



รายงานการวิจัย

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่ระดับนาโนของสารกลุ่มเพียโซอิเล็กทริก
เฟอร์โรอิเล็กทริกและกำแพงเฟอร์โรอิเล็กทริกโดเมน ด้วยกล้องจุลทรรศน์
แบบส่องกราด

**Comprehensive Nanoscale Electronic Characterization of Piezoelectric
Ferroelectrics and Ferroelectrics Domain Walls with Scanning Probe
Microscopy**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่ระดับนาโนของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วย
กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

Comprehensive Nanoscale Electronic Characterization of Zinc Oxide

Nanowires with Scanning Probe Microscopy

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร.วรสุม กุญฑิกายงษ์

สาขาฟิสิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวอรดี ศรีกิมแก้ว

นางสาวสาทนีย์ สืบคำ

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2561

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559 เป็นการเริ่มต้นการนำเครื่องมือวัดประเภทกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดชนิดวัดการนำไฟฟ้ามาใช้ศึกษา เส้นลวดลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ที่ปลูกโดยกลุ่มวิจัยของ ดร.อรรรณพ คล้ำชื่น ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ในเบื้องต้นผู้วิจัยใช้เวลาส่วนมากในการเตรียมอุปกรณ์ และหาปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเพื่อนำมาศึกษาต่อ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจากหลาย ๆ ฝ่าย โอกาสนี้ ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร ยี่มนิรัญ ศาสตราจารย์ ดร.สันติ แม้นศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ มีวาสนา รศ.ดร. สาโรช รุจิรวรรณ สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แก้ไข และให้แนวคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนงบประมาณ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความช่วยเหลือ ด้านเครื่องมือวิจัย ตลอดจนเพื่อนร่วมงานสำหรับความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนาม ได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกคนเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

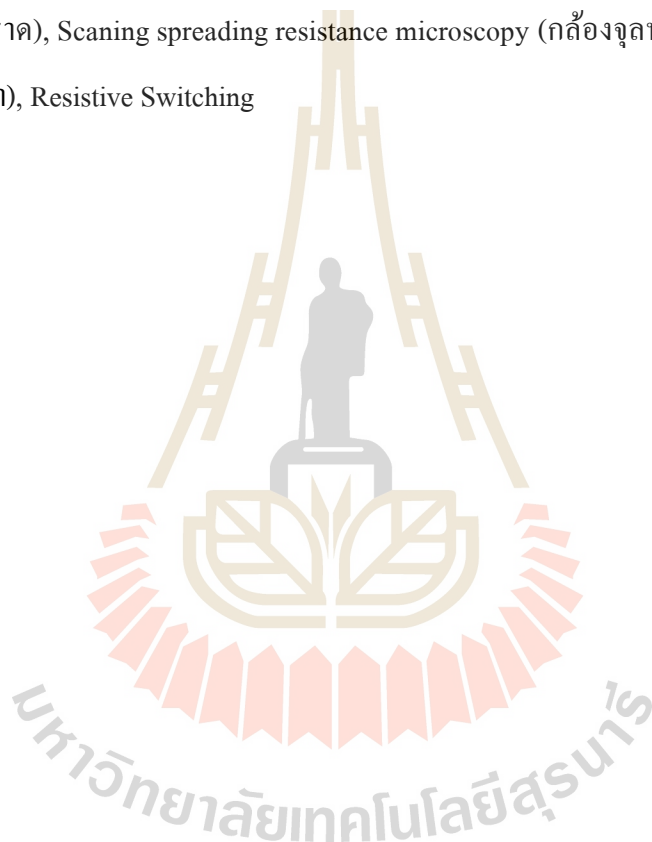
ดร.วรสม กุณทีกาญจน์

บทคัดย่อภาษาไทย

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นหนึ่งในสารที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (resistive switching phenomena) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สารสามารถเปลี่ยนสถานะความต้านทานกลับไปกลับมาระหว่างสถานะที่มีความต้านทานสูงและความต้านทานต่ำโดยใช้สนามไฟฟ้า ความรู้เรื่องปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานนั้นจำเป็นต่อการพัฒนาหน่วยความจำประเภท resistive random access memory. ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในฟิล์มซิงค์ออกไซด์ชนิด unipolar ซึ่งการสลับสถานะความต้านทานในฟิล์มซิงค์ออกไซด์เกิดจากการเกิดใยนำไฟฟ้า (conductive filament) ที่อยู่ในฟิล์ม แต่ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์นั้น มีลักษณะที่ต่างไป ขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของลวดและความยาว การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานนั้น ใช้โครงสร้างที่มีสารอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วสองขั้ว โดยขั้วนั้นทำหน้าที่ใส่ศักย์ไฟฟ้า และวัดความต้านทาน งานวิจัยฉบับนี้ศึกษา ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดวัดการนำไฟฟ้า (conductive atomic force microscopy ย่อว่า C-AFM) เส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ปลูกด้วยวิธี hydrothermal ในแนวตั้งบนแผ่นกระจกที่เคลือบด้วยเงิน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วล่าง ส่วนเข็มวัด C-AFM ที่ทำจากแพลทินัมทำหน้าที่เป็นขั้วบน การทำการทดลองบนระบบ C-AFM ทำให้สามารถวัดกราฟ I-V (I-V characteristics) ของเส้นลวดนาโนแต่ละเส้นได้โดยตรง ผลการทดลองพบว่าปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นเป็นแบบ unipolar เหมือนกับฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธีเดียวกัน เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะ (V_{set} และ V_{reset}) หลาย ๆ รอบ พบว่าค่าต่างไปในแต่ละรอบ และบางค่าจะคาบเกี่ยวกัน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะจากเส้นลวดนาโนแต่ละเส้นยังต่างกัน เมื่อเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด พบว่าไม่มีความเกี่ยวข้องกัน ทำให้สรุปได้ว่าปรากฏการณ์นั้นเกิดจากใยนำไฟฟ้า กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์แสดงให้เห็นว่าสถานะที่มีความต้านทานต่ำมีการนำไฟฟ้าแบบ charge-limited current สถานะที่มีความต้านทานสูงมีการนำไฟฟ้าแบบ Ohmic ในขณะที่ฟิล์มซิงค์ออกไซด์จะมีกระแสที่สูงกว่า และมีศักย์ไฟฟ้าสลับสถานะที่ต่ำกว่า และมีลักษณะการนำไฟฟ้าแบบ space-charge

limited current สำหรับทั้งสองสถานะความต้านทาน การที่ฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะที่ต่ำกว่านั้น เนื่องจากมีจำนวนโยนนำไฟฟ้ามากกว่า ลักษณะกราฟ I-V ที่ต่างกันระหว่างเส้นลวดนาโนและฟิล์มซิงค์ออกไซด์นั้นบ่งบอกถึงกลไกการนำไฟฟ้าที่ต่างกันซึ่งน่าจะเกิดจากพื้นที่ผิวของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มากกว่า

คำสำคัญ (Keywords): Nanoscale science (วิทยาศาสตร์นาโน), Scanning probe microscopy (กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด), Scanning spreading resistance microscopy (กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดเพื่อวัดความต้านทานไฟฟ้า), Resistive Switching



บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Zinc oxide (ZnO) is one of the model materials for studying resistive switching phenomena, which means that a material can switch between two resistance states, high resistance and low resistance states, by applying electric field. Understanding resistive switching phenomena is important for development of resistive random access memory. Resistive switching phenomena in ZnO film is a unipolar type and occur due to formation of filament conductive paths; however the behavior in ZnO nanowires differ depending on surface areas and lengths. Studying resistive switching phenomena requires sandwich structure, in which the material sits between two electrodes, for applying voltage and measuring current. In this work, we study ZnO nanowire using conductive atomic force microscopy (C-AFM). The ZnO nanowires were vertically growth on an Ag/glass substrate using a hydrothermal method, which serves as a bottom electrode. A conductive Pt tip serves as a top electrode. By conducting experiments on a C-AFM platform, I-V characteristics of individual nanowires can be obtained. We found that ZnO nanowires exhibit unipolar switching behavior, the same ZnO film growth by the same method. The V_{set} and V_{reset} values of a nanowire over many cycles varies with some overlapped values. The switching voltages from different nanowires also varies. When consider dependence on the nanowire cross-section area, we found no correlation with the switching voltage values. This suggests that the resistive switching phenomena here is caused by a conductive filament. The I-V characteristics of ZnO shows charge-limited current behavior in the low resistance state, and Ohmic behavior for the high resistance state. The ZnO film has higher current and lower switching voltages with space-charge limited current for both high and low resistance states. The lower switching voltages in ZnO film is likely due to more conductive filaments. Different I-V characteristics between the nanowires and the film suggest different conduction mechanism due to more surface area of the nanowires.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
สมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	4
ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (RESISTIVE SWITCHING PHENOMENA)	5
กลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (SWITCHING MECHANISMS)	7
กลไกการนำไฟฟ้าในสารกลุ่มออกไซด์ (CONDUCTION MECHANISMS)	10
การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดวัดการนำไฟฟ้า.....	13

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	15
ตัวอย่างซิงค์ออกไซด์	15
วิธีการเก็บกราฟ I-V	16
โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูล	17
บทที่ 4 ผลการวิจัย	20
ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	20
ลักษณะกราฟ I-V (I-V CHARACTERISTICS) ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	21
ความสามารถในการสลับสถานะไปมา (SWITCHING REPRODUCIBILITY) ของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	23
ลักษณะกราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์	25
บทที่ 5 บทสรุป	28
สรุปผลการวิจัย	28
ข้อเสนอแนะ	29
บรรณานุกรม.....	30
ภาคผนวก การเผยแพร่ผลงาน.....	32
1. การเผยแพร่ผลงานใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเยาวชน ครั้งที่ 12 ระหว่างวันที่ 3 - 4 มิถุนายน 2560 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ	32
2. การเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการ	35
ประวัติผู้วิจัย.....	38

สารบัญภาพ

รูปที่ 1: โครงสร้าง unit cell แบบ wurtzite ของสารซิงค์ออกไซด์	5
รูปที่ 2: ขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ประกอบไปด้วยการ forming reset และ set เมื่อมีการใส่ศักย์ไฟฟ้า (V_{ext}) เข้าไปในสารและวัดกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัด อยู่ที่ค่า compliance current	6
รูปที่ 3: กราฟ I-V เปรียบเทียบปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ unipolar และ bipolar ...	7
รูปที่ 4: การเกิดใยนำไฟฟ้า (filament) เมื่อเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ในสารกลุ่มออกไซด์ (Lee <i>et al.</i> , 2015 and Kim <i>et al.</i> , 2011)	8
รูปที่ 5: ภาพ TEM ของการเกิดใยนำไฟฟ้า(filament) ขณะที่ฟิล์มซิงออกไซด์กำลังเปลี่ยนสถานะ การนำไฟฟ้า (a) แสดงการแก้ไข (b) การขาดของใย (rupture) (c) กราฟ I-V ขณะที่สารกำลังเปลี่ยนสถานะ (Chen <i>et al.</i> , 2013)	9
รูปที่ 6: (a) การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ bipolar switching ในอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Cu/ZnO-NW/Pd. (b) ภาพ EDX เมื่อสารอยู่ในสถานะ LRS. (c) ภาพ SEM ที่เก็บจากพื้นที่เดียวกัน (Yang <i>et al.</i> , 2011).....	9
รูปที่ 7: ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส (current density J) และสนามไฟฟ้า (electric field E) ของอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Pt/ZnO thin film/Pt (Chang <i>et al.</i> , 2008).....	12
รูปที่ 8: (a) กราฟ I-V curve ของอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Ag/ZnO microwire/Ag. (b) กราฟระหว่าง $\ln(I/V)$ กับ $V^{1/2}$ และกราฟระหว่าง I กับ V^2 แสดงให้เห็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบ Poole-Frenkel emission และ Space-Charge Limited Current (Huang <i>et al.</i> , 2014).	12
รูปที่ 9: ภาพ C-AFM ของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์ (Chae <i>et al.</i> , 2008).....	13
รูปที่ 10: ภาพ topography (a) และภาพกระแสไฟฟ้า เมื่อซิงค์ออกไซด์อยู่ในสถานะ HRS (c) และ ภาพ topography (b) และภาพกระแสเมื่อสารอยู่ในสถานะ LRS (d) (Zhuge <i>et al.</i> , 2011).	14
รูปที่ 11: ภาพ topography และภาพกระแสไฟฟ้า (C-AFM image) ที่วัดบน ZnO nanoisland. (Qi <i>et al.</i> , 2013).	14

รูปที่ 12: การวัดค่าความต้านทานเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ประกอบด้วยสารไดอิเล็กทริก (dielectric materials) อยู่ระหว่างขั้วบนและขั้วล่าง	15
รูปที่ 13: การวัดกราฟ I-V บนฟิล์มและลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดวัดการนำไฟฟ้า	16
รูปที่ 14: ก) การติดตั้งเพื่อป้องกันความต่างศักย์และวัดค่ากระแสระหว่างเส้นลวดนาโนของ ZnO ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานชนิดหนึ่งขั้ว เมื่อ LRS คือสถานะที่มีความต้านทานต่ำ HRS คือสถานะที่มีความต้านทานสูง ค่าCC และ I_T เป็นค่าที่กำหนดเพื่อใช้ในการทำงานของโปรแกรมดัง รูปที่ 16.....	17
รูปที่ 15: โปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ Keysight2901A, ตั้งค่าการป้องกันค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และวัดกระแสไฟฟ้า ระหว่างขั้ว และแสดงผล	18
รูปที่ 16: Flowchart ของโปรแกรมในรูปที่ 1 โดย I คือค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ ค่า CC และ I_T คือค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้เพื่อใช้พิจารณาสถานะดังรูปที่ 1 ΔI คือค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าในแต่ละจุด และ δI คือค่าความต่างศักย์ของกระแสที่คณะผู้วิจัยกำหนดเพื่อไว้เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว	19
รูปที่ 17: (a) ภาพจากกล้อง SEM (b) และ(c) ภาพ 2 มิติและ 3 มิติ ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	21
รูปที่ 18: กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ มีการจำกัดกระแสที่ 10 μA	21
รูปที่ 19: กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าในทิศเดียว แสดงให้เห็น unipolar resistive switching behavior.....	22
รูปที่ 20: กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ แสดงลักษณะการนำไฟฟ้าของสถานะที่มีความต้านทานต่ำ เทียบกับโมเดลการนำไฟฟ้าแบบ space-charge limited current และสถานะที่มีความต้านทานสูง เทียบกับโมเดล Ohmic behavior.....	23
รูปที่ 21: (a) กราฟ I-V ของของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เมื่อผ่านการสลับสถานะไปมาห้ารอบ (cycles) (b) สรุปลค่า V_{set} และ V_{reset} ของแต่ละรอบ	24
รูปที่ 22: สรุปลค่าการกระจายตัวของ $V_{forming}$ V_{set} และ V_{reset} ที่วัดได้จากเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์สิบเส้น	24
รูปที่ 23: ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{forming}$ V_{set} และ V_{reset} กับพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์	25

รูปที่ 24: กราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์..... 26

รูปที่ 25: สรุปลค่าการกระจายตัวของ V_{forming} V_{set} และ V_{reset} ที่จุดต่าง ๆ บนฟิล์มซิงค์ออกไซด์..... 26

รูปที่ 26: กราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ แสดงลักษณะการนำไฟฟ้าของสถานะที่มีความต้านทานต่ำและสูง เป็นไปตามโมเดลการนำไฟฟ้าแบบ space-charge limited current..... 27



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1: สมบัติของซิงค์ออกไซด์.....	4
ตารางที่ 2: กลไกการเกิดการนำไฟฟ้าและกราฟ I-V ที่เกี่ยวข้องกับกลไกนั้น	11



คำอธิบายสัญลักษณ์

ZnO	Zinc Oxide (ซิงค์ออกไซด์)
AFM	Atomic Force Microscope (กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม)
C-AFM	Conductive Atomic Force Microscope (กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโหมดวัดการนำไฟฟ้า)
SEM	Scanning Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)
TEM	Transmission Electron Microscope
HRS	High Resistance State
LRS	Low Resistance State
CC	Current Compliance (ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องจะยอมให้ทำงาน)
I	Current (กระแสไฟฟ้า)
V	Voltage (ศักย์ไฟฟ้า)
V_{forming}	Forming Voltage
V_{reset}	Reset Voltage
V_{set}	Set Voltage
I_T	เป็นค่ากระแสที่คณะผู้วิจัยกำหนดเพื่อประกอบในเงื่อนไขการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้า
ΔI	ค่าความต่างของกระแสไฟฟ้าในแต่ละจุด
δI	ค่าความต่างของกระแสไฟฟ้าที่คณะผู้วิจัยกำหนดเพื่อไว้เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีการประยุกต์ใช้ในหน่วยความจำแบบถาวร (non-volatile memory) ซึ่งเรียกว่า “reactive random access memory” (RRAM) ในอนาคตอุปกรณ์หน่วยความจำจะมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาด RRAM เป็นหน่วยความจำชนิดหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับหน่วยความจำขนาดเล็ก เนื่องจากโครงสร้างของ RRAM สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กได้ง่าย การทำความเข้าใจปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับเทคโนโลยีหน่วยความจำในอนาคต โดยส่วนใหญ่ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับ ค่าความต้านทานได้รับการศึกษาในวัสดุประเภทออกไซด์ ในวัสดุประเภทออกไซด์ที่เกิดปรากฏการณ์ การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพ ที่เป็นเอกลักษณ์และการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Schmidt-Mende et al., 2007 and Cui, 2012) ซึ่งออกไซด์ มีโครงสร้างนาโนที่แตกต่างกันหลายแบบในอุปกรณ์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น nanowires, nanorods, nanobelts, nanocombs เป็นต้น (Schmidt-Mende et al., 2007) ดังนั้น การทำความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานของซิงค์ออกไซด์ในโครงสร้างระดับนาโน จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้งานในหน่วยความจำขนาดเล็ก

ในงานวิจัยเบื้องต้นคณะผู้วิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO nanowires) คณะผู้วิจัยพบว่าพฤติกรรมของการเปลี่ยนกลับเป็นแบบขั้วเดียว (unipolar switching) และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานของลวดนาโนแต่ละเส้นมีความแตกต่างกัน กลไกการนำไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแบบขั้วเดียว และความแตกต่างของ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานยังไม่เป็นที่เข้าใจ ในระดับนาโนนั้น การตรวจสอบกลไกการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานโดยตรงเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก และมีต้นทุนสูง กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีศักยภาพสำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนกลับค่า ความต้านทาน เนื่องจากสามารถวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุใน

ขอบเขตเล็ก ๆ ที่สอดคล้องกับสัณฐานวิทยาของวัสดุได้ นอกจากนี้ขนาดของเข็มที่ใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้าใน AFM มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้สามารถใช้เป็นหัวขนาดเล็กสำหรับการวัดทางไฟฟ้าในวัสดุที่มีขนาดเล็กได้

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า (I-V characteristics) และศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของตัวอย่างจะถูกวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโหมดศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้า (Conductive AFM, C-AFM)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.1 ติดตั้งอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสำหรับการวัดค่าความต้านทาน โดยใช้เครื่อง source measurement unit เขียนโปรแกรมเพื่อเก็บข้อมูล และหาค่าการวัดที่เหมาะสม
- 1.2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 1.3 เพื่อทำความเข้าใจกลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์
- 1.4 เพื่อศึกษกลไกการนำไฟฟ้าในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์

ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโหมดศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ โดยใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกและวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่าง รวมไปถึงการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ศึกษาเป็นความร่วมมือกับกลุ่มวิจัยของ ดร. อรรถพล คล้าชื่น ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC)

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้มีประโยชน์ทางด้านวิชาการ เป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ทางด้านเทคนิคการวัดและความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ หลังจากเสร็จสิ้นการวิจัย คณะผู้วิจัยคาดหวังที่จะเข้าใจกลไกการนำไฟฟ้าและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ และสามารถประยุกต์ใช้กับการทดลองในวัสดุอื่น ๆ ตลอดจนสามารถใช้ความรู้ที่ได้รับไปพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำแบบถาวรได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความร่วมมือระหว่างกลุ่มวิจัยที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ นอกจากนี้ในโครงการได้มีการฝึกนักศึกษาในระดับปริญญาโท หนึ่งคน คือ นางสาว อรดี ศรีгимแก้ว และนักศึกษาระดับปริญญาตรี หนึ่งคน คือ นางสาวสาทนีย์ สืบคำ โดย นางสาว อรดี ศรีгимแก้ว ได้นำเสนอเค้าโครงวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ STUDYING RESISTIVE SWITCHING BEHAVIOR IN ZINC OXIDE NANOWIRES WITH ATOMIC FORCE MICROSCOPE (การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม) ในเดือน มีนาคม 2561 และกำลังอยู่ในระหว่างการเขียนวิทยานิพนธ์

อนึ่งมีการเผยแพร่ผลงานในรูปแบบการนำเสนอโปสเตอร์ ณ การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเยาวชน ครั้งที่ 12 ระหว่างวันที่ 3 - 4 มิถุนายน 2560 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุม ไบเทค กรุงเทพฯ โดยมีหัวข้อการนำเสนอเรื่อง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และวารสารทางวิชาการ เรื่อง The Biomechanical Role of Overall-shape Transformation in a Primitive Multicellular Organism: A Case Study of Dimorphism in the Filamentous Cyanobacterium *Arthrospira platensis* วารสาร PLoS ONE โดยสามารถดูรายละเอียดของการเผยแพร่ได้ในภาคผนวก

บทที่ 2

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติของซิงค์ออกไซด์

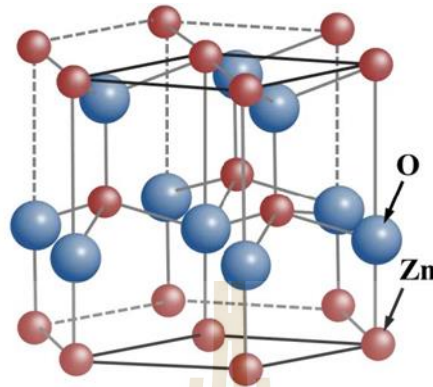
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติที่น่าสนใจ มีกลุ่มวิจัยสนใจศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น LED เลเซอร์ เซ็นเซอร์ และแผง solar cells (Schmidt-Mende *et al.*, 2007 and Cui, 2012) ตารางที่ 1 สรุปสมบัติของซิงค์ออกไซด์ (Zhang, 1996) ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบ hexagonal wurtzite รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างแบบ hexagonal wurtzite ของ ซิงค์ออกไซด์ โดย unit cell ของซิงค์ออกไซด์ประกอบไปด้วย อะตอมของซิงค์ (แดง) ส้อมไปด้วยอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม (ฟ้า)

Physical properties	Value
Lattice	Hexagonal, wurtzite
Lattice constants	$a = 0.324 \text{ nm}$, $c = 0.519 \text{ nm}$, $c/a = 1.60$
Band gap energy	3.2 eV
Dielectric constant	8.66
Refractive index	2.008
Specific heat	9.66 cal/(mol-K)
Intrinsic carrier concentration	$<10^6 \text{ cm}^{-3}$
Mobility (300 K)	100-200 cm^2/Vs (electron), 5-50 cm^2/Vs (hole)
Melting point	2248 K

ตารางที่ 1: สมบัติของซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือสารใดมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำประเภท n-type เนื่องจากมี oxygen vacancies อยู่ และมีค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 10^{-17} และ $10^3 \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ (Zhang, 1996) โดยค่าการนำไฟฟ้านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเจือสารลงไปหรือเปลี่ยนปริมาณ defects ในสาร เช่น ปริมาณ

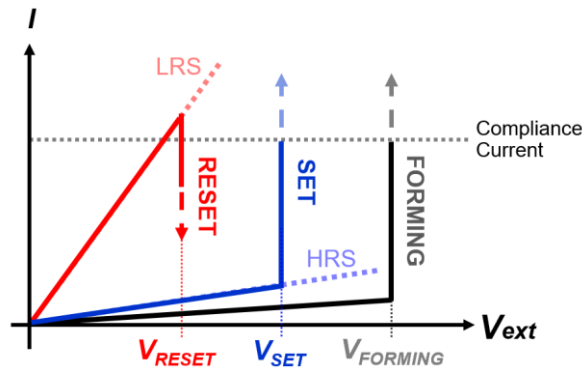
oxygen vacancies หรือ zinc interstitials สำหรับสมบัติทางไฟฟ้าเชิงค็อกซ์ไนด์ที่อยู่ในรูปนาโน จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณ defects ที่ผิวของสาร เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้มีขนาดพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง



รูปที่ 1: โครงสร้าง unit cell แบบ wurtzite ของสารเชิงค็อกซ์ไนด์

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (Resistive Switching Phenomena)

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (Resistive switching phenomena) คือการเปลี่ยนของสถานะความต้านทานของสารระหว่างสถานะที่มีความต้านทานสูง (HRS) กับ สถานะที่มีความต้านทานต่ำ (LRS) เมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป โดยสถานะของสารสามารถเปลี่ยนกลับไปได้ และสารมาคงสถานะความต้านทานนั้น ๆ ได้เป็นระยะเวลาสั้น ลักษณะดังกล่าวทำให้มีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มสนใจพัฒนาสารที่มีปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานเป็นหน่วยความจำประเภท resistive random-access memory (RRAM) สารที่เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานที่เป็นที่สนใจคือสารกลุ่มออกไซด์ ที่เป็นฉนวน (dielectric materials) หรือสารกึ่งตัวนำ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น

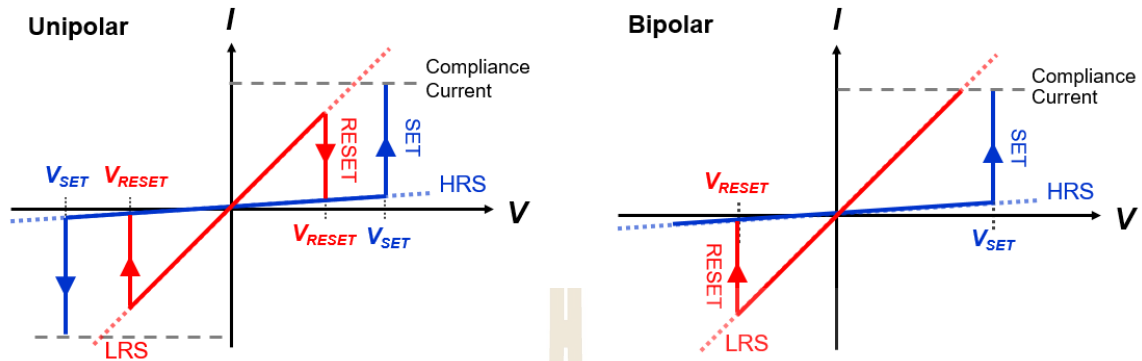


รูปที่ 2: ขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ประกอบไปด้วยการ forming reset และ set เมื่อมีการใส่ศักย์ไฟฟ้า (V_{ext}) เข้าไปในสารและวัฏกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดอยู่ที่ค่า compliance current

การเปลี่ยนค่าความต้านทานทำได้โดยการใส่ศักย์ไฟฟ้า โดยสามารถรู้ว่สารได้เปลี่ยนสถานะความต้านทานโดยการวัดกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานทำได้โดยการวัดกราฟ I-V (I-V characteristic) ซึ่งทำได้โดยการวัดค่ากระแสไฟฟ้า ขณะที้อยๆ เพิ่มศักย์ไฟฟ้า งานวิจัยโดย Lee, *et al.* (Lee *et al.*, 2015) ได้สังเกตว่าปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานประกอบไปด้วยสามขั้นตอนคือ การ forming reset และ set ดังแสดงใน รูปที่ 2 เมื่อเริ่มต้นสารจะเปลี่ยนจากสถานะบริสุทธิ์ (pristine state) เป็น LRS เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าภายนอก (V_{ext}) สูงเพียงพอ สังเกตจากการกระโดดของค่ากระแสไฟฟ้า ขั้นตอนนี้เรียกว่าการ Forming (เส้นดำ) และศักย์ที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะเรียกว่า $V_{forming}$ เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าโดยเริ่มต้นจากศูนย์อีกครั้งสารจะยังอยู่ใน LRS และเปลี่ยนกลับเป็น HRS เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงถึงค่า V_{reset} ขั้นตอนนี้เรียกว่าการ Reset (เส้นสีแดง) เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นอีกสารจะเปลี่ยนสถานะเป็น LRS อีกครั้งเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงถึงค่า V_{set} โดยเรียกขั้นตอนนี้ว่า Set (เส้นสีน้ำเงิน) จะเห็นว่าค่าความต้านทานของสารเปลี่ยนกลับไปมาระหว่างค่าสูงและต่ำ โดยการใส่ศักย์ไฟฟ้าค่าสูงเข้าไปในสารอาจทำให้มีกระแสไหลผ่านอุปกรณ์มากเกินไป โดยเฉพาะเมื่อสารอยู่ใน LRS ดังนั้นจำเป็นต้องจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยการตั้ง current compliance ของแหล่งกำเนิด

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานถูกแบ่งเป็นสองชนิด ตามลักษณะการตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าภายนอก คือ แบบ unipolar และ bipolar รูปที่ 3 เปรียบเทียบกราฟ I-V ระหว่างปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ unipolar และแบบ bipolar โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานแบบ unipolar นั้นสามารถใช้ศักย์ไฟฟ้าสำหรับการ set และ reset เพียงข้อ

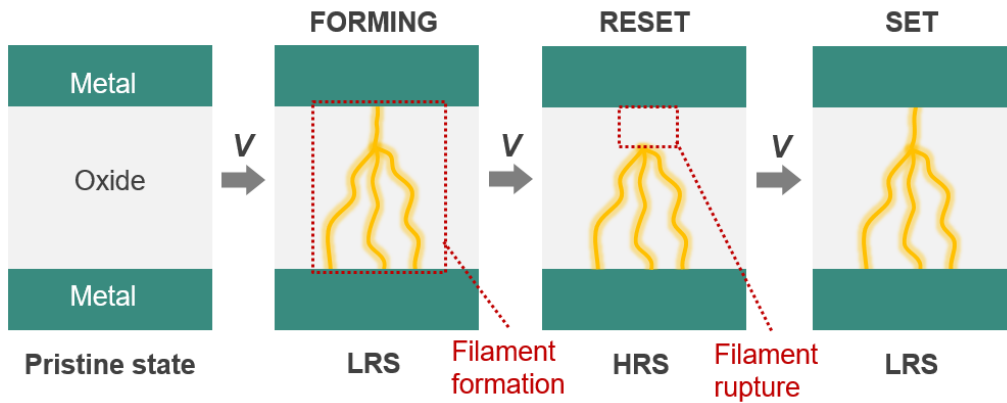
เดียว (one polarity) จะเป็นขั้วบวกหรือลบก็ได้ แต่การเปลี่ยนค่าความต้านทานแบบ bipolar จำเป็นต้องใช้ศักย์ทั้งขั้วบวกและลบ



รูปที่ 3: กราฟ I-V เปรียบเทียบปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ unipolar และ bipolar

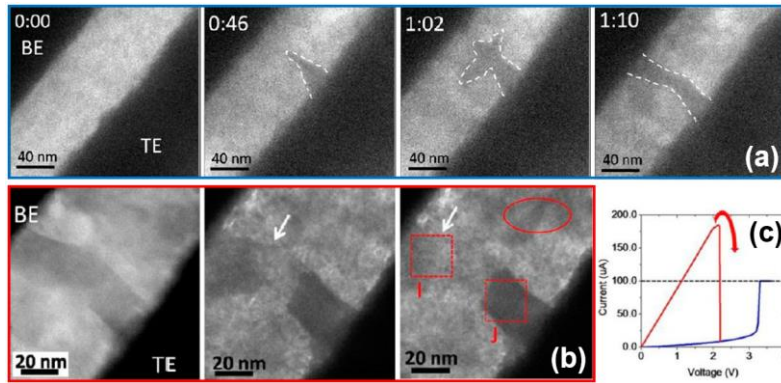
กลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (Switching Mechanisms)

การศึกษากลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในสารกลุ่มออกไซด์พบว่าปรากฏการณ์นี้เกิดจากเส้นใยนำไฟฟ้าเล็ก ๆ ภายในสาร (conductive filament) (Lee *et al.*, 2015, Waser & Aono, 2007 and Sawa, 2008) รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการเกิดเส้นใยนำไฟฟ้าทำให้สารมีความต้านทานที่เปลี่ยนไปได้อย่างไร เมื่อเริ่มต้นสารบริสุทธิ์ (pristine) จะไม่มีใยนำไฟฟ้า แต่สนามไฟฟ้าภายนอกที่ใส่เข้าไปจะทำให้เกิดเส้นใยนำไฟฟ้าขึ้น ทำให้สารนำไฟฟ้า คือสารอยู่ใน LRS ซึ่งขั้นตอนนี้คือการ forming นั่นเอง เส้นใยนำไฟฟ้านี้อาจขาด (rupture) เมื่อใส่สนามไฟฟ้าที่มากพอ ทำให้เกิดการ reset และสารกลับไปเป็น HRS เส้นใยนำไฟฟ้านี้สามารถต่อกลับด้วยสนามไฟฟ้า ในขั้นตอนการ Set ซึ่งทำให้สารอยู่ใน LRS อีกครั้งหนึ่ง โดยการต่อและขาดของเส้นใยนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเพราะการเคลื่อนที่ของ defect เช่น as oxygen vacancies หรือ metallic ions ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปมาในสารได้เมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้า หรือการให้ความร้อน (Lee *et al.*, 2015 and Kim *et al.*, 2011).

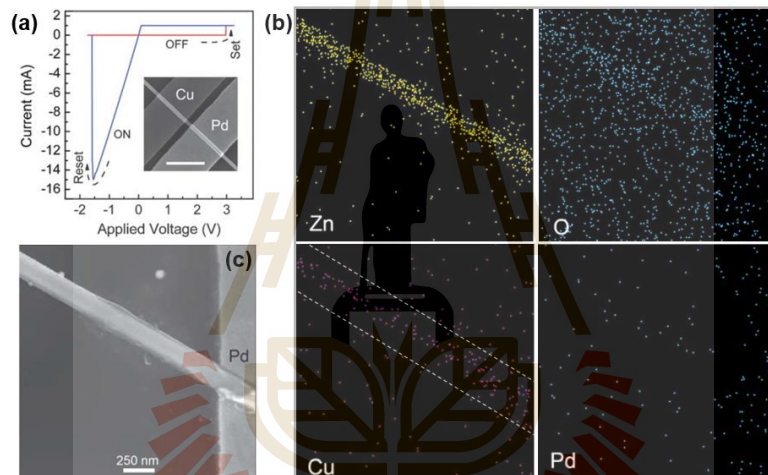


รูปที่ 4: การเกิดโซนาไฟฟ้า (filament) เมื่อเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ในสารกลุ่มออกไซด์ (Lee *et al.*, 2015 and Kim *et al.*, 2011)

งานวิจัยที่ผ่านมาพบการเกิดเส้นโซนาไฟฟ้าที่ก่อตัวขึ้นระหว่างปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (Chen *et al.*, 2013) แต่กลับไม่พบในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ (Yang *et al.*, 2011) ในฟิล์มซิงค์ออกไซด์นั้นการก่อตัวของเส้นโซนาไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของ oxygen ions ออกจากพื้นที่ทำให้เกิดเส้นโซนาไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโลหะ zinc และ oxygen ions เคลื่อนที่กลับเข้าไปรวมกับ zinc อีกครั้งเมื่อสารเปลี่ยนเป็น HRS รูปที่ 5 แสดงหลักฐานให้เห็นถึงกระบวนการเกิดเส้นโซนาไฟฟ้า ด้วยกล้อง transmission electron microscopy (TEM) ที่เก็บระหว่างขั้นตอนดังกล่าว กระบวนการเปลี่ยนค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ศึกษาด้วยกลุ่มวิจัยของ Yang นั้นต่างจากที่พบในฟิล์ม พบบริเวณที่นำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยธาตุ Cu บนผิวของ ZnO nanowire ดังแสดงใน รูปที่ 6 ทำให้สรุปได้ว่าการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในตัวอย่างนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของโลหะที่มาจากขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับลวด (Yang *et al.*, 2011) ต่อมากลุ่มวิจัยของ Raffone ได้อธิบายว่าธาตุ Cu จะเจือ (dope) ลงบนผิวของสารโดยไม่เกิดเส้นโซนาไฟฟ้า (Raffone *et al.*, 2016) โดยการเจือโลหะเข้าไปบนผิวนั้นเกิดง่ายในสารที่มีลักษณะเป็นเส้นลวดนาโน เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากแต่ยาว ในขณะที่เส้นโซนาโนเกิดง่ายในฟิล์มบาง จะเห็นได้ว่ากลไกที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในสารที่มีลักษณะเป็นเส้นลวดนาโนขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นลวด โดยเฉพาะกลไกที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์นั้นยังไม่มีผู้รู้แน่ชัด



รูปที่ 5: ภาพ TEM ของการเกิดใยนำไฟฟ้า(filament) ขณะที่ฟิล์มซิงออกไซด์กำลังเปลี่ยนสถานะการนำไฟฟ้า (a) แสดงการแก้ไข (b) การขาดของใย (rupture) (c) กราฟ I-V ขณะที่สารกำลังเปลี่ยนสถานะ(Chen et al., 2013)



รูปที่ 6: (a) การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ bipolar switching ในอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Cu/ZnO-NW/Pd. (b) ภาพ EDX เมื่อสารอยู่ในสถานะ LRS. (c) ภาพ SEM ที่เก็บจากพื้นที่เดียวกัน (Yang et al., 2011)

กลไกการนำไฟฟ้าในสารกลุ่มออกไซด์ (Conduction Mechanisms)

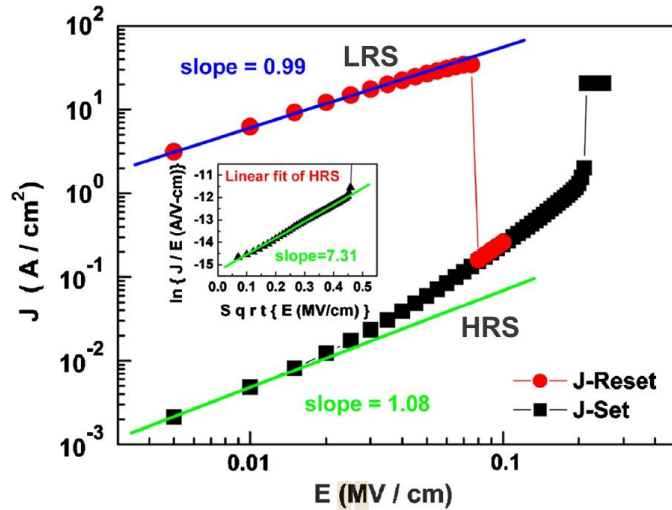
การศึกษากลไกการนำไฟฟ้าเมื่อसानอยู่ใน *LRS* และ *HRS* มีความจำเป็นเพราะช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานได้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำมีหลายแบบและมีความซับซ้อน ตารางที่ 2 แสดงกลไกการนำไฟฟ้าห้าแบบที่เกิดขึ้นได้ในสารกึ่งตัวนำเมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าผ่านขั้วที่ทำจากโลหะ แต่ละกลไกจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน (Sze, S. M., & Ng, K. K's., 2006) กลไกการนำไฟฟ้าห้าแบบนี้ คือ (1) การทะลุของอิเล็กตรอนผ่านกำแพงที่ขั้วไฟฟ้า (tunneling process) ซึ่งเป็นกลไกที่พบได้มาก เมื่อมีการต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และมีการใส่ศักย์ไฟฟ้าสูง (2) การนำไฟฟ้าแบบ Ohmic เป็นการนำไฟฟ้าที่มักเกิดขึ้นเมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าต่ำและอุณหภูมิสูง (3) การนำไฟฟ้าแบบ space-charge-limited current เกิดขึ้น เมื่อมีการ inject อิเล็กตรอนจากขั้วโลหะเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเป็นจำนวนมาก (4) การนำไฟฟ้าแบบ Schottky emission เกิดเมื่อรอยต่อระหว่างขั้วโลหะและสารกึ่งตัวนำเป็น Schottky barrier (5) การนำไฟฟ้าแบบ Poole-Frenkel emission ซึ่งคล้ายกับ Schottky emission แต่อิเล็กตรอนที่นำไฟฟ้านั้นเกิดจาก trapped sites และมีกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า Schottky barrier.

Conduction Processes	Voltage & Temperature Dependence
Tunneling	$J \propto V^2 \exp\left(\frac{-b}{V}\right)$
Ohmic behavior	$J \propto V \exp\left(\frac{-c}{T}\right)$
Space-Charge-Limited Current	$J = \frac{9\varepsilon_i \mu V^2}{8d^3}$
Schottky emission	$J \propto T^2 \exp\left[\frac{q}{kT} (a\sqrt{V} - \phi_B)\right]$
Poole-Frenkel emission	$J \propto V \exp\left[\frac{q}{kT} (2a\sqrt{V} - \phi_B)\right]$

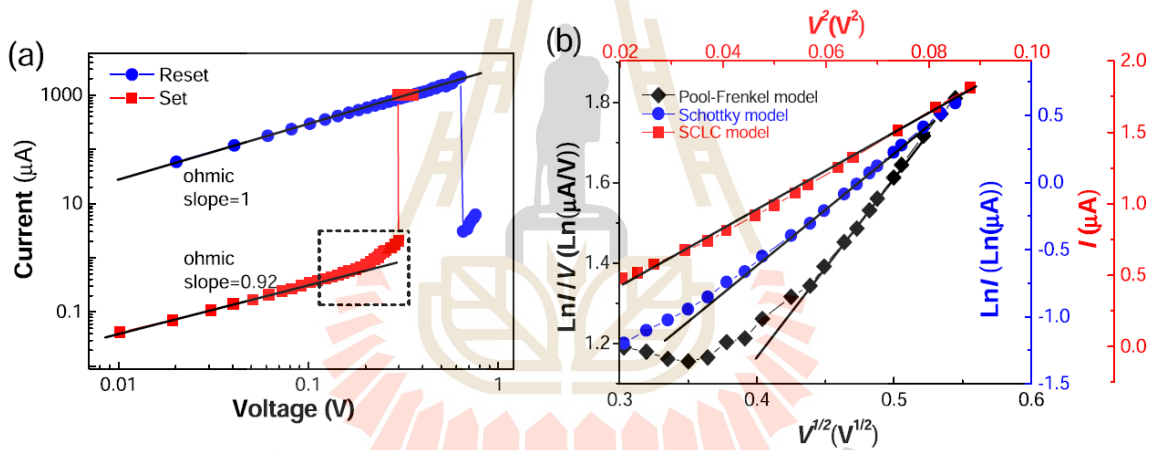
ϕ_B = barrier height. a , b , and c are constant. ε_i = permittivity. μ = mobility.

ตารางที่ 2: กลไกการเกิดการนำไฟฟ้าและกราฟ I-V ที่เกี่ยวข้องกับกลไก

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ unipolar ซึ่งคือออกไซด์ฟิล์มที่พบ กลไกการนำไฟฟ้าแบบ Ohmic และแบบ Poole-Frenkel emission (Chang *et al.*, 2008) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส (current density J) กับสนามไฟฟ้า (electric field E) ดังรูปที่ 7 เมื่อสนามไฟฟ้าต่ำความชันของกราฟใน log-log ของทั้ง LRS และ HRS มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งบอกลักษณะการนำไฟฟ้าแบบ Ohmic เมื่อค่าสนามไฟฟ้าสูงขึ้น LRS ยังประพฤติตัวแบบ Ohmic แต่ HRS มีกลไกการนำไฟฟ้าแบบ Poole-Frenkel emission ดังแสดงใน inset ของ รูปที่ 7 เมื่อศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดไมโครซิงค์ออกไซด์ (ZnO microwires) ดังแสดงใน รูปที่ 8 พบกลไกการนำไฟฟ้าแบบ Ohmic ใน LRS แต่ในสถานะ HRS พบว่าการนำไฟฟ้าเป็นแบบ Ohmic เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ และเปลี่ยนเป็น space-charge-limited current (SCLC) เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าสูงเกิด 0.2 V (Huang *et al.*, 2014) อนึ่งแม้มีงานวิจัยศึกษากลไกการนำไฟฟ้าในซิงค์ออกไซด์ไปบ้างแล้ว แต่งานเหล่านี้ไม่ได้ศึกษาเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยกลไกการนำไฟฟ้าในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ยังไม่เป็นที่เข้าใจดีนัก



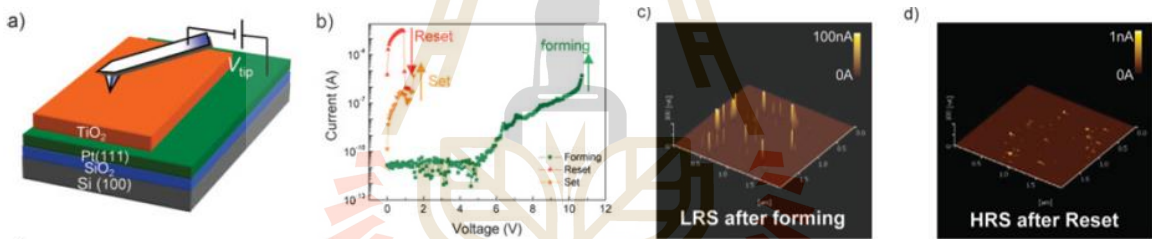
รูปที่ 7: ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส (current density J) และสนามไฟฟ้า (electric field E) ของอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Pt/ZnO thin film/Pt (Chang et al., 2008)



รูปที่ 8: (a) กราฟ I-V curve ของอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Ag/ZnO microwire/Ag. (b) กราฟระหว่าง $\ln(I/V)$ กับ $V^{1/2}$ และกราฟระหว่าง I กับ V^2 แสดงให้เห็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบ Poole-Frenkel emission และ Space-Charge Limited Current (Huang et al., 2014).

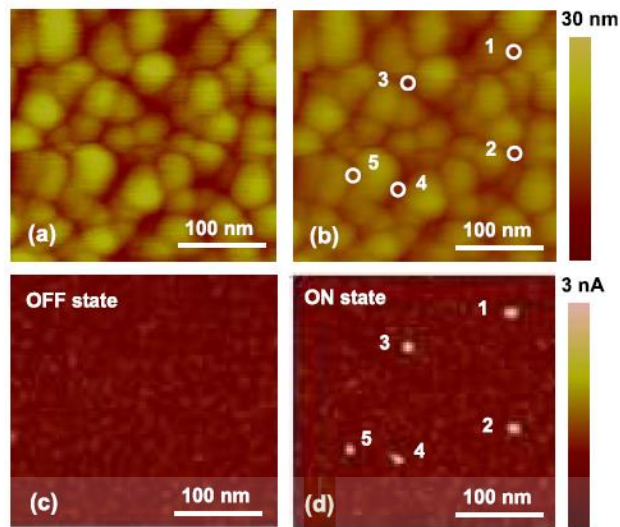
การศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดวัดการนำไฟฟ้า

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดวัดการนำไฟฟ้า (C-AFM) สามารถใช้แสดงความขรุขระของผิว (ภาพ topography) และวัดสมบัติทางไฟฟ้าของสารได้ ถือเป็นอุปกรณ์สำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน เนื่องจากในปรากฏการณ์นี้จะมีสารจะเปลี่ยนสมบัติที่ระดับนาโน มีงานวิจัยหลายงานที่ใช้ C-AFM เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างของผลการศึกษานบนฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) (Chae *et al.*, 2008) รูปที่ 9 (a) แสดงวิธีการเก็บข้อมูลด้วย C-AFM โดยฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ระหว่างเข็มและขั้วไฟฟ้าล่างที่ทำจากแพลทินัม รูปที่ 9 (b) แสดงกราฟ $I-V$ ซึ่งแสดงลักษณะการสลับค่าความต้านทานแบบ unipolar รูปที่ 9(c) และ รูปที่ 9 (d) แสดงภาพกระแสใน LRS (หลังจากการ forming) และใน HRS (หลังจากการ reset) จากภาพพบบางจุดที่มีการนำไฟฟ้าสูงเมื่อสารอยู่ใน LRS ซึ่งหายไปเมื่อสารอยู่ใน HRS ผลที่ได้ตรงกับโมเดลการเกิดและขาดของเส้นใยนำไฟฟ้า (conductive filaments)

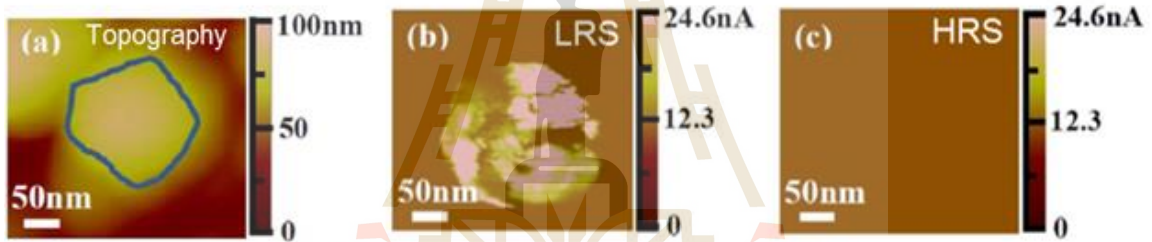


รูปที่ 9: ภาพ C-AFM ของฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ (Chae *et al.*, 2008).

C-AFM ยังถูกใช้ในการศึกษาการเกิดใยนำไฟฟ้า เช่น ใช้ศึกษาการเกิดใยนำไฟฟ้าบริเวณขอบ grain ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (Zhuge *et al.*, 2011) รูปที่ 10 แสดง ภาพ topography และ ภาพ C-AFM เมื่อสารอยู่ใน HRS (รูปที่ 10(a) และ รูปที่ 10 (c)) และเมื่อสารอยู่ใน LRS (รูปที่ 10(b) และ รูปที่ 10 (d)) พบว่าจุดที่มีการนำไฟฟ้าสูงมักอยู่ตรงของ grain แต่ในการทดลองของ Qi *et al.* ซึ่งศึกษา ZnO nanoislands (Qi *et al.*, 2013) กลับไม่พบใยนำไฟฟ้าภายในสาร แต่พื้นที่ที่นำไฟฟ้ากลับเป็นที่ขอบของสารดังแสดงใน รูปที่ 11 การทดลองนี้บ่งชี้ว่าการนำไฟฟ้าในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์อาจต่างกับฟิล์ม



รูปที่ 10: ภาพ topography (a) และภาพกระแสไฟฟ้า เมื่อซิงค์ออกไซด์อยู่ในสถานะ HRS (c) และ ภาพ topography (b) และภาพกระแสเมื่อสารอยู่ในสถานะ LRS (d) (Zhuge *et al.*, 2011).



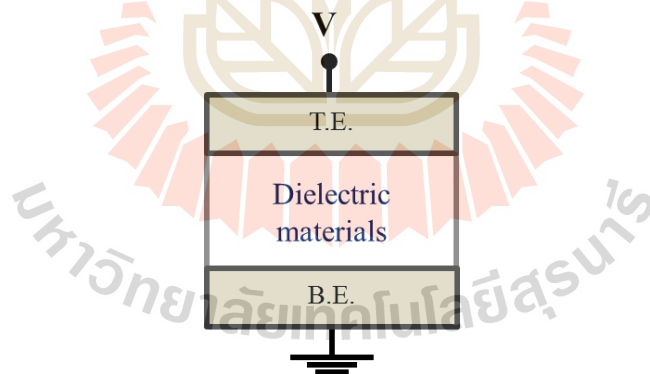
รูปที่ 11: ภาพ topography และภาพกระแสไฟฟ้า (C-AFM image) ที่วัดบน ZnO nanoisland. (Qi *et al.*, 2013).

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ตัวอย่างซิงค์ออกไซด์

เส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์และฟิล์มเตรียมขึ้นที่ NANOTEC ด้วยวิธี Hydrothermal ในความร่วมมือกับกลุ่มวิจัยของ ดร.อรรถพร คล้าชื่น ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) โดยฟิล์มที่ปลูกขึ้นมีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร เท่า ๆ กับความสูงของเส้นลวดนาโนที่ใช้ศึกษาเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา คณะผู้วิจัยถ่ายภาพเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโหมด non-contact เพื่อดูขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ คณะผู้วิจัยทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้เข็ม AFM เป็นขั้วด้านบนและฐานของตัวอย่างเป็นขั้วด้านล่าง ซึ่งเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์จะแทรกอยู่ระหว่างขั้วทั้งสอง ในรูปแบบ sandwich ดังแสดงใน รูปที่ 12 หลังจากนั้นคณะผู้วิจัยจะใส่ศักย์ไฟฟ้าและวัดค่ากระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านตัวอย่าง

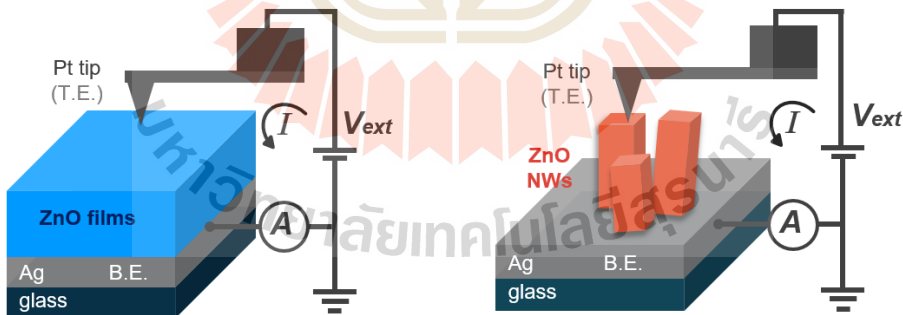


รูปที่ 12: การวัดค่าความต้านทานเพื่อศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ประกอบด้วยสารไดอิเล็กทริก (dielectric materials) อยู่ระหว่างขั้วบนและขั้วล่าง

วิธีการเก็บกราฟ I-V

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและศักย์ไฟฟ้า (I-V characteristics) หรือกราฟ I-V ถูกวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโหมดวัดการนำไฟฟ้า (C-AFM) โดยใส่ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกไปยังเข็ม AFM และวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่าง ขั้นตอนการวัดมีดังนี้

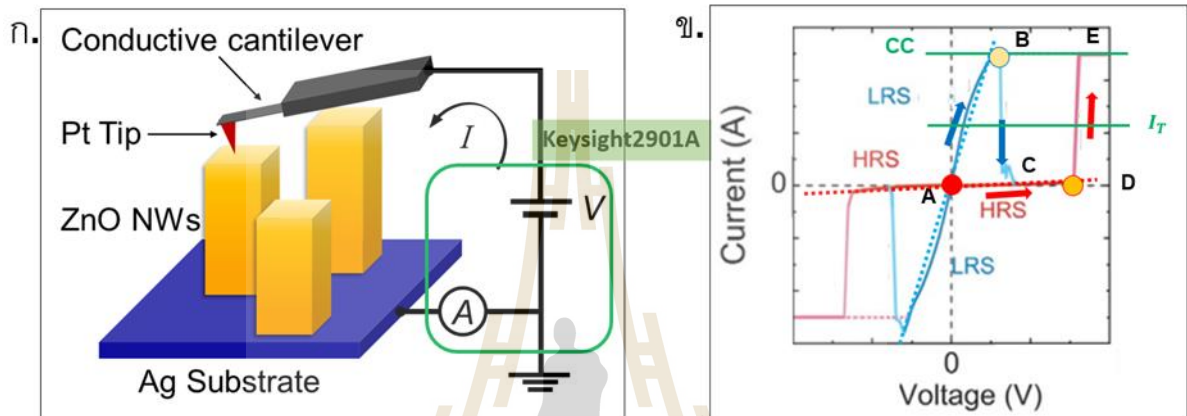
- 1.1 ใช้ non-contact mode AFM ถ่ายภาพเพื่อดูภาพรวมของตัวอย่าง
- 1.2 เลือกเส้นลวดนาโนเพื่อทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และปรับเข็ม AFM ลง จนแตะกับเส้นลวดนาโนนั้น
- 1.3 เปลี่ยนโหมดการทำงานของ AFM เป็นโหมดวัดการนำไฟฟ้า (C-AFM) ใส่ศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกและวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 13 ในระหว่างการวัดคณะผู้วิจัยใช้โปรแกรม LabVIEW ที่เขียนขึ้นเอง เพื่อควบคุมการใส่ศักย์ไฟฟ้า และเก็บข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าที่เปลี่ยนไประหว่างการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า
- 1.4 ทำการวัดซ้ำในเส้นลวดนาโนอื่น ๆ เพื่อสังเกตว่าลวดนาโนแต่ละเส้นมีสมบัติแตกต่างกันอย่างไร
- 1.5 สำหรับการศึกษาค่าฟังก์ชันออกไซด์ ผู้วิจัยสุ่มเลือกจุดที่จะวัดกราฟ I-V สิบจุด



รูปที่ 13: การวัดกราฟ I-V บนฟิล์มและลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ชนิดวัดการนำไฟฟ้า

โปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูล

เพื่อที่จะศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ผู้วิจัยใช้เครื่องจ่ายและวัดค่า (Keysight 2901A) ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการป้อนความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้ว

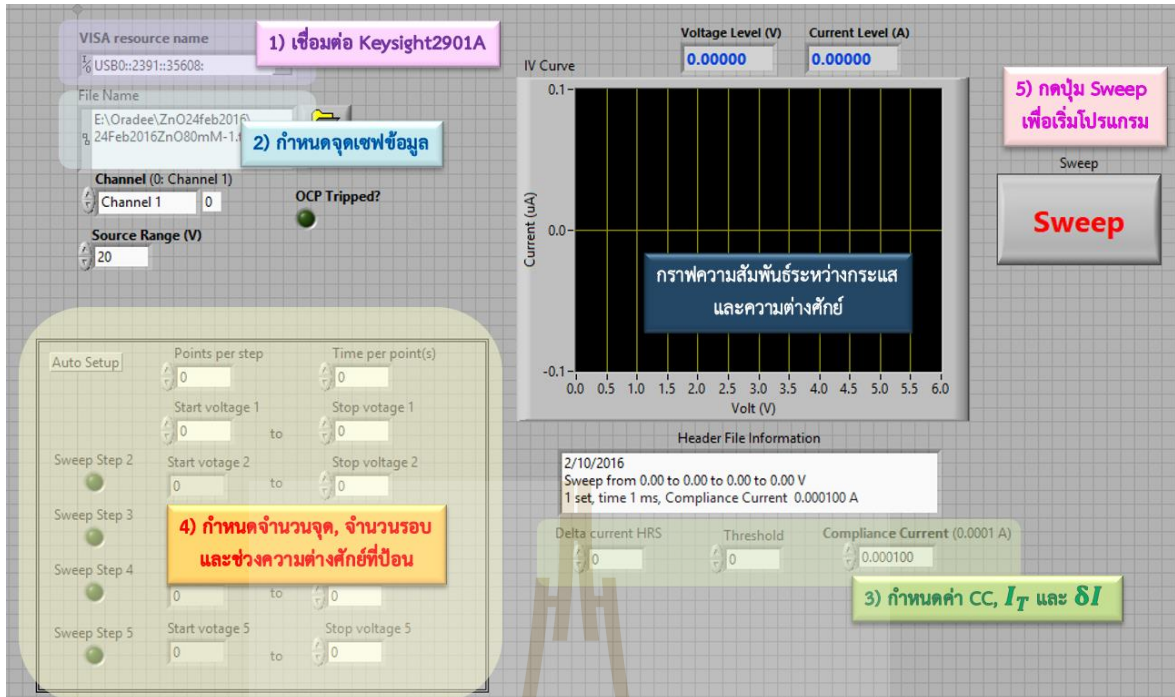


รูปที่ 14: ก) การติดตั้งเพื่อป้อนความต่างศักย์และวัดค่ากระแสระหว่างเส้นลวดนาโนของ ZnO
 ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานชนิดหนึ่งขั้ว เมื่อ LRS คือสถานะที่มีความต้านทานต่ำ HRS คือสถานะที่มีความต้านทานสูง ค่า CC และ I_T เป็นค่าที่กำหนดเพื่อใช้ในการทำงานของโปรแกรมดัง รูปที่ 16

ค่า CC ในรูปที่ 14 คือ ค่ากระแสสูงสุดที่เครื่องจะยอมให้ทำงาน และ I_T เป็นค่ากระแสที่ขณะผู้วิจัยกำหนดเพื่อประกอบในเงื่อนไขการตัดศักย์ไฟฟ้า ในกรณีที่ตัวอย่างเปลี่ยนจากสถานะที่มีความต้านทานสูงไปเป็นสถานะที่มีความต้านทานต่ำ

รูปที่ 15 แสดง โปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในโครงงานนี้ โดยเริ่มต้นจาก

- 1) เชื่อมต่อ Keysight2901A เข้ากับโปรแกรม
- 2) กำหนดโพลเดอร์ที่จะใช้เก็บข้อมูลระหว่างกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
- 3) กำหนดค่า CC I_T และค่า ΔI (ค่าความต่างของกระแสไฟฟ้าที่ขณะผู้วิจัยกำหนดเพื่อไว้เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว)
- 4) กำหนดจำนวนจุด จำนวนรอบ และช่วงความต่างศักย์ที่จะป้อน
- 5) กดปุ่ม Sweep เพื่อเริ่มโปรแกรม



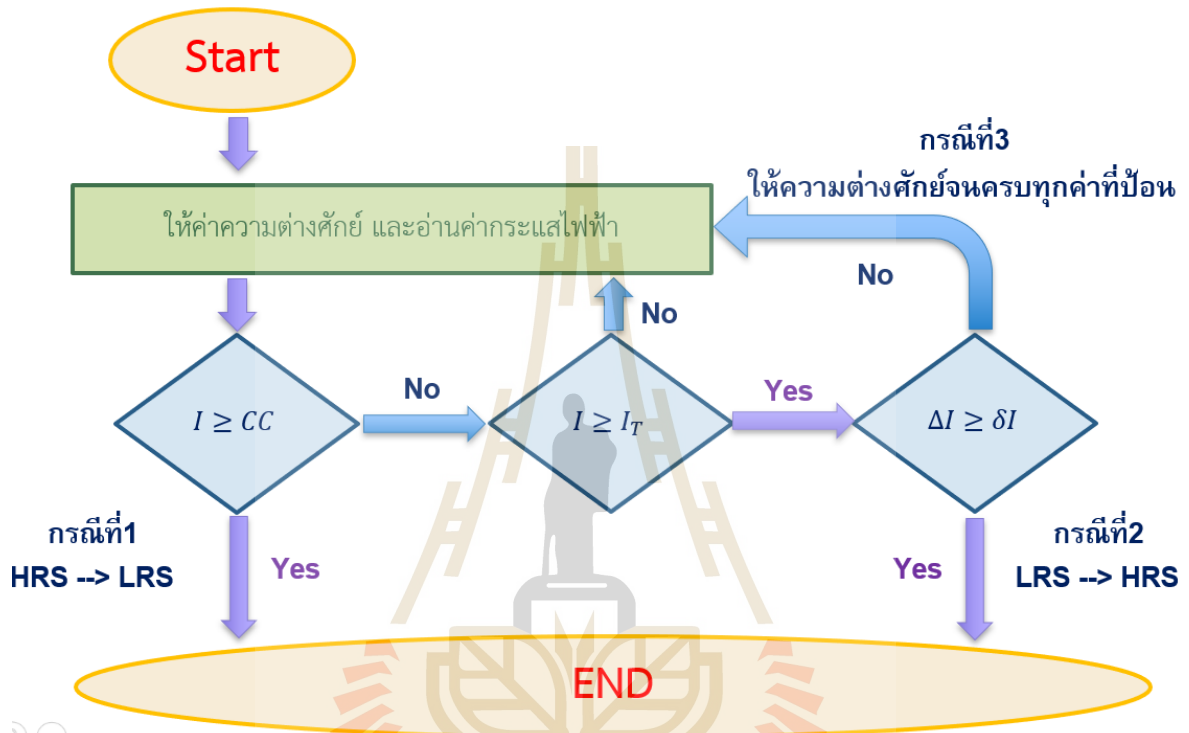
รูปที่ 15: โปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ Keysight2901A, ตั้งค่าการป้อนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และวัดกระแสไฟฟ้า ระหว่างขั้ว และแสดงผล

โดยตัวโปรแกรมจะควบคุมให้เครื่องจ่ายและวัดค่าค้อย ๆ เพิ่มค่าความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งตัวอย่างเปลี่ยนระดับค่าความต้านทาน หรือก็คือตรงกับเงื่อนไขแสดงในรูปที่ 16 โปรแกรมจึงจะหยุด ซึ่งจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณีคือ

- 1) เปลี่ยนจากสถานะที่มีค่าความต้านทานสูงไปเป็นสถานะที่มีค่าความต้านทานต่ำ (High Resistance State to Low Resistance State, HRS --> LRS) จากรูปที่ 14 โปรแกรมสั่งให้เครื่องเพิ่มความต่างศักย์จากจุด A ไปยัง D และไปหยุดที่จุด E โปรแกรมจะรู้ว่า HRS เปลี่ยนเป็น LRS เมื่อค่ากระแสที่อ่านได้ (I) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า CC
- 2) เปลี่ยนจากสถานะที่มีค่าความต้านทานสูงไปเป็นสถานะที่มีค่าความต้านทานต่ำ (Low Resistance State to High Resistance State, LRS --> HRS) จากรูปที่ 14 โปรแกรมจะควบคุมให้เครื่องค้อย ๆ เพิ่มความต่างศักย์จากจุด A ไปยัง B และไปหยุดที่จุด C โปรแกรมจะรู้ว่า HRS เปลี่ยนเป็น LRS เมื่อค่ากระแสที่อ่านได้ (I) มีค่ามากกว่าระดับค่า I_T ที่คณะผู้วิจัยกำหนดดังรูปที่ 14 และ เมื่อค่ากระแส (I) มีการเปลี่ยนแปลงอย่าง

รวดเร็ว (จากจุด B ไปจุด C) หรือก็คือค่าความต่างระหว่างกระแสในแต่ละจุด (ΔI) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า δI ที่กำหนดไว้

- 3) ในกรณีที่เพิ่มความต่างศักย์และไม่พบปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน เครื่องจะให้ค่าความต่างศักย์และจำนวนรอบตามที่คณะผู้วิจัยกำหนดจึงหยุด



รูปที่ 16

รูปที่ 16: Flowchart ของโปรแกรมในรูปที่ 1 โดย I คือค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ ค่า CC และ I_T คือค่ากระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้เพื่อใช้พิจารณาสถานะดังรูปที่ 1 ΔI คือค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าในแต่ละจุด และ δI คือค่าความต่างศักย์ของกระแสที่คณะผู้วิจัยกำหนดเพื่อไว้เปรียบเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว

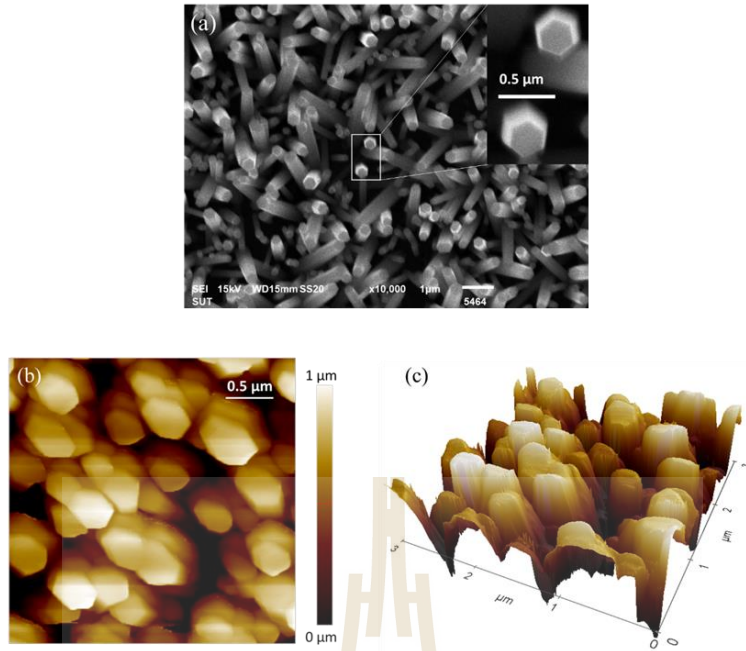
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน (resistive switching phenomena) สามารถตรวจพบได้ในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ผ่านทางการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโหมดวัดการนำไฟฟ้า (C-AFM) โดยใช้เข็มนำไฟฟ้าทำจากแพลทินัมและฐานตัวอย่างที่เคลือบด้วยเงินจะทำหน้าที่เป็นขั้วสำหรับใส่ศักย์ไฟฟ้าและวัดความต้านทาน ในบทนี้อธิบายถึงผลการวิจัย เริ่มต้นด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ ขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ ในส่วนต่อมาจะอภิปรายเกี่ยวกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เปรียบเทียบกับฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธีเดียวกัน

ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

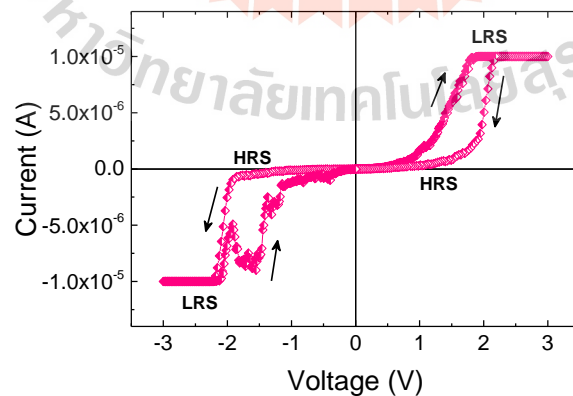
รูปที่ 17 (a) แสดงภาพจากกล้อง SEM ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกบนฐานกระจกที่เคลือบด้วยเงิน เส้นลวดนาโนโดยส่วนใหญ่เรียงตัวในแนวตั้งฉากกับฐาน และมีหน้าตัดเป็นรูปหกเหลี่ยม เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบ hexagonal wurtzite รูปที่ 17 (b)-(c) แสดงภาพ topography ที่ถ่ายด้วยกล้อง AFM โดยสีในภาพแสดงถึงความสูงของเส้นลวดนาโน ขนาดของเส้นลวดนาโนในรูป AFM มีขนาดที่ใหญ่กว่าในรูป SEM ซึ่งผลจากขนาดของเข็มวัด รูป AFM นี้ใช้อ้างอิงเพื่อเลือกตำแหน่งการเก็บกราฟ I-V



รูปที่ 17: (a) ภาพจากกล้อง SEM (b) และ (c) ภาพ 2 มิติและ 3 มิติ ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์

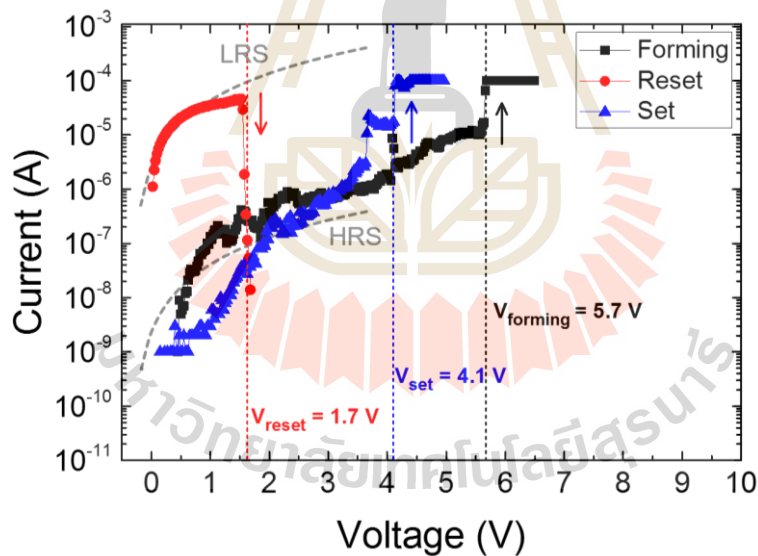
ลักษณะกราฟ I-V (I-V Characteristics) ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์

รูปที่ 18 แสดงค่ากราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -3.00 ถึง 3.00 V เห็นว่ากราฟ I-V ที่ได้มีลักษณะเป็นวง เนื่องจากสารสามารถอยู่ได้สองสถานะคือสถานะที่มีความต้านทานต่ำ (LRS) และสถานะที่มีความต้านทานสูง (HRS)



รูปที่ 18: กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ มีการจำกัดกระแสที่ 10 μA

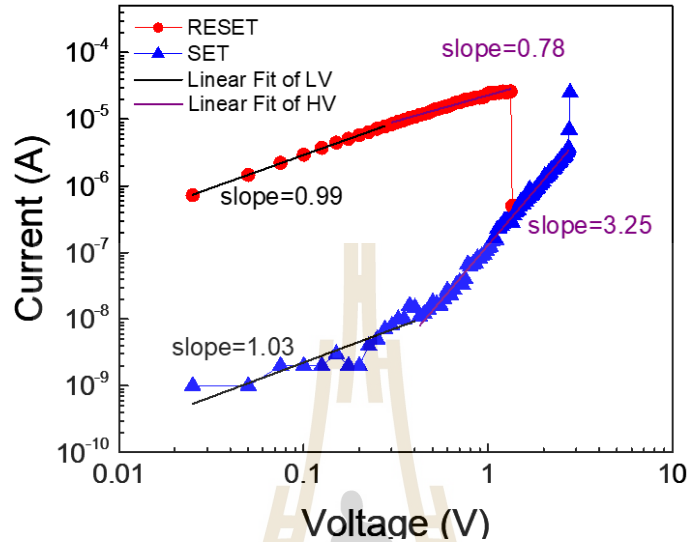
เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกผ่านทางเข็มวัดเพียงแบบเดียว ดังรูปที่ 19 พบว่าเส้นลวดนาโนซิงค์ ออกไซด์ สามารถสลับสถานะระหว่าง LRS และ HRS โดยครั้งแรกเส้นลวดนาโนจะอยู่ในสถานะ HRS กราฟ I-V จะมีลักษณะตามเส้นสีดำ เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าจนถึงค่าหนึ่งเรียกว่า V_{forming} กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนสุดกระแสจำกัด ซึ่งแสดงว่าสารอยู่ใน LRS จากนั้นเริ่มต้นวัดกระแสไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าที่เป็นศูนย์อีกครั้งจะพบกราฟ I-V ตามเส้นสีแดง กระแสไฟฟ้ามีค่ามาก เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงถึงค่า V_{reset} กระแสไฟฟ้าจะลดลง เพราะเส้นลวดกลับไปอยู่ในสถานะ HRS เมื่อเริ่มต้นวัดกระแสไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้าที่เป็นศูนย์อีกครั้งจะได้กราฟ I-V ตามเส้นสีฟ้า กระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย ใกล้เคียงกับเส้นสีดำ เพราะเส้นลวดอยู่ใน HRS เหมือนกัน เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใส่ไปสูงถึงค่า V_{set} ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่า V_{forming} กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เส้นลวดเปลี่ยนสถานะเป็น LRS การที่สามารถใช้ศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกเพียงขั้วเดียวเพื่อสลับสถานะความต้านทาน ทำให้สรุปได้ว่าปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นแบบ unipolar



รูปที่ 19: กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าในทิศทางเดียว แสดงให้เห็น unipolar resistive switching behavior

เมื่อเทียบกราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์กับกลไกการนำไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 20 พบว่าสถานะ LRS (เส้นสีแดง) มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า แบบ space-charge limited current คือ กระแสแปรผันตรงกับ V^n ทำให้กราฟเป็นเส้นตรงในกราฟ log-log โดยมีค่ากำลังของศักย์ไฟฟ้าอยู่ที่ค่า 0.99 เมื่อศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่า 0.3 V และเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ค่า n จะ

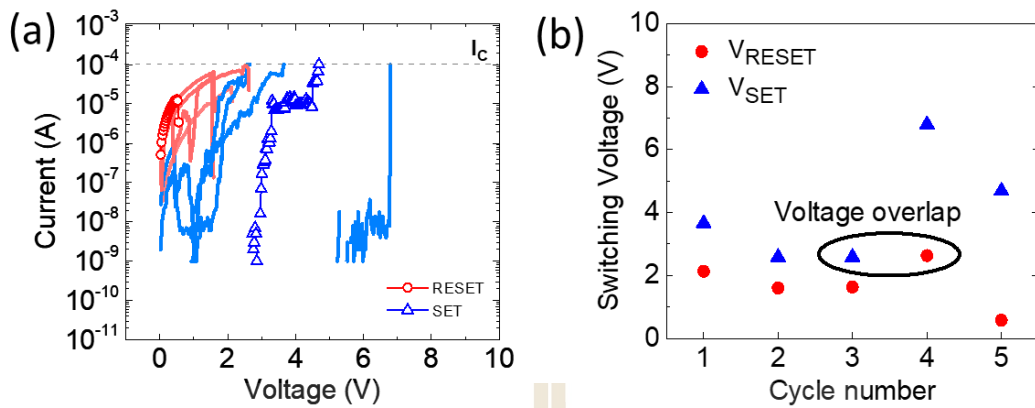
ลดลงจนเหลือ 0.78 สำหรับสถานะ HRS นั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบ Ohmic คือ I แปรผันตรงกับ V แต่ความประพฤติเปลี่ยนเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 0.3 V เป็นความสัมพันธ์แบบ Schottky emission



รูปที่ 20: กราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ แสดงลักษณะการนำไฟฟ้าของสถานะที่มีความต้านทานต่ำ เทียบกับ โมเดลการนำไฟฟ้าแบบ space-charge limited current และสถานะที่มีความต้านทานสูง เทียบกับ โมเดล Ohmic behavior

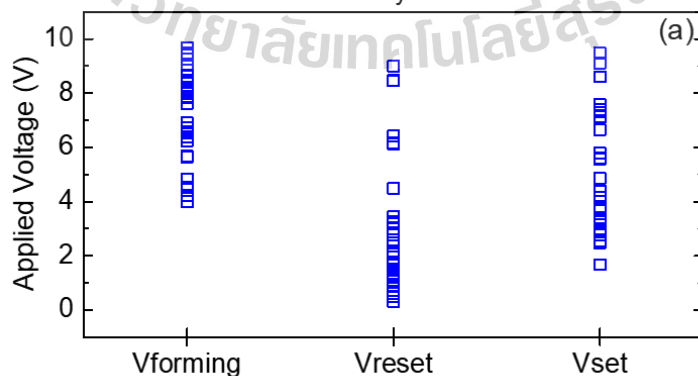
ความสามารถในการสลับสถานะไปมา (Switching Reproducibility) ของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์

เมื่อทำการสลับสถานะความต้านทานของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์เส้นหนึ่งหลาย ๆ รอบ ดังแสดงใน รูปที่ 21(a) พบว่า สามารถสลับสถานะได้ระหว่าง LRS และ HRS โดยใช้ V_{set} เพื่อเปลี่ยนจาก HRS เป็น LRS และใช้ค่า V_{reset} เพื่อเปลี่ยนกลับ โดยค่า V_{set} และ V_{reset} มีค่าไม่ทำเดิมในแต่ละรอบ รูปที่ 21(b) สรุปค่า V_{set} และ V_{reset} จากรูปที่ 21(a) พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่า V_{set} จะมีค่ามากกว่า V_{reset} แต่มีบางรอบที่ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะความต้านทานมีค่าใกล้เคียงกัน (overlap) ในแง่ของการประยุกต์ใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะความต้านทานควรมีการกระจายตัวน้อย ค่า V_{set} และ V_{reset} ควรมีค่าห่างกัน

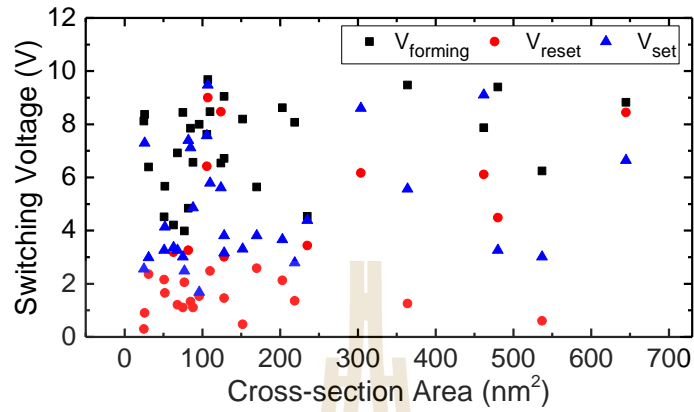


รูปที่ 21: (a) กราฟ I-V ของ ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เมื่อผ่านการสลับสถานะไปมาห้ารอบ (cycles) (b) สรุปค่า V_{set} และ V_{reset} ของแต่ละรอบ

เมื่อศึกษาค่าเฉลี่ยของศักย์ไฟฟ้าที่สลับสถานะ $V_{forming}$, V_{set} และ V_{reset} ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์สิบเส้น ดังแสดงใน รูปที่ 22 พบว่า ค่า $V_{forming}$ มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดตามด้วย V_{reset} และ V_{set} นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้ายังมีการคาบเกี่ยวกันสูง ซึ่งอาจเป็นเพราะลวดแต่ละเส้นมีขนาดและความยาวต่างกัน แต่เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวาดกราฟระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้เทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโน ดังแสดงใน รูปที่ 23 กลับไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดของลวดกับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้สลับสถานะทางไฟฟ้า ซึ่งคาดว่าเนื่องจากการนำไฟฟ้าในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ เกิดจากใยน้ำไฟฟ้า (conductive filament) ที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโน ทำให้พื้นที่หน้าตัด ไม่มีผลต่อการสลับสถานะของเส้นลวด



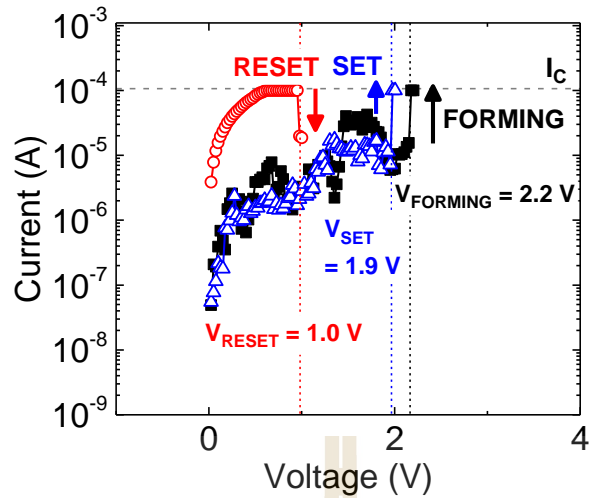
รูปที่ 22: สรุปค่าการกระจายตัวของ $V_{forming}$, V_{set} และ V_{reset} ที่วัดได้จากเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์สิบเส้น



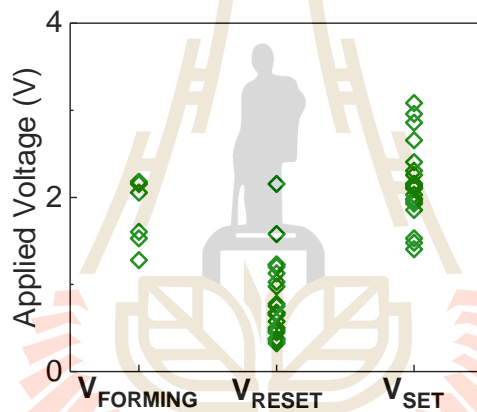
รูปที่ 23: ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{forming} , V_{set} และ V_{reset} กับพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์

ลักษณะกราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์

ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกด้วยวิธีเดียวกันก็แสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบ unipolar เช่นกัน ดังแสดงใน รูปที่ 24 แต่กระแสที่ LRS และ HRS จะมีค่ามากกว่า รูปที่ 25 สรุปการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนความต้านทาน เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า V_{forming} , V_{set} และ V_{reset} ที่จุดต่าง ๆ บนฟิล์มออกไซด์มีการกระจายตัวสูง โดยเฉพาะค่า V_{forming} มีค่าน้อยกว่า V_{set} นอกจากนี้บางครั้งไม่สามารถวัดค่า V_{forming} เพราะฟิล์มอยู่ใน LRS

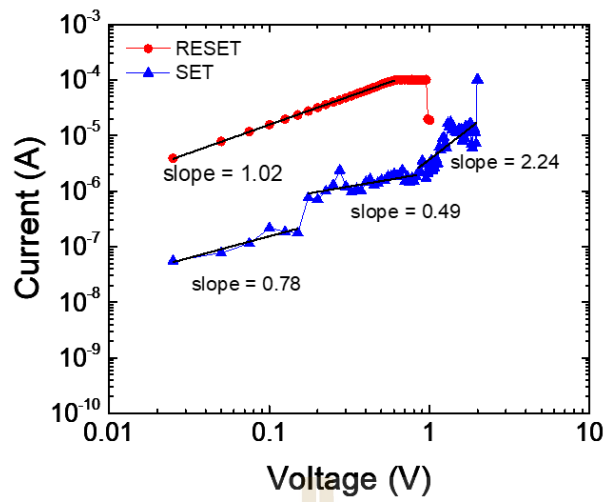


รูปที่ 24: กราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 25: สรุปค่าการกระจายตัวของ V_{forming} , V_{set} และ V_{reset} ที่จุดต่างๆ บนฟิล์มซิงค์ออกไซด์

การที่ฟิล์มซิงค์ออกไซด์มีค่ากระแสไฟฟ้าที่มากกว่าใน HRS และ LRS ค่าศักย์ไฟฟ้าสลับสถานะที่ต่ำกว่า อาจเป็นเพราะในฟิล์มมีเนื้อสารที่มากกว่า ทำให้มีจำนวนโยนนำไฟฟ้า (conductive filaments) ที่มากกว่า แสดงว่าการจำกัดปริมาณสารให้อยู่ในรูปเส้นลวดนาโนมีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจ นอกจากนี้เมื่อเทียบกราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ พบว่ามีกลไกนำไฟฟ้าแบบ space-charge limit current สำหรับทั้ง LRS และ HRS โดยมีค่า n และกระแสเริ่มต้นต่างกัน



รูปที่ 26: กราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ แสดงลักษณะการนำไฟฟ้าของสถานะที่มีความต้านทานต่ำและสูง เป็นไปตามโมเดลการนำไฟฟ้าแบบ space-charge limited current

บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ และเปรียบเทียบปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่ปลูกให้มีความหนาเท่ากับ ความสูงของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ โดยตัวอย่างทั้งสองปลูกด้วยวิธี hydrothermal บนกระจกที่เคลือบด้วยเงิน การศึกษาคุณลักษณะทางไฟฟ้าทำโดยการวัดกราฟ I-V ด้วยเข็มวัดล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดวัดการนำไฟฟ้า โดยเข็มทำหน้าที่เป็นขั้วหนึ่งและ เงินจะทำหน้าที่เป็นขั้วสอง การวัดด้วยล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทำให้สามารถวัดกราฟ I-V ของลวดแต่ละเส้นที่อาจเกี่ยวโยงกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดนาโนได้ การวัดกราฟ I-V จากเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่ามีสมบัติ resistive switching แบบ unipolar คือสามารถใช้ทัศนศึกษาไฟฟ้าที่เสถียรในการสลับจากสถานะที่มีความต้านทานสูง (high resistance state) ไปยังสถานะที่มีความต้านทานต่ำ (low resistance state) ได้ สำหรับการศึกษารูปแบบฟิล์มซิงค์ออกไซด์พบว่ามีสมบัติแบบเดียวกัน

เส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์จะเกิดค่า V_{forming} ที่ค่าที่สูงกว่าค่า V_{set} และ V_{reset} โดยเฉลี่ย V_{set} จะมีค่าสูงกว่า V_{reset} แต่ทั้งสองค่าจะใกล้เคียงกัน เมื่อทำการสลับระหว่างสองสถานะบนลวดนาโนซิงค์ออกไซด์พบว่า ค่า V_{set} และ V_{reset} มีค่าไม่เท่าเดิมในแต่ละรอบ และสามารถทำการสลับสถานะได้ประมาณสิบครั้ง เมื่อเปรียบเทียบค่า V_{forming} , V_{set} และ V_{reset} ของลวดนาโนซิงค์ออกไซด์จำนวนสิบเส้น พบว่ามีค่า เหล่านี้ต่างกันอย่างมาก และค่าไม่สัมพันธ์กับขนาดของลวด เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่วัดในบนฟิล์มซิงค์ออกไซด์ พบว่าแม้ฟิล์มจะมีลักษณะปรากฏการณ์ resistive switching ที่คล้ายกับลวดนาโน แต่มีค่าการนำไฟฟ้าที่มากกว่า และค่า V_{forming} , V_{set} และ V_{reset} เกิดที่ค่าต่ำกว่า บ่งบอกถึงเส้นทางนำไฟฟ้า (conductive paths) มากกว่า

เมื่อเทียบกราฟ I-V ของเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์กับโมเดลการนำไฟฟ้าพบว่าสถานะที่มีความต้านทานต่ำนั้นมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าแบบยกกำลัง I แปรผันกับ V^n

ซึ่งตรงกับโมเดลการนำไฟฟ้าแบบ space-charge limited current และมีการเปลี่ยนค่า n เมื่อใส่ ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 0.7 V สำหรับสถานะที่มีความต้านทานสูง พบว่าการนำไฟฟ้าเป็นแบบกฎของโอห์ม (Ohmic behavior) และเปลี่ยนเป็นลักษณะ Schottky emission เมื่อใส่ศักย์ไฟฟ้าสูง กราฟ I-V ของฟิล์มซิงค์ออกไซด์พบว่า การนำไฟฟ้าเป็นแบบ space-charge limited current ทั้งในสถานะที่มีความต้านทานต่ำและสูง ต่างกันที่ความเข้มของกระแส และค่า n

ข้อเสนอแนะ

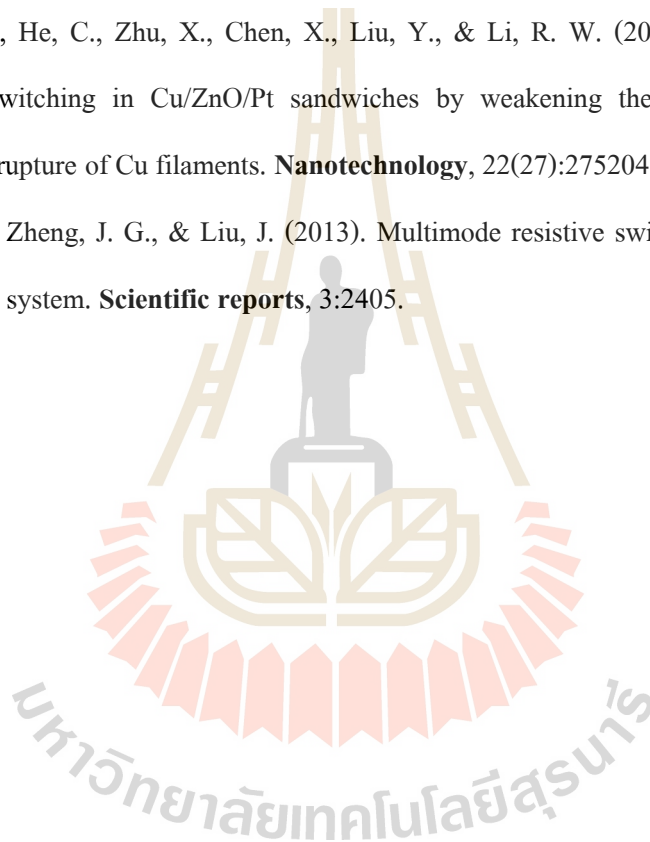
การเตรียมเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ resistive switching ควรปลูก ลวดนาโนให้ไม่ยาวมาก เพื่อสะดวกต่อการเก็บภาพ topography ลวดจะไม่เอนไปมาระหว่างการวัด ควรใช้เข็มวัดนำไฟฟ้าที่ทำจากแพลทินัมทั้งเข็ม ไม่ควรใช้เข็มวัดนำไฟฟ้าที่ทำจากการเคลือบ แพลทินัมบนเข็มซิลิคอน เพราะอาจมีกระแสเนื่องจากความเป็นไดโอดของเข็มไหลเข้ากราฟ I-V ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้จึงแนะนำให้ใช้ฐานสำหรับปลูกตัวอย่างที่ทำจากกระจก แทนซิลิคอนเพื่อให้ มีการนำไฟฟ้าผ่านฐานตัวอย่าง

การศึกษาเส้นลวดนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมชนิดวัดการนำไฟฟ้า ไม่ควรใช้อุปกรณ์วัดกระแสที่มากับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ควรใช้ source measurement unit เช่นเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากสามารถควบคุมการหยุดการจ่ายศักย์ไฟฟ้า และปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรได้ตามต้องการ

บรรณานุกรม

- Schmidt-Mende, L., & MacManus-Driscoll, J. L. (2007). ZnO–nanostructures, defects, and devices. **Materials today**, 10(5):40-48.
- Zhang X.G. (1996). Electrochemistry of Zinc Oxide. In: Corrosion and Electrochemistry of Zinc. **Springer, Boston**, 93-124.
- Cui, J. (2012). Zinc oxide nanowires. **Materials Characterization**, 64:43-52.
- Lee, J. S., Lee, S., & Noh, T. W. (2015). Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches. **Applied Physics Reviews**, 2(3):031303.
- Chen, J. Y., Hsin, C. L., Huang, C. W., Chiu, C. H., Huang, Y. T., Lin, S. J., ... & Chen, L. J. (2013). Dynamic evolution of conducting nanofilament in resistive switching memories. **Nano letters**, 13(8):3671-3677.
- Chang, W. Y., Lai, Y. C., Wu, T. B., Wang, S. F., Chen, F., & Tsai, M. J. (2008). Unipolar resistive switching characteristics of ZnO thin films for nonvolatile memory applications. **Applied Physics Letters**, 92(2) 022110.
- Dugaiczky, L., Ngo-Duc, T. T., Gacusan, J., Singh, K., Yang, J., Santhanam, S., ... & Oye, M. M. (2013). Resistive switching in single vertically-aligned ZnO nanowire grown directly on Cu substrate. **Chemical Physics Letters**, 575:112-114.
- Waser, R., & Aono, M. (2007). Nanoionics-based resistive switching memories. **Nature materials**, 6(11):833-840.
- Sawa, A. (2008). Resistive switching in transition metal oxides. **Materials today**, 11(6):28-36.
- Kim, K. M., Jeong, D. S., & Hwang, C. S. (2011). Nanofilamentary resistive switching in binary oxide system; a review on the present status and outlook. **Nanotechnology**, 22(25):254002.
- Yang, Y., Zhang, X., Gao, M., Zeng, F., Zhou, W., Xie, S., & Pan, F. (2011). Nonvolatile resistive switching in single crystalline ZnO nanowires. **Nanoscale**, 3(4):1917-1921.
- Raffone, F., Risplendi, F., & Cicero, G. (2016). A New theoretical insight into ZnO NWs memristive behavior. **Nano letters**, 16(4):2543-2547.

- Huang, Y., Luo, Y., Shen, Z., Yuan, G., & Zeng, H. (2014). Unipolar resistive switching of ZnO-single-wire memristors. **Nanoscale research letters**, 9(1):381.
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). Metal-semiconductor contacts, Metal-Insulator-Semiconductor. In: Physics of semiconductor devices. **John Wiley & Sons, Inc.**, 134-240.
- Chae, S. C., Lee, J. S., Kim, S., Lee, S. B., Chang, S. H., Liu, C., & Seo, S. (2008). Random circuit breaker network model for unipolar resistance switching. **Advanced Materials**, 20(6):1154-1159.
- Zhuge, F., Peng, S., He, C., Zhu, X., Chen, X., Liu, Y., & Li, R. W. (2011). Improvement of resistive switching in Cu/ZnO/Pt sandwiches by weakening the randomness of the formation/rupture of Cu filaments. **Nanotechnology**, 22(27):275204.
- Qi, J., Olmedo, M., Zheng, J. G., & Liu, J. (2013). Multimode resistive switching in single ZnO nanoisland system. **Scientific reports**, 3:2405.



ภาคผนวก

การเผยแพร่ผลงาน

1. การเผยแพร่ผลงานใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเยาวชน ครั้งที่ 12
ระหว่างวันที่ 3 - 4 มิถุนายน 2560 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค กรุงเทพฯ

หัวข้อการนำเสนอ: การศึกษาการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ด้วย
กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

อรดี ศรีгимแก้ว สาทนิษฐ์ สืบคำ และ วรศม กุณทีกาญจน์

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 3000

Email address: o.por180837@gmail.com โทรศัพท์ 090-101-4361

บทคัดย่อ: ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานมีความสำคัญต่อการพัฒนาหน่วยความจำเข้าถึงโดยสุ่มแบบใช้ความต้านทานเป็นตัวเก็บข้อมูล (RRAM) ซึ่งการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานส่วนใหญ่จะถูกศึกษาในวัสดุที่เป็นออกไซด์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งช่องว่างของออกซิเจนส่งผลต่อความต้านทานของวัสดุ โครงการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบวัดกระแสไฟฟ้า คณะวิจัยได้ดำเนินการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ซึ่งปลูกในแนวตั้งบนฐานที่เคลือบด้วยโลหะเงิน โดยใช้เข็มนำไฟฟ้าและฐานเงินเป็นขั้ว สถานะความต้านทานจะถูกตรวจสอบได้โดยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกผ่านทางขั้ว คณะวิจัยพบว่าการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานสามารถตรวจพบได้ในเส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนกลับค่าความต้านทานแบบใช้ศักย์ไฟฟ้าขั้วเดียว

คำสำคัญ: หน่วยความจำถาวร ปรากฏการณ์การเปลี่ยนกลับค่าความต้านทาน เส้นลวดนาโนซิงออกไซด์ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแบบวัดกระแสไฟฟ้า

Title: Study of the Resistive Switching Behavior in ZnO Nanowires Using Atomic Force Microscope

Oradee Srikimkaew, Satanee Suebka and Worasom Kundhikanjana

School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology

Email address: o.por180837@gmail.com

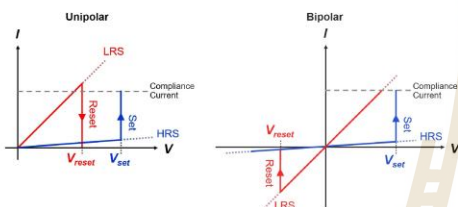
Tel. 090-101-4361

Abstract: Resistive switching phenomena is important for the development of resistive random access memory (RRAM). Most resistive switching phenomena were studied in oxide materials because the change in oxygen vacancies can change the resistivity in these materials. This project studies the resistive switching of ZnO nanowires using conductive atomic force microscope (C-AFM). We performed the current-voltage measurement on the ZnO nanowire grown vertically on a Ag substrate. The C-AFM tip and the Ag substrate act like as the top and bottom electrodes. By applying external voltage to electrodes, the resistance state of ZnO nanowires can be verified. We observed the resistive switching behavior in ZnO nanowires, and the behavior exhibits unipolar switching.

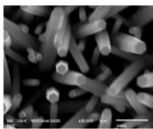


Resistive switching (RS) phenomena are a change in resistance between a high resistance state (HRS) and low resistance state (LRS), which occurs in dielectric materials when an external electric field is applied. Understanding RS phenomena is important for next-generation memory technology due to the application in resistive random access memory. RS phenomena have been studied most widely in oxide materials because the change in oxygen vacancies can change the resistivity in these materials. In this work, we studied the RS behavior in ZnO nanowires using conductive atomic force microscopy (C-AFM). Using C-AFM, we can directly observe the difference behavior of each nanowires.

Two typical classifications of RS phenomena



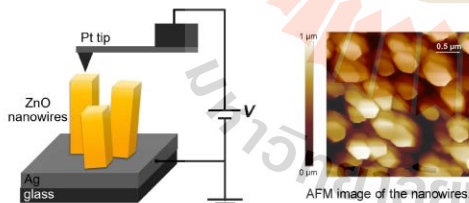
Unipolar switching requires only one polarity of external voltage for set and reset processes, but bipolar switching requires both two polarities.



ZnO nanowires sample

ZnO nanowires grown on Ag substrate via a seed-assisted hydrothermal process. Nanowires tend to stand vertically on the substrate. This arrangement makes ZnO nanowires suitable for C-AFM measurements.

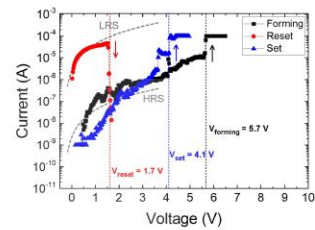
Conductive Atomic Force Microscopy (C-AFM)



- Operate by applying a bias voltage to a conductive AFM tip.
- Measure local conductivity by mean of current that flow throughout the sample.
- Obtain I - V characteristic of an individual nanowire.

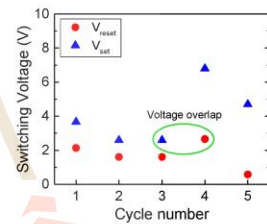
Results

Typical I - V curve of single ZnO nanowire



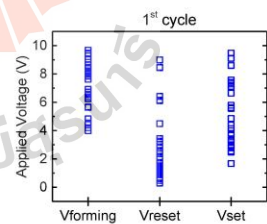
- The resistance can be changed between HRS and LRS when we apply only one polarity in the voltage sweep.
- This curve suggests a unipolar switching behavior.

Switching reproducibility of single ZnO nanowire



- Switching between the LRS and HRS can occur as many as 5 cycles.
- The V_{reset} and V_{set} sometime overlapped.

Switching voltage distributions of 30 ZnO nanowires



- Forming processes occurred at a $V_{forming}$ of > 3.0 V.
- Both V_{reset} and V_{set} values distribute between 0.0 - 10.0 V.

Conclusions

- We investigated resistive switching behavior in single ZnO nanowires using C-AFM.
- The I - V characteristic exhibits a unipolar resistive switching type.
- Cycling endurance of a single nanowire still cannot be obtained.
- The switching voltages of each nanowires are different.

Acknowledgements

We thank National Nanotechnology Center (PI: Dr. Anop Klarmcheun) for the ZnO nanowires samples. This work is supported in part by the Thailand Research Fund (TRF) (contract number TRG5880060), Suranaree University of Technology (SUT), and the Office of the Higher Education Commission under the National Research University (NRU) project.

2. การเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการ

ชื่อผู้แต่ง: Atitheb Chaiyasitdhi, Wirat Miphonpanyatawichok, Mathis Oliver Riehle, Rungrueng Phatthanakun, Weresak Surareungchai, Worasom Kundhikanjana, Panwong Kuntanawa

เรื่อง: The Biomechanical Role of Overall-shape Transformation in a Primitive Multicellular Organism: A Case Study of Dimorphism in the Filamentous Cyanobacterium *Arthrospira platensis*.

PLoS ONE 13(5): e0196383. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196383> (impact factor 2.6)



RESEARCH ARTICLE

The biomechanical role of overall-shape transformation in a primitive multicellular organism: A case study of dimorphism in the filamentous cyanobacterium *Arthrospira platensis*

Atitheb Chaiyasitdhi¹, Wirat Miphonpanyatawichok², Mathis Oliver Riehle³, Rungrueng Phatthanakun⁴, Werarak Surareungchai^{2,5}, Worasom Kundhikanjana⁶, Panwong Kuntanawat^{2,5,7*}



1 Biological Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, **2** Division of Biotechnology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, **3** Centre for Cell Engineering, Institute of Molecular, Cell and Systems Biology, College of Medical, Veterinary and Life Sciences, University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom, **4** The Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, Thailand, **5** Nanoscience & Nanotechnology Graduate Program, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, **6** School of Physics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, **7** School of Biotechnology, Institute of Agricultural Technology, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* panwong.kun@gmail.com

OPEN ACCESS

Citation: Chaiyasitdhi A, Miphonpanyatawichok W, Riehle MO, Phatthanakun R, Surareungchai W, Kundhikanjana W, et al. (2018) The biomechanical role of overall-shape transformation in a primitive multicellular organism: A case study of dimorphism in the filamentous cyanobacterium *Arthrospira platensis*. PLoS ONE 13(5): e0196383. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196383>

Editor: Etienne Dague, LAAS-CNRS, FRANCE

Received: April 26, 2017

Accepted: April 12, 2018

Published: May 10, 2018

Copyright: © 2018 Chaiyasitdhi et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

Funding: PK received funding from Thailand Research Fund (TRF) <http://www.trf.or.th/> (contract number TRG5880260). WK received funding from Suranaree University of Technology (SUT) www.sut.ac.th, and the Office of the Higher Education Commission under the National Research University (NRU) project. The funders

Abstract

Morphological transformations in primitive organisms have long been observed; however, its biomechanical roles are largely unexplored. In this study, we investigate the structural advantages of dimorphism in *Arthrospira platensis*, a filamentous multicellular cyanobacterium. We report that helical trichomes, the default shape, have a higher persistence length (L_p), indicating a higher resistance to bending or a large value of flexural rigidity (k), the product of the local cell stiffness (E) and the moment of inertia of the trichomes' cross-section (I). Through Atomic Force Microscopy (AFM), we determined that the E of straight and helical trichomes were the same. In contrast, our computational model shows that I is greatly dependent on helical radii, implying that trichome morphology is the major contributor to k variation. According to our estimation, increasing the helical radii alone can increase k by 2 orders of magnitude. We also observe that straight trichomes have improved gliding ability, due to its structure and lower k . Our study shows that dimorphism provides mechanical adjustability to the organism and may allow it to thrive in different environmental conditions. The higher k provides helical trichomes a better nutrient uptake through advection in aquatic environments. On the other hand, the lower k improves the gliding ability of straight trichomes in aquatic environments, enabling it to chemotactically relocate to more favorable territories when it encounters certain environmental stresses. When more optimal conditions are encountered, straight trichomes can revert to their original helical form. Our study is one of the first to highlight the biomechanical role of an overall-shape transformation in cyanobacteria.

ชื่อผู้แต่ง: Oradee Srikimkaew, Narathon Khemasiri, Panita Kasamechonchung, Annop Klamchuen,

Worasom Kundhikanjana

เรื่อง: Conduction Mechanisms in Unipolar Resistive Switching of ZnO Nanowires

กำลังอยู่ในขั้นตอนการเรียบเรียง



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ ดร. วรสม กุณทีกาญจน์

Email: worasom@g.sut.ac.th

การศึกษา/คุณวุฒิ: ปริญญาเอก : 2556 Ph.D. Applied Physics, Stanford University, USA

ปริญญาโท : 2552 M.Sc Applied Physics, Stanford University, USA

ปริญญาตรี : 2549 Sc.B Physics with Magna Cum Laude, Brown
University, USA

ตำแหน่งปัจจุบัน: อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติการทำงาน: 2556 - ปัจจุบัน

อาจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชื่อ นางสาวอรดี ศรีกิมแก้ว

การศึกษา/คุณวุฒิ: ปริญญาตรี : 2560 B.Sc. in Physics (Honors Program)

Suranaree University of Technology, Thailand

ปริญญาโท : 2560 – ปัจจุบัน M.Sc Physics

Suranaree University of Technology, Thailand

ชื่อ นางสาวสาทนีย์ สืบคำ

การศึกษา/คุณวุฒิ: ปริญญาตรี : 2561 B.Sc. in Physics (Honors Program)

Suranaree University of Technology, Thailand