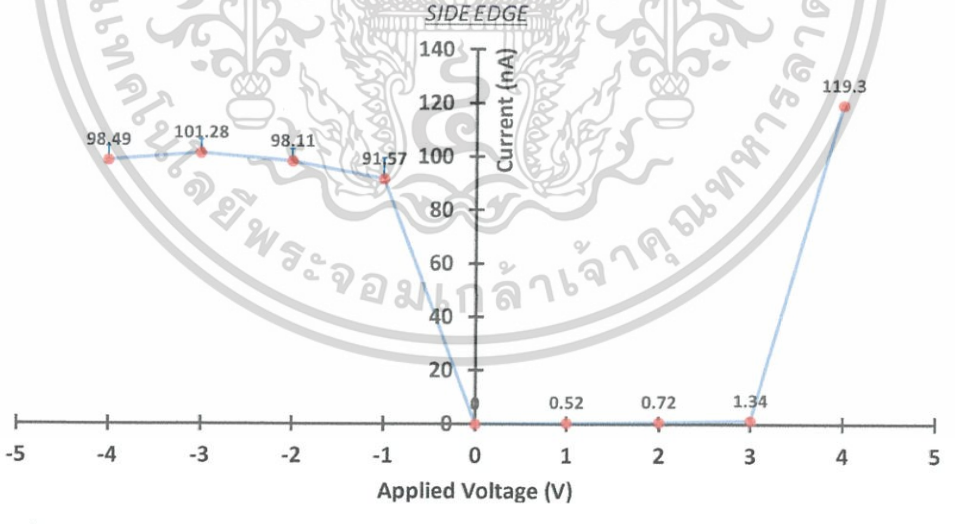
จากกราฟที่ 4.8 จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-3.1 นาโนแอมแปร์ ซึ่งมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบ และมีค่ากระแสไฟฟ้า ณ จุดตัดแกน Y เท่ากับ 0.738 นาโนแอมแปร์ จึงสามารถนำไปคำนวณค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองชนิดได้ แต่ก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งของระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้อย่างแน่นอน เช่นเดียวกันกับขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบ จึงสามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้ตามรูปที่ 4.25

ดังนั้น จากผลการตรวจวัดการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกและลบนั้น ทำให้พบว่าขณะดำเนินการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกนั้น เส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะเกิดการนำไฟฟ้าที่ค่าต่ำในช่วง 0.2-3.16 นาโนแอมแปร์ แต่ในขณะเดียวกันที่ป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบนั้น เส้นลวดซิงค์ออกไซด์สามารถนำไฟฟ้าด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงถึง 87.6-104.62 นาโนแอมแปร์ ซึ่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบนั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนสูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกถึงประมาณ 27 เท่า เป็นผลอันเนื่องมาจากความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดมีความสูงแตกต่างกัน กล่าวคือขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบทำให้กำแพงลดความสูงลง อิเล็กตรอนและโฮลจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อของวัสดุไปได้ หรืออาจใช้วิธีการทะลุผ่านกำแพงนั้นไป ด้วยความสูงที่มากเกินพอทำให้การโค้งงอของระดับชั้นพลังงานมีความแคบและชิดติดกับรอยต่อ และมีบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างต่ำ แต่ในขณะที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกนั้น ทำให้กำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดขยายตัวสูงยิ่งขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามความสูงนี้ได้ และยังไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงนั้นได้อันเนื่องมาจากบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างสูง

(4) บริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน (Side Edge)



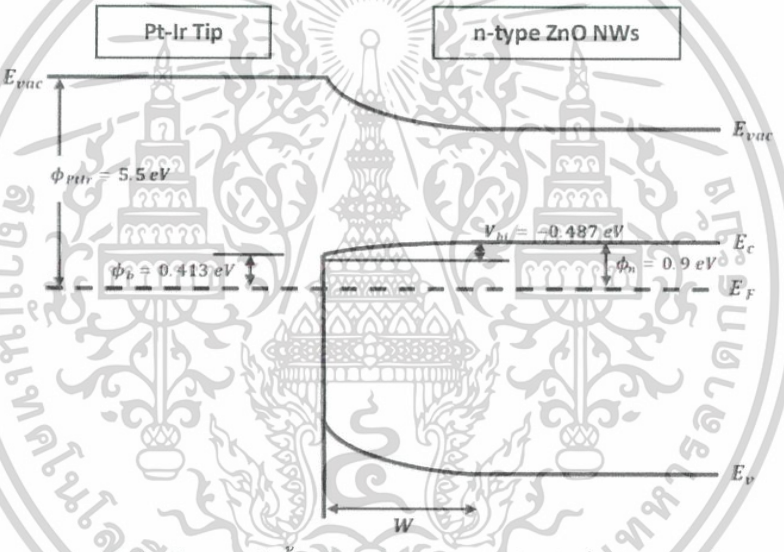
กราฟที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ระหว่างชิ้นงานและหัวเข็ม C-AFM ที่ค่าต่าง ๆ ในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

จากกราฟที่ 4.9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจากกราฟจะพบว่ามีการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดซิงค์ออกไซด์โดยเฉพาะการป้อนความต่างศักย์ที่ค่าลบ จะพบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดถึง 101.28 นาโนแอมแปร์ และเมื่อนำมาสร้างเป็นสมการเส้นตรงแล้วจะได้ค่ากระแสที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า 0 โวลต์ เป็น 56.814 นาโนแอมแปร์ หรือเป็นจุดตัดแกน Y นั่นเอง ซึ่งจะสามารถคำนวณความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุขณะไม่มีการป้อนความต่างศักย์ให้เข้าไปในระบบ โดยใช้สมการที่ 4.3-4.6

ขณะดำเนินการคำนวณด้วยสมการที่ 4.3-4.6 นั้น ตัวแปรต่าง ๆ จะถูกแทนค่าด้วยค่าเดียวกันกับที่คำนวณจากผลการตรวจสอบในบริเวณขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่เปลี่ยนแปลงเพียงที่สมการที่ 4.4 โดยจะต้องใช้ค่า I_s ด้วยค่าจุดตัดแกน Y ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นกับการป้อนความต่างศักย์ (I-V Curve) แต่ค่าพื้นที่การสัมผัสระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์นั้นยังเป็นค่าคงเดิม จึงทำให้ค่า J_s เปลี่ยนแปลงไปเป็น 0.289 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นหากนำค่า J_s ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้ แทนค่าลงในสมการที่ 4.3 ค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อจะเปลี่ยนแปลงไปเป็น 0.413 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้ดังรูปด้านล่างนี้



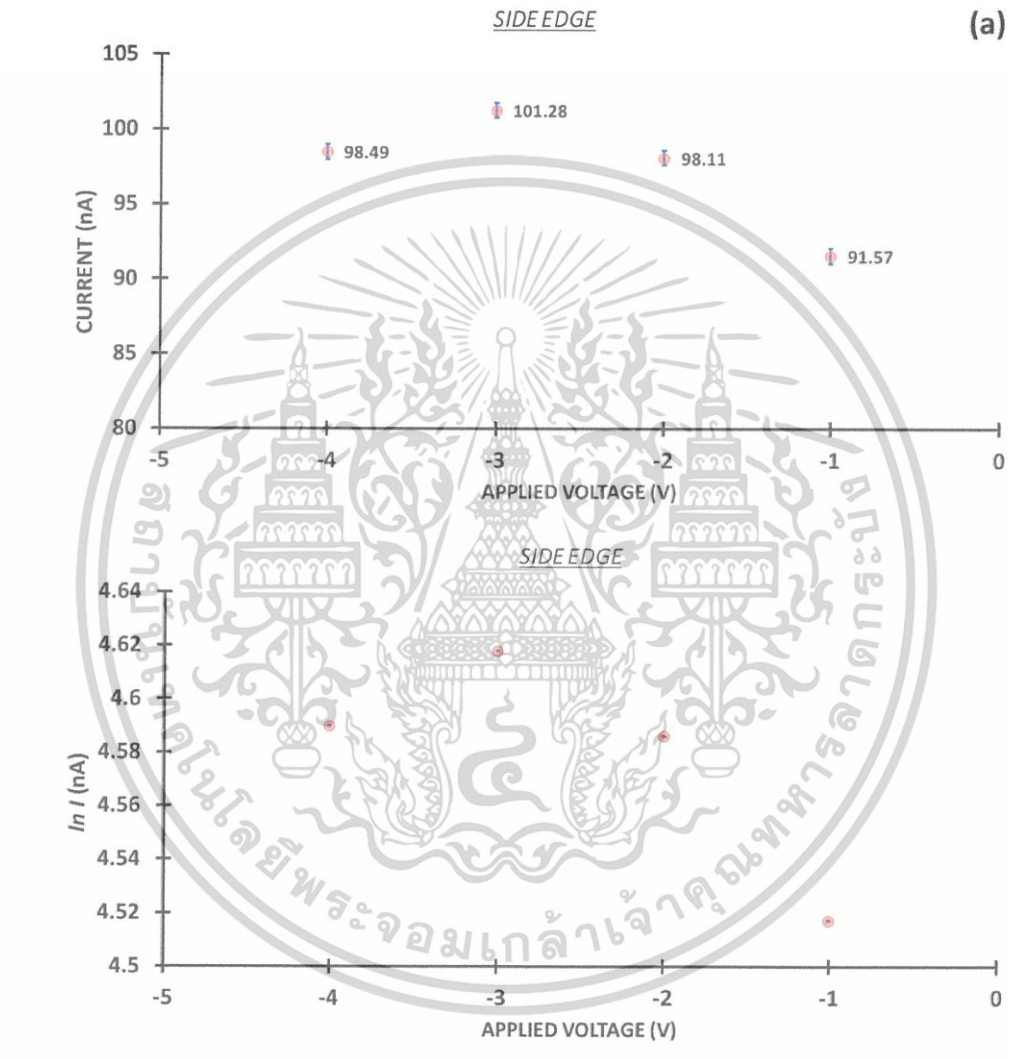
รูปที่ 4.26 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงานในอุดมคติ ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว โดยไม่มีการป้อนความต่างศักย์ (V=0)

ซึ่งจากรูปที่ 4.26 จะพบว่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดในพื้นที่ขอบด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกตรวจสอบ จะมีความสูงลดลงจากความสูงของกำแพงในบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ถึง 0.787 อิเล็กตรอนโวลต์ หมายความว่ากำแพงมีความสูงที่น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงบริเวณรอยต่อนี้ได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แต่ผลนี้เป็นเพียงผลการตรวจสอบภายใต้การไม่ป้อนความต่างศักย์ (V=0) ซึ่งผลของการตรวจสอบและการสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานขณะที่ป้อนความต่างศักย์ที่ค่าบวกและค่าลบจะแสดงในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบ**

กล่าวคือ เป็นการป้อนความต่างศักย์แบบ Forward Bias เนื่องจากจะป้อนความต่างศักย์ฝั่งค่าบวกให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และป้อนความต่างศักย์ค่าลบให้กับขั้วอิเล็กโทรดทองภายใต้แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยจะสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ (I-V Curve Characteristics) ได้ดังนี้

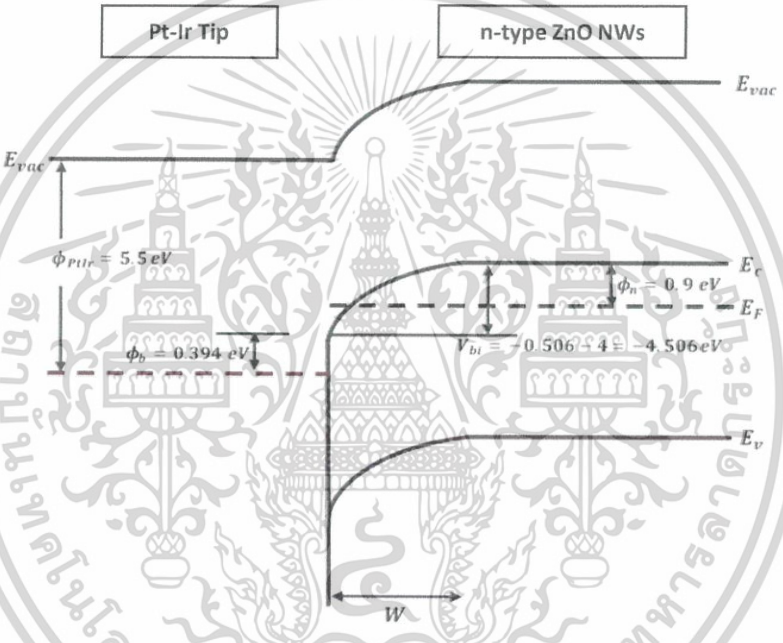


กราฟที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อน (I-V Curve Characteristics) เฉพาะฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ (a) กราฟที่สร้างจากค่าที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนและ *ln I*

โดยจากกราฟที่ 4.10 จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณขอบด้านบนสุดนี้จะมีค่าประมาณอยู่ในช่วง 91.57-101.28 นาโนแอมแปร์ เห็นได้ชัดเจนว่าในขณะที่ป้อนความต่างศักย์ที่ค่า -3 โวลต์ เส้นลวดซิงค์ออกไซด์สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 101.28 นาโนแอมแปร์ ซึ่งมากกว่าขณะที่ป้อนความต่างศักย์ที่ค่าอื่น ๆ ที่เป็นค่าลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟแนวโน้มของกระแสที่เกิดขึ้นเป็นเส้นตรงได้ตามกราฟที่ 4.10(b) โดยจะพบค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ 91.38 นาโนแอมแปร์ แต่ข้อมูลนี้เป็นเพียงค่าเฉลี่ยบนเส้นตรงที่โปรแกรมดำเนินการคำนวณออกมา สามารถระบุค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดได้ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งที่อยู่ที่แท้จริงของระดับชั้นพลังงาน Conduction, ระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิ, และระดับชั้นพลังงาน Valence ได้ เนื่องจากการทดลองเป็นการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ที่หลายค่า หากต้องการระบุตำแหน่งที่ชุดเจนของทั้งสามระดับชั้นพลังงานที่กล่าวไป ต้องเลือกใช้ข้อมูลจากการป้อนความต่างศักย์ที่ค่าใดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงจะสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานจำลองขึ้นขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ และระบุเพียงค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดด้วยค่าที่แน่นอนเท่านั้น แต่ลักษณะการเคลื่อนที่ของทั้งสามระดับชั้นพลังงานจะถูกสร้างให้เห็นเป็นเพียงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเท่านั้น

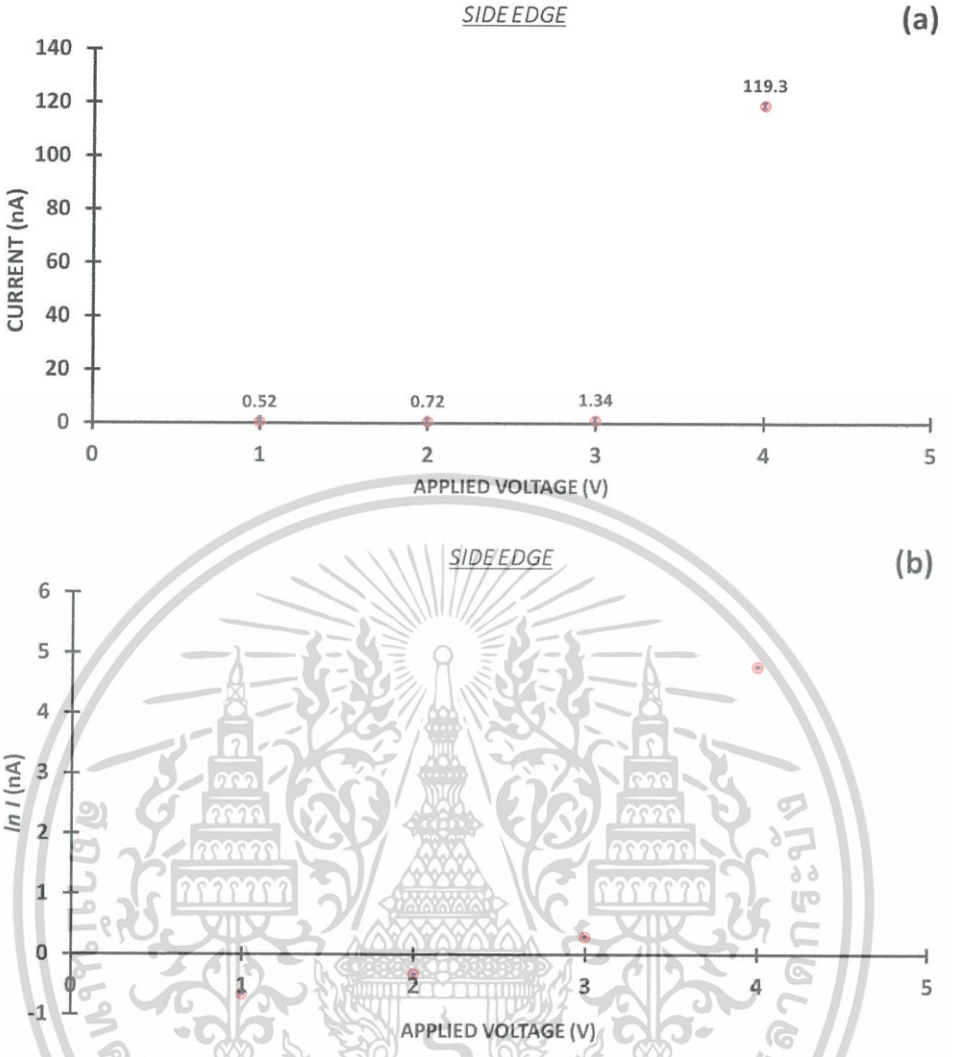


รูปที่ 4.27 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์

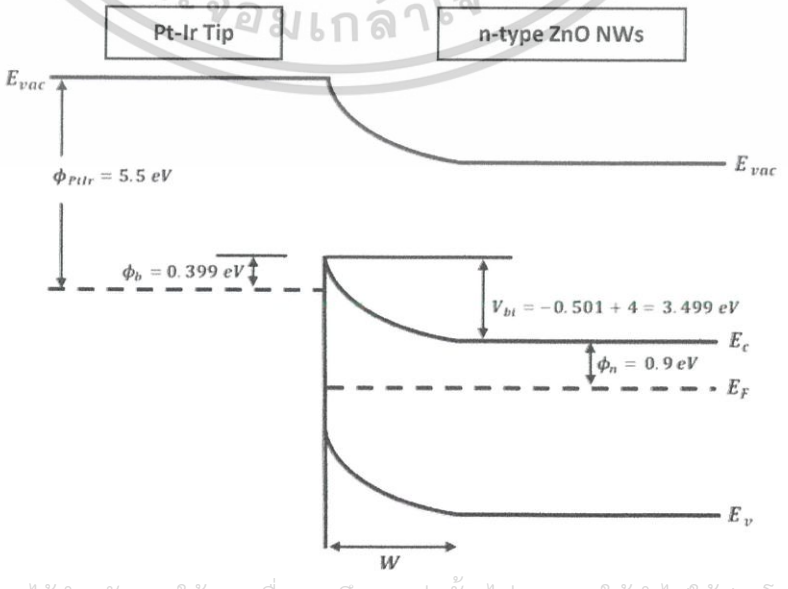
- **การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวก**

กล่าวคือ เป็นการป้อนความต่างศักย์แบบ Reverse Bias เนื่องจากจะป้อนความต่างศักย์ฝั่งค่าลบให้กับหัวเข็ม Pt-Ir และป้อนความต่างศักย์ค่าบวกให้กับขั้วอิเล็กโทรดทองภายใต้แท่งเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยจะสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อนให้ (I-V Curve Characteristics) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าสูงสุดและความต่างศักย์ที่ป้อน (I-V Curve Characteristics) เฉพาะฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก (a) กราฟที่สร้างจากค่าที่วัดได้โดยตรงจากเครื่องมือวัด และ (b) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ป้อนและ *ln I*



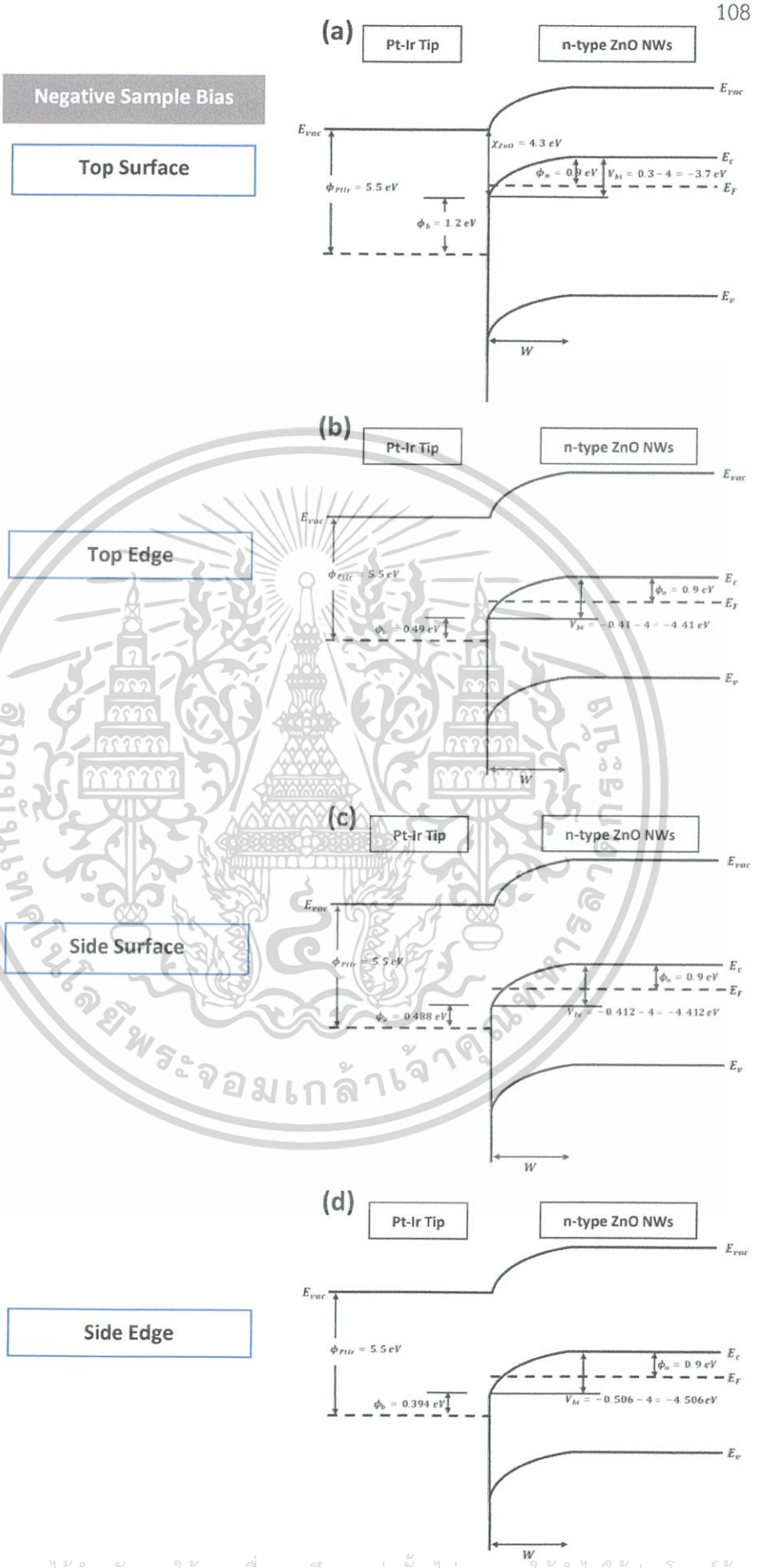
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.28 แผนภาพการจัดเรียงตัวของระดับชั้นพลังงาน ระหว่างหัวเข็ม Pt-Ir และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ในบริเวณขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ขณะที่ทั้งสองวัสดุเคลื่อนตัวเข้ามาสัมผัสกันเรียบร้อยแล้ว ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์

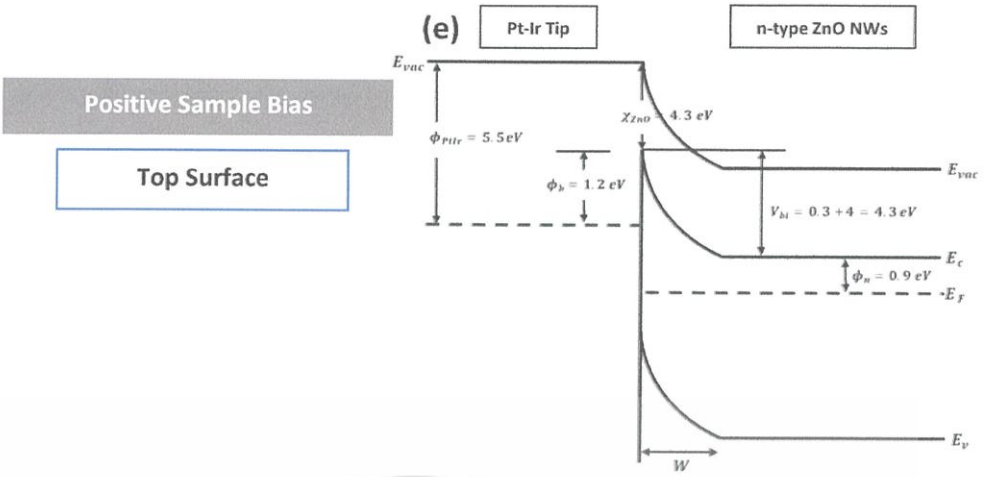
จากกราฟที่ 4.11 จะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงอยู่ในช่วง 0.5-119.3 นาโนแอมแปร์ ซึ่งมีความแตกต่างโดยสิ้นเชิงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ เนื่องจากขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์ จะพบกระแสไฟฟ้าสูงถึง 119.3 นาโนแอมแปร์ ในขณะที่ไม่พบการนำไฟฟ้าลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในบริเวณการตรวจวัดอื่น ๆ และมีค่ากระแสไฟฟ้า ณ จุดตัดแกน Y เท่ากับ 58.77 นาโนแอมแปร์ จึงสามารถนำไปคำนวณค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดได้ แต่ก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งของระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ได้อย่างแน่นอนเช่นเดียวกันกับขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ จึงสามารถสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานได้ตามรูปที่ 4.28

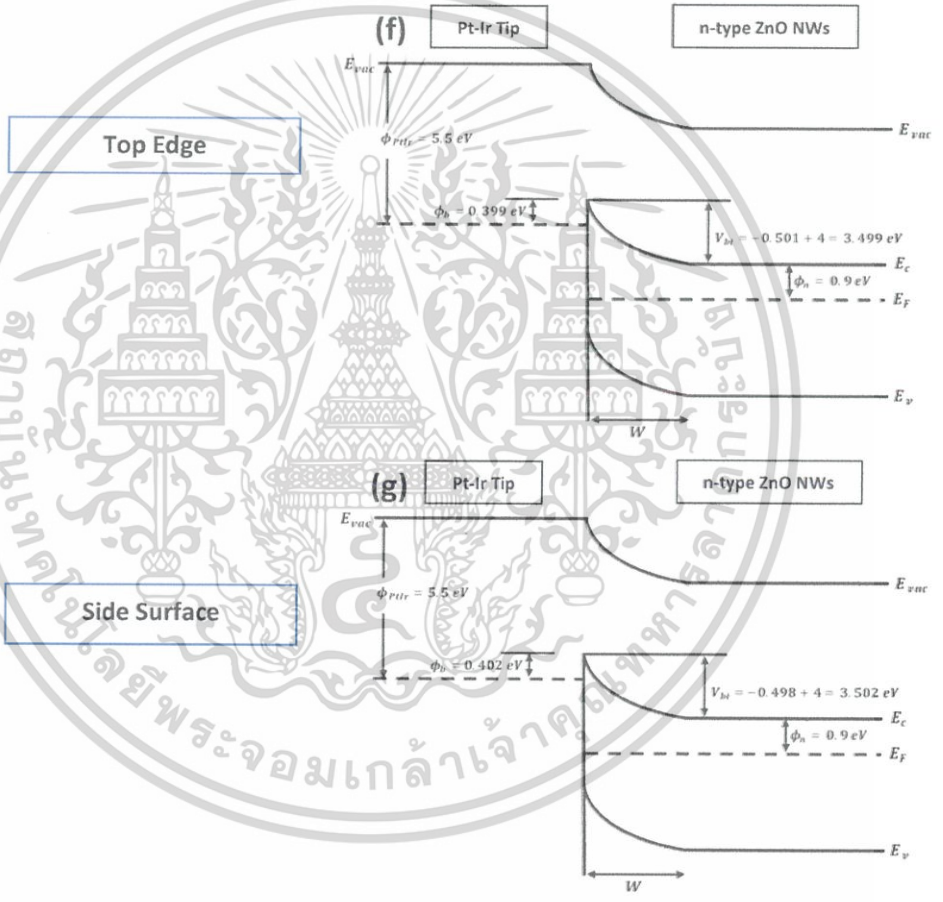
ดังนั้น จากผลการตรวจวัดการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าบริเวณพื้นที่ผิวด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ภายใต้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกและลบนั้น ทำให้พบว่าขณะดำเนินการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกนั้น เส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะเกิดการนำไฟฟ้าที่ค่าต่ำในช่วง 0.52-1.34 นาโนแอมแปร์ เฉพาะการป้อนค่าความต่างศักย์ในช่วง +1 ถึง +3 โวลต์เท่านั้น แต่หากป้อนค่าความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์แล้ว จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างฉับพลันด้วยค่า 119.3 นาโนแอมแปร์ แต่ในขณะเดียวกันที่ป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบนั้น เส้นลวดซิงค์ออกไซด์สามารถนำไฟฟ้าด้วยค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงถึง 91.57-101.58 นาโนแอมแปร์ ซึ่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบนั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนสูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกถึงประมาณ 68 เท่า เป็นผลอันเนื่องมาจากความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดมีความสูงแตกต่างกัน กล่าวคือขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบทำให้กำแพงลดความสูงลง อิเล็กตรอนและโฮลจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยต่อของวัสดุไปได้ หรืออาจใช้วิธีการทะลุผ่านกำแพงนั้นไป ด้วยความสูงที่มากเกินพอทำให้การโค้งงอของระดับชั้นพลังงานมีความแคบและชิดติดกับรอยต่อ และมีบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างต่ำ แต่ในขณะที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกนั้น ทำให้กำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดขยายตัวสูงยิ่งขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามความสูงนี้ได้ และยังไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงนั้นได้อันเนื่องมาจากบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้างสูง

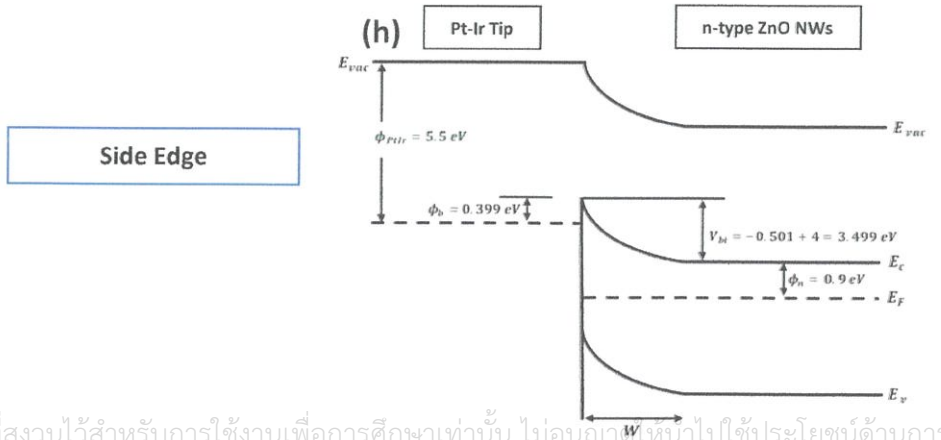
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบแผนภาพระดับชั้นพลังงานทั้ง 4 บริเวณการตรวจสอบ โดยแบ่งเป็นการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ (-4 V.) (Negative Sample Bias) ดังรูปที่ (a, b, c, และ d) และการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวก (+4 V.) (Positive Sample Bias) ดังรูปที่ (e, f, g, และ h)

จากรูปที่ 4.29 เป็นรูปการเปรียบเทียบแผนภาพระดับชั้นพลังงานของแต่ละบริเวณบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนทั้ง 4 บริเวณ คือ พื้นที่ผิวด้านบนสุด (Top Surface), ขอบด้านบนสุด (Top Edge), พื้นที่ผิวด้านข้าง (Side Surface), และ ขอบด้านข้าง (Side Edge) โดยแบ่งการเปรียบเทียบออกเป็น 2 ฝั่ง คือ ฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า -4 โวลต์ (ฝั่งซ้าย) และฝั่งการป้อนความต่างศักย์ด้วยค่า +4 โวลต์ (ฝั่งขวา) จะพบว่าบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะไม่มีการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าแม้แต่เพียงเล็กน้อย และหากพิจารณาแผนภาพระดับชั้นพลังงานแล้วจึงอธิบายได้ว่าการที่ไม่เกิดกระแสไฟฟ้านั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อที่สูงถึง 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ประกอบกับความหนาของชั้นพร่อง (Depletion Region) ที่มีค่าค่าหนึ่ง ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลข้ามรอยต่อของวัสดุจากฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่ง และหากเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ แล้ว จะพบว่าบริเวณอื่น ๆ อีกทั้งสามบริเวณที่เหลือจะมีค่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่ออยู่ในช่วง 0.39-0.49 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากำแพงบริเวณรอยต่อของพื้นที่ผิวด้านบนสุดถึง 0.81 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือทั้งสามบริเวณที่เหลือนั้นมีความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของวัสดุเพียง 32.5% ของความสูงของกำแพงในบริเวณพื้นที่ผิวด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และหากเปรียบเทียบทั้งสามบริเวณ คือ ขอบด้านบนสุด พื้นที่ผิวด้านข้าง และขอบด้านข้าง ด้วยการป้อนความต่างศักย์แล้วจะกล่าวได้อย่างชัดเจนว่า ความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าบวกจะสูงกว่าความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าลบ ทำให้เราตรวจพบค่ากระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำอยู่ในช่วงไม่เกิน 5 นาโนแอมแปร์ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนข้ามกำแพงบริเวณรอยต่อ รวมไปถึงการทะลุผ่านกำแพงมีประสิทธิภาพต่ำ แต่หากต้องการค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงหรือประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่สูงจึงควรเลือกใช้การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบ หรือค่าเป็นบวกที่มากกว่า +4 โวลต์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าขาออกมาสูงอยู่ในหลักร้อยนาโนแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณลักษณะเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการใช้เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดหัวเข็มนำไฟฟ้าภายใต้การดำเนินการตรวจวัดด้วยโหมดการวัดแบบ Quantitative Imaging (QI Mode) เมื่อได้รับผลการตรวจวัดในรูปแบบลักษณะภาพทางสัณฐานวิทยา และภาพการนำไฟฟ้าแบบสองมิติ จะนำข้อมูลเหล่านี้มาสร้างแผนภาพระดับชั้นพลังงานของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในแต่ละบริเวณการตรวจวัด และนำไปสู่การอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าข้ามรอยต่อระหว่างหัวเข็ม C-AFM และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

การศึกษาการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จะทำการศึกษาทั้งหมด 2 เงื่อนไข คือ การใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ และการไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ โดยทั้งสองเงื่อนไขนี้จะใช้การสร้างชั้นฐานรองรับในแต่ละชั้นที่มีลักษณะเดียวกัน คือ ชั้นซิลิกอน ชั้นไททาเนียม และชั้นอิเล็กโทรดทอง ตามลำดับ และในชั้นถัดไปสำหรับเงื่อนไขการใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ คือ ชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ แต่เงื่อนไขไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะไม่มีการสร้างชั้นถัดไป กล่าวคือจะใช้ชั้นอิเล็กโทรดทองเพื่อสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จากการทดลองในส่วนนี้พบว่าการใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ จะมีชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีความหนาถึง 20 นาโนเมตร ซึ่งจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจากเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ไปยังขั้วอิเล็กโทรดทอง เนื่องจากการไหลของประจุในชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์นั้นจะมีทิศทางตามแนวระนาบ เมื่อประจุไม่เคลื่อนที่ตามแนวดิ่งจากเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ไปยังขั้วอิเล็กโทรดทอง จะส่งผลให้ประจุทั้งหมดที่เคลื่อนที่มาจากเส้นลวดซิงค์ออกไซด์เกิดการกระจายตัวไปทั่วชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ และจะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ไปยังชั้นอิเล็กโทรดทองได้ ดังนั้นเงื่อนไขการไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดซิงค์ออกไซด์จึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากจะไม่มีชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ซึ่งจะทำให้ประจุที่เคลื่อนที่มาจากเส้นลวดซิงค์ออกไซด์นั้นสามารถข้ามไปยังชั้นขั้วอิเล็กโทรดทองได้โดยตรง

หลังจากได้รับเงื่อนไขในการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนที่เหมาะสมแล้ว จะนำเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากเงื่อนไขที่ไม่ใช้ชั้นต้นกำเนิดเส้นลวดซิงค์ออกไซด์มาดำเนินการตรวจวัดลักษณะทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องมือ C-AFM ใน 4 บริเวณการตรวจวัด ซึ่งจะพบว่าบริเวณพื้นที่ผิวหน้าด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์จะประพฤติตัวเป็นฉนวนหรือไม่มีการนำกระแสไฟฟ้าในทุกบริเวณ เนื่องจากความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อของทั้งสองวัสดุนั้นมีค่าสูงถึง 1.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างปลายเข็ม C-AFM กับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์มีค่าประมาณเพียง 1.9 ตารางไมโครเมตร จึงเป็นเหตุให้อิเล็กตรอนและโฮลมีพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปริมาณในการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อน้อย จึงไม่พบการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ผิวหน้าด้านบนสุดของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ ในขณะที่ 3 บริเวณที่เหลือ คือ ขอบด้านบนสุด พื้นที่ผิวด้านข้าง และขอบด้านข้างของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขณะป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นลบให้กับหัวเข็ม C-AFM สูงสุดถึง 119.3 นาโนแอมแปร แต่จะแตกต่างกันเพียงความหนาแน่นของจุดที่สามารถนำไฟฟ้า ซึ่งจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ที่ป้อน เป็นผลเนื่องมาจากความสูงของกำแพงระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วง 0.3-0.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ประกอบกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างปลายเข็ม C-AFM และเส้นลวดซิงค์ออกไซด์มีค่ามากกว่า 1.9 ตารางไมโครเมตร จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนและโฮลนั้นมีพื้นที่และจำนวนในการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเป็นจำนวนมาก ในขณะที่การป้อนความต่างศักย์ด้วยค่าเป็นบวกให้กับหัวเข็ม C-AFM จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3 นาโนแอมแปร ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความสูงของกำแพงระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วง 0.45-0.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นความสามารถในการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงขึ้นอยู่กับความสูงของกำแพงบริเวณรอยต่อและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวเข็ม C-AFM กับเส้นลวดซิงค์ออกไซด์

นอกจากนี้ เมื่อทราบถึงลักษณะเชิงกายภาพและลักษณะการนำไฟฟ้าบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ในระดับนาโนที่มีลักษณะรูปทรงเป็นพีระมิดฐานหกเหลี่ยมด้วยเทคนิคการตรวจวัดแบบ C-AFM จะสามารถทำให้เราสามารถพัฒนากระบวนการสังเคราะห์เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ด้วยฐานความรู้นี้ ให้ได้เส้นลวดซิงค์ออกไซด์ที่มีลักษณะเชิงอิเล็กทรอนิกส์ตามที่เราต้องการเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงอุปกรณ์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องให้มีประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิตได้มากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) สำหรับการตรวจวัดความสามารถในการนำไฟฟ้าของเส้นลวดซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยเครื่องมือ C-AFM ในงานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถควบคุมการวัดด้วยหัวเข็ม C-AFM ให้ตรวจวัดซ้ำในพื้นที่เดิมได้ จึงไม่สามารถนำเสนอข้อมูลที่เกิดจากการตรวจวัดซ้ำบนเส้นลวดซิงค์ออกไซด์แต่ละแท่ง จึงสามารถนำเสนอได้เพียงแต่การวัดซ้ำด้วยเงื่อนไขเดิม แต่เป็นพื้นที่การวัดใหม่ในทุกครั้ง จึงอาจเป็นการลดความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ ดังนั้นจึงควรตรวจวัดในหลายพื้นที่และวิเคราะห์ข้อมูลโดยอ้างอิงหลักการทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Wang, S., L. Lin, and Z.L. Wang, *Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics.* Nano Letters, 2012. **12**(12): p. 6339-6346.

[2] Zhu, G., et al., *Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator.* Nano Letters, 2013. **13**(2): p. 847-853.

[3] Zhang, X.-S., et al., *Frequency-Multiplication High-Output Triboelectric Nanogenerator for Sustainably Powering Biomedical Microsystems.* Nano Letters, 2013. **13**(3): p. 1168-1172.

[4] Niu, S., et al., *Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators.* Advanced Materials, 2013. **25**(43): p. 6184-6193.

[5] Chen, J., et al., *Harmonic-Resonator-Based Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Power Source and a Self-Powered Active Vibration Sensor.* Advanced Materials, 2013. **25**(42): p. 6094-6099.

[6] Lee, K.Y., et al., *Hydrophobic Sponge Structure-Based Triboelectric Nanogenerator.* Advanced Materials, 2014. **26**(29): p. 5037-5042.

[7] Jirayupat, C., et al., *Piezoelectric-Induced Triboelectric Hybrid Nanogenerators Based on the ZnO Nanowire Layer Decorated on the Au/polydimethylsiloxane–Al Structure for Enhanced Triboelectric Performance.* ACS Applied Materials & Interfaces, 2018. **10**(7): p. 6433-6440.

[8] Opoku, C., et al., *Fabrication of ZnO Nanowire Based Piezoelectric Generators and Related Structures.* Physics Procedia, 2015. **70**: p. 858-862.

[9] Wang, Z. and J. Song, *Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays.* Vol. 312. 2006. 242-6.

[10] Coleman, V.A. and C. Jagadish, *Chapter 1 - Basic Properties and Applications of ZnO*, in *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures*, C. Jagadish and S. Pearton, Editors. 2006, Elsevier Science Ltd: Oxford. p. 1-20.

[11] Look, D.C., *Chapter 2 - Doping and Defects in ZnO*, in *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures*, C. Jagadish and S. Pearton, Editors. 2006, Elsevier Science Ltd: Oxford. p. 21-42.

[12] K. Meyer, B., et al., *Bound exciton and donor–acceptor pair recombinations in ZnO.* Vol. 241. 2004. 231-260.

[13] Ellmer, K. and A. Klein, *Transparent Conductive Zinc Oxide Basics and Applications in Thin Film Solar Cells.* Vol. 104. 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Gasparotto, G., et al., *Novel Route for Fabrication of ZnO nanorods-Au Nanoparticles Hybrids Directly Supported on Substrate and their Application as Gas Sensors %J Materials Research.* 2018. **21**.

[15] Xu, S., C. Lao, and B. Weintraub, *Density-controlled growth of aligned ZnO nanowire arrays by seedles chemical approach on smooth surfaces.* Vol. 23. 2008.

[16] K. Arora, V. and F. G. Awad, *Quantum size effect in semiconductor transport.* Vol. 23. 1981. 5570-5575.

[17] Fan, F.-R., Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, *Flexible triboelectric generator.* Nano Energy, 2012. **1**(2): p. 328-334.

[18] Zhu, G., et al., *Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning.* Nano Letters, 2012. **12**(9): p. 4960-4965.

[19] Wang, X., Z.L. Wang, and Y. Yang, *Hybridized nanogenerator for simultaneously scavenging mechanical and thermal energies by electromagnetic-triboelectric-thermoelectric effects.* Nano Energy, 2016. **26**: p. 164-171.

[20] Wang, J., et al., *A Flexible Fiber-Based Supercapacitor–Triboelectric-Nanogenerator Power System for Wearable Electronics.* Vol. 27. 2015.

[21] Qiang, Z., et al., *In Vivo Powering of Pacemaker by Breathing-Driven Implanted Triboelectric Nanogenerator.* Vol. 26. 2014.

[22] Zi, Y., et al., *Standards and figure-of-merits for quantifying the performance of triboelectric nanogenerators.* Nature Communications, 2015. **6**: p. 8376.

[23] Joo Kim, Y., et al., *Effect of the relative permittivity of oxides on the performance of triboelectric nanogenerators.* Vol. 7. 2017. 49368-49373.

[24] Ko, Y.H., et al., *PDMS-based Triboelectric and Transparent Nanogenerators with ZnO Nanorod Arrays.* Vol. 6. 2014.

[25] Kim, S., et al., *Transparent Flexible Graphene Triboelectric Nanogenerators.* Vol. 26. 2014.

[26] Giessibl, F., *Principle of NC-AFM.* 2011. p. 11-46.

[27] Olbrich, A., B. Ebersberger, and C. Boit, *Conducting atomic force microscopy for nanoscale electrical characterization of thin SiO2.* Vol. 73. 1998. 3114-3116.

[28] Olbrich, A., B. Ebersberger, and C. Boit, *Nanoscale electrical characterization of thin oxides with conducting atomic force microscopy.* 1998. 163-168.

[29] A. Peterson, C., et al., *Effects of moisture on Fowler-Nordheim characterization of thin silicon-oxide films.* Vol. 17. 1999. 2753-2758.

[30] P. Murrell, M., et al., *Spatially resolved electrical measurements of SiO2 gate oxide using atomic force microscopy.* Vol. 62. 1993. 786-788.

[31] J. Oshea, S., R. Atta, and M. E. Welland, *Characterization of Tips for Conducting Atomic-Force Microscopy.* Vol. 66. 1995. 2508-2512.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[32] J. Oshea, S., et al., *Conducting atomic force microscopy study of silicon dioxide breakdown.* Vol. 13. 1995. 1945-1952.

[33] Petermann, N., et al., *Plasma synthesis of nanostructures for improved thermoelectric properties.* Journal of Physics D: Applied Physics, 2011. **44**(17): p. 174034.

[34] Stoib, B., et al., *Morphology, thermoelectric properties and wet-chemical doping of laser-sintered germanium nanoparticles.* Vol. 210. 2013. 153-160.

[35] Butt, H.-J., B. Cappella, and M. Kappl, *Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications.* Surface Science Reports, 2005. **59**(1): p. 1-152.

[36] Frammelsberger, W., et al., *C-AFM-based thickness determination of thin and ultra-thin SiO2 films by use of different conductive-coated probe tips.* Applied Surface Science, 2007. **253**(7): p. 3615-3626.

[37] Chiu, F.-C., *A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films.* Vol. 2014. 2014. 1-18.

[38] Sze, S.M. and K. K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices / S.M. Sze, K.K. NG.* 2019.

[39] Frammelsberger, W., et al., *Simplified tunnelling current calculation for MOS structures with ultra-thin oxides for conductive atomic force microscopy investigations.* Materials Science and Engineering: B, 2005. **116**(2): p. 168-174.

[40] Melitz, W., et al., *Kelvin probe force microscopy and its application.* Surface Science Reports, 2011. **66**(1): p. 1-27.

[41] Celano, U., et al., *Evaluation of the electrical contact area in contact-mode scanning probe microscopy.* Vol. 117. 2015. 214305.

[42] Bloeß, H., G. Staikov, and J.W. Schultze, *AFM induced formation of SiO2 structures in the electrochemical nanocell.* Electrochimica Acta, 2001. **47**(1): p. 335-344.

[43] Berhanu, T., *WORKING PRINCIPLE OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPE.* 2018.

[44] Ebnesajjad, S., *Chapter 4 - Surface and Material Characterization Techniques*, in *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding (Second Edition)*, S. Ebnesajjad, Editor. 2014, William Andrew Publishing: Oxford. p. 39-75.

[45] Ramaiah, G., R.K. P., and D. Bhatia, *Structural Analysis Of Merino Wool, Pashmina And Angora Fibers Using Analytical Instruments Like Scanning Electron Microscope And Infra-Red Spectroscopy.* Vol. 4. 2017. 112-125.

[46] Bumbrah, G.S. and R.M. Sharma, *Raman spectroscopy – Basic principle, instrumentation and selected applications for the characterization of drugs of abuse.* Egyptian Journal of Forensic Sciences, 2016. **6**(3): p. 209-215.

[47] M S, P., *X-ray Diffraction Analysis: Principle, Instrument and Applications.* 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายวัชรพงศ์ คล้อยสุวรรณ์
วันเกิด	7 กันยายน 2539
ภูมิลำเนา	จังหวัดอ่างทอง
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 16 หมู่ 4 ตำบล สามโก้ อำเภอ สามโก้ จังหวัด อ่างทอง 14160

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2562	เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท (Master's Degree) Major of Surfaces Light Engineering – Health & Society (SISE) University Jean Monnet, Saint-Etienne, France
พ.ศ. 2562	จบการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย ลพบุรี
พ.ศ. 2555	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนอ่างทองบัทมโรจน์วิทยาคม อ่างทอง

ประวัติการรับทุนการศึกษา

พ.ศ. 2562	EUR SLEIGHT Scholarship for Master's Degree Major of Surfaces Light Engineering – Health & Society (SISE) University Jean Monnet, Saint-Etienne, France
พ.ศ. 2561	ทุนโครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโน (YSTP) จาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
พ.ศ. 2561	ทุนแลกเปลี่ยนกับสถาบันอุดมศึกษาในต่างประเทศ จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ณ National Institute of Technology, Kushiro College, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้