



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์และตรวจสอบสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์หน่วยความจำที่โค้งงอได้จาก
ฟิล์มบางประกอบพอลิไวนิลคาร์บาโซล (PVK) กับ อนุภาคนาโนเงิน (Ag) ที่
เตรียมโดยเทคนิคการหมุนเคลือบ

Fabrication and characterization of flexible memory device from
poly(9-vinylcarbazole) (PVK):silver (Ag) nanoparticles composite
thin films prepared by spin coating technique

นายกรรช อ่อนระอ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์และตรวจสอบสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์หน่วยความจำที่โค้งงอได้จาก
ฟิล์มบางประกอบพอลิไวนิลคาร์บาโซล (PVK) กับ อนุภาคนาโนเงิน (Ag) ที่
เตรียมโดยเทคนิคการหมุนเคลือบ

Fabrication and characterization of flexible memory device from
poly(9-vinylcarbazole) (PVK):silver (Ag) nanoparticles composite
thin films prepared by spin coating technique

นายกรกช อ่อนละอ

RCH
152 ก
2560

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149690
วัน,เดือน,ปี. 22...ธ.ค. 2561



ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การประดิษฐ์และตรวจสอบสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์หน่วยความจำที่โค้งงอได้จากฟิล์มบางประกอบพอลิไวนิลคาร์บาโซล (PVK) กับ อนุภาคนาโนเงิน (Ag) ที่เตรียมโดยเทคนิคการหมุนเคลือบ

แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 290,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2560

บทคัดย่อ

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะได้ถูกสร้างขึ้นจากอนุภาคนาโนเงิน (Ag NPs) ที่ฝังตัวในพอลิเมอร์ poly(9-vinylcarbazole) (PVK) โดยมีโครงสร้างเป็น ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก จากผลการศึกษาพบว่าสมบัติทางไฟฟ้า (I-V) ของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำที่แรงดันการอ่านต่ำแสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าสถานะทางกระแสได้สามสถานะคือ สถานะปิด (OFF-state) สถานะเปิด (ON-state) และสถานะกลาง (INTERM-state) ซึ่งอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นประพุดิตตัวเป็นหน่วยความจำที่สามารถเขียนซ้ำได้แบบไม่ลบเลือน หรือ non-volatile rewritable memory สำหรับกลไกการนำกระแสของอุปกรณ์ได้มีการวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบทางทฤษฎีจากข้อมูล I-V นอกจากนี้ระยะเวลาการเก็บรักษาข้อมูลที่มีสถานะแตกต่างกันได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจน นอกจากนี้จากเงื่อนไขที่เหมาะสมของอัตราส่วนอนุภาคนาโนเงินที่ได้จากการศึกษาคือ 6 wt% ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างที่สามารถโค้งงอได้บนฐานรองรับพลาสติก (polyethylene naphthalate, PEN) ซึ่งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นยังคงแสดงให้เห็นสถานะที่แตกต่างกันทั้งสามสถานะได้อย่างชัดเจน และเพื่อศึกษาผลกระทบและความสามารถในการโค้งงอจึงได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างการโค้งงอ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองจำนวนรอบในการโค้งงอพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นยังคงสามารถรักษาสถานะการนำในสถานะ OFF ON และ INTERM ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: หน่วยความจำ, โค้งงอ, อนุภาคนาโนเงิน, Ag, พอลิเมอร์, PVK, วัสดุประกอบ

Research Title: Fabrication and characterization of flexible memory device from poly(9-vinylcarbazole) (PVK):silver (Ag) nanoparticles composite thin films prepared by spin coating technique

Researcher: Assist.professor Dr. Korakot Onlaor

College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

Multilevel memory devices were achieved using silver nanoparticles (Ag NPs) embedded in poly(9-vinylcarbazole) (PVK) with a structure of ITO/PVK:Ag NPs/Al on glass substrate. The current-voltage (I-V) curves of the memory devices at low reading voltages showed different states of current (OFF-, ON- and INTERM-state). The memory devices exhibited non-volatile rewritable memory characteristics. The carrier transport mechanisms of the devices in each state were analyzed by theoretical models based on the experimental I-V data. In addition, retention time measurements showed clearly different current states with good data retention properties. In addition, the optimal Ag NPs concentration at 6 wt% was used to fabricate the flexible multilevel memory device on polyethylene naphthalate (PEN) substrate. The device showed clearly multi-switching behavior. To explore the influence of bending on flexible device performance, the substrates were bended during operation. However, the number of cycle test showed that the fabricated flexible multilevel memory device could retain conductivity in the OFF-state, ON-state and INTERM-state without much deterioration.

Keywords: Memory, Flexible, Silver nanoparticles, Ag, Polymer, PVK, Composite

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล ต้นฐ์ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย ตลอดจนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ Electronics and Control System for Nanodevice Research Laboratory วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศยาภรณ์ ทิววงศ์ สำหรับวัสดุวิทยาศาสตร์ที่ได้ใช้ในการศึกษาวิจัยเบื้องต้น

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกช อ่อนละอ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 อุปกรณ์หน่วยความจำนาโน.....	3
2.1.1 หน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวน.....	5
2.1.2 หน่วยความจำจากพอลิเมอร์.....	6
2.2 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์หน่วยความจำนาโน.....	6
2.3 กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ.....	7
2.3.1 โครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	8
2.3.2 โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน.....	9
2.3.3 โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะเป็นชั้นกลาง.....	10
2.4 คุณสมบัติเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์.....	11
2.5 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....	11
2.5.1 โลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในภาวะสมดุลความร้อนก่อนการสัมผัส.....	12
2.5.2 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนหลังการสัมผัส.....	13
2.5.3 บริเวณปลอดพาหะ.....	14
2.6 การฉีดพาหะของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	15
2.7 การดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 การเกิดสถานะดักจับ.....	16
2.8 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์.....	17
2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	17
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).....	18
2.9 การตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	18
2.9.1 ความเป็นฮิสเตอรีซิส.....	19
2.9.2 กลไกการนำกระแส.....	19
2.9.3 ความสามารถในการทำซ้ำ.....	20
2.9.4 เสถียรภาพ.....	21
2.9.5 สมบัติการโค้งงอ.....	22
2.10 พอลิไวนิลคาร์บาโซล หรือ Poly (9-vinylcarbazole) (PVK).....	23
2.11 อนุภาคนาโนเงิน.....	23
2.12 การทบทวนวรรณกรรม.....	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	33
3.2 ระบบเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ.....	33
3.3 กระบวนการกัดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ (ITO).....	34
3.4 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ.....	34
3.4.1 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกเคลือบ ITO.....	34
3.4.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ PEN.....	35
3.5 การเตรียมสารประกอบระหว่าง PVK:Ag NPs.....	35
3.6 การสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำด้วยวิธีการหมุนเคลือบ.....	35
3.6.1 การสร้างชั้นฟิล์มบาง PVK:Ag NPs.....	35
3.6.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านบนด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	35
3.7 การศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านต่าง ๆ.....	36
3.7.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	36
3.7.2 กล้องจุลทรรศน์แบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	37
3.7.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM).....	38
3.7.4 การทดสอบสมบัติการโค้งงอ.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	40
4.1 อุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก.....	40
4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก.....	42
4.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซ้ำของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้างที่เหมาะสม (ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al).....	44
4.1.3 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al จากค่ากระแสกับความต่างศักย์.....	44
4.1.4 กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al.....	46
4.1.5 การทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al.....	49
4.1.6 การประมาณการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al.....	50
4.2 อุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับพลาสติก.....	51
4.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับ PEN ในลักษณะแบนราบ.....	52
4.2.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับ PEN ภายใต้การโค้งงอ.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	58
บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
ภาคผนวก ข.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	76

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (ก) เชิงเส้น และ (ข) ลอการิทึม.....	5
2.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน.....	6
2.3 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะสำหรับโครงสร้างชั้นเดียว.....	8
2.4 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์สำหรับโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน.....	9
2.5 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์สำหรับโครงสร้างสามชั้นที่มีชั้นโลหะบาง ๆ แทรก.....	10
2.6 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส.....	12
2.7 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำหลังการสัมผัส.....	13
2.8 ระดับพลังงานของ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ภายใต้เงื่อนไขการไบแอสที่แตกต่างกัน (ก) สมดุลความร้อน (ข) ไบแอสตรง และ (ค) ไบแอสย้อนกลับ.....	14
2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	17
2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	18
2.11 การหาค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ.....	19
2.12 ส่วนหนึ่งของกลไกการนำในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ (ก) สเปซชาร์จ (ข) เทอร์โมอิเล็กทริกอิมีสชัน (ค) Pool-Frenkel อิมีสชัน และ (ง) การทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordhem.....	20
2.13 การทดสอบสมบัติการ อ่าน-เขียนซ้ำ (ก) ลักษณะพัลส์ และ (ข) จำนวนครั้ง.....	21
2.14 การทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ.....	22
2.15 การทดสอบเสถียรภาพการโค้งงอของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบโค้งงอได้.....	22
2.16 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวเนลคาร์บาโซล.....	23
2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนเงิน.....	24
2.18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเงินที่ปริมาณอัตราส่วนของโพแทสเซียมคลอไรด์ต่างๆ กัน.....	24
2.19 โครงสร้างและวิธีการเตรียมอุปกรณ์หน่วยความจำจากอนุภาคนาโน CZTS.....	25
2.20 ลักษณะการเขียน-ลบข้อมูลซ้ำ.....	26
2.21 โครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำและสมบัติทางไฟฟ้า.....	26
2.22 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ และภาพตัดขวางจากกล้อง SEM.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 สมบัติทางไฟฟ้า กลไกการเกิด และความเสถียรของอุปกรณ์ระยะยาว.....	27
2.24 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์.....	28
2.25 สมบัติทางไฟฟ้า และ การอ่านข้อมูลระยะยาว.....	28
2.26 กระบวนการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำด้วยวิธี laminated.....	29
2.27 สมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเกิดของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	29
2.28 ลักษณะโครงสร้างและภาพถ่ายของอุปกรณ์.....	30
2.29 สมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเกิดของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	30
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2 ระบบประเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	33
3.3 ระบบประเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	33
3.4 แผ่นฐานรองรับ ITO ที่ถูกปิดด้วยหน้ากาก (แถบดำหมายถึงบริเวณที่เป็นหน้ากาก).....	34
3.5 ลักษณะหน้ากากสำหรับระเหยอลูมิเนียม (แถบดำหมายถึงบริเวณที่เป็นหน้ากาก) (ก) บนฐานรองรับพลาสติก (ข) บนฐานรองรับกระจก.....	36
3.6 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบชั้นเดียว.....	36
3.7 เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้า Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter.....	37
3.8 ชุดทดสอบความสามารถในการ อ่าน-เขียน และเสถียรภาพของอุปกรณ์.....	37
3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดรุ่น JSM-7001F.....	38
3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านรุ่น TECNAI 20.....	38
3.11 ชุดทดสอบสมบัติการโค้งงอ.....	39
4.1 (ก-ฉ) ความหนาของชั้นวัสดุประกอบ PVK:Ag NPs ที่อัตราส่วนต่างกัน ภาพแทรก: ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่อัตราส่วนต่างกัน และ (ซ-ญ) ลักษณะพื้นผิวของชั้น PVK:Ag NPs.....	41
4.2 โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับกระจก.....	41
4.3 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจกที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงินต่างกัน.....	42
4.4 ผลกระทบของอนุภาคนาโนเงินที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วน ON/OFF และค่า SET-ON.....	43
4.5 (ก) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al ที่ได้ทำการตรวจวัดซ้ำอย่างต่อเนื่อง เส้นประในรูปแสดงถึงค่าแรงดันในการอ่านข้อมูล (V_{read}) ที่ -0.5 V (ข) ลักษณะตัวอย่างของรอบการ “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” ของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา VIII อย่างไรก็ดีเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ข้อมูลการทดลองและข้อมูลการเทียบสมการของโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al (ก) การนำแบบ thermionic ในช่วงแรงดันบวก (OFF-state) (ข) การนำแบบ ohmic ในช่วงแรงดันบวก (ON-state) (ค) การนำแบบ ohmic ในช่วงแรงดันลบ (ON- ไปเป็น INTERM-state) และ (ง) การนำแบบ direct tunneling ในช่วงแรงดันลบ (INTERM- ไปเป็น OFF-state).....	45
4.7 แผนภาพแถบพลังงานที่สถานะการนำแตกต่างกัน (ก) สถานะเริ่มต้น (ข) สถานะ OFF ด้านแรงดันบวก (ค) สถานะ ON ด้านแรงดันบวก (ง) การเปลี่ยนจากสถานะ ON ไปเป็น INTERM ด้านแรงดันลบ และ (จ) การเปลี่ยนจากสถานะ INTERM ไปเป็น OFF ด้านแรงดันลบ.....	47
4.8 (ก) ตัวอย่างการ “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะ (ข) ความสามารถในการอ่านเขียนซ้ำของสถานะ OFF ON และ INTERM สำหรับ 500 รอบ (ค) ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ (ง) การทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์สามสถานะในระยะยาวเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง.....	49
4.9 การประมาณการเสื่อมเสถียรภาพของอุปกรณ์สามสถานะในระยะยาวเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง.....	50
4.10 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับกระจก และ (ข) ภาพถ่ายอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับพลาสติก.....	51
4.11 (ก) การทดสอบค่ากระแสและความต่างศักย์ในลักษณะแบนราบ, d =ระยะห่างจากขอบถึงขอบของอุปกรณ์ และ (ข) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับที่โค้งงอได้.....	52
4.12 การหารัศมีความโค้งขณะทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	53
4.13 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับที่โค้งงอได้ทดสอบโดยการงอที่มีการเพิ่มระยะการโค้งงอ.....	55
4.14 ลักษณะการตรวจวัดสมบัติการโค้งงอแบบนับรอบ.....	56
4.15 เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการทำซ้ำภายหลังจากการโค้งงอ.....	56
4.16 ค่าความหนาของชั้น ITO และ PVK:Ag NPs.....	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างและความหมายของเซลล์มูลฐานสำหรับหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ.....	3
2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ.....	4
2.3 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์หน่วยความจำนาโน.....	7
2.4 ตัวอย่างกระบวนการนำของพาหะ.....	15
2.5 คุณสมบัติของ PVK ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	23
2.6 เปรียบเทียบภาพรวมของงานวิจัยที่ผ่านมาของอุปกรณ์หน่วยความจำ.....	30
4.1 ขั้นตอนการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกัน.....	53
4.2 การวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดกับตัวอุปกรณ์ระหว่างโค้งงอ.....	57



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เทคโนโลยีหน่วยความจำที่อยู่บนพื้นฐานของการพัฒนาจากซิลิคอนได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง [1] หลังจากนั้นเป็นต้นมาหน่วยความจำได้เข้ามาเป็นส่วนสำคัญในการเก็บข้อมูลในการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แทบจะทุกชนิด แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีหน่วยความจำบนฐานรองรับซิลิคอน เป็นสิ่งที่ยุ่งยากและมีต้นทุนสูงเกินไปเมื่อนำมาบูรณาการในเรื่องทั่ว ๆ ไป เช่น ของเล่น บัตรอิเล็กทรอนิกส์ ป้ายอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งตัวอย่างที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้หน่วยความจำที่สามารถโค้งงอได้ และที่สำคัญไม่จำเป็นต้องมีเนื้อที่ความจุของข้อมูลมากนัก ดังนั้นในหลายปีที่ผ่านมาจึงได้มีการศึกษาใหม่ ๆ เกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำเกิดขึ้น นั่นคือหน่วยความจำจากสารอินทรีย์ โดยมุ่งพัฒนาถึงโครงสร้างอย่างง่ายของตัวอุปกรณ์ที่มีต้นทุนที่ต่ำ ตลอดจนกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น วิธีการปั่น [2] การพ่นเคลือบ [3] การใช้แม่แบบขนาดนาโน [4] และอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างบนฐานรองรับพลาสติกได้ และยังสามารถสร้างได้ที่อุณหภูมิห้อง และจากที่ผ่านมาหนึ่งในวัสดุที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องได้แก่ วัสดุประกอบจากการใช้อุณหภูมิผสมกับพอลิเมอร์ ในโครงสร้าง โลหะ/ฉนวน/โลหะ [5-9] เนื่องจากความหลากหลายของวัสดุทั้งพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนที่มีให้เลือกศึกษานั้นเอง

พอลิไวนิลคาร์บาโซล หรือ Poly (9-vinylcarbazole) (PVK) ถือเป็นวัสดุพอลิเมอร์อินทรีย์ ที่มีคุณสมบัติเด่นคือการเคลื่อนที่ของโฮล (hole transport) ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และออปติกส์ ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิไวนิลคาร์บาโซล มีระดับพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ (HOMO) และ ระดับพลังงานต่ำที่สุดที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ (LUMO) ประมาณ 5.5 และ 2 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

ในขณะที่อนุภาคนาโนเงิน (Ag nanoparticles, Ag NPs) เป็นอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่มอนุภาคนาโนโลหะ อนุภาคนาโนเงินปัจจุบันได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์ สามารถนำไปใช้สำหรับฆ่าเชื้อและผลิตเครื่องมือสำหรับการผ่าตัด ทางอุตสาหกรรมใช้อุณหภูมิเงินเป็นสารเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำที่เตรียมจากวัสดุประกอบโดยวิธีการหมุนเคลือบจากอนุภาคนาโนเงินที่ผสมกับพอลิไวนิลคาร์บาโซล ซึ่งนับเป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถเตรียมได้บนฐานรองรับพลาสติกและที่อุณหภูมิห้อง จะเป็นการลดต้นทุนของระบบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม อีกทั้งยังสอดคล้องต่อทิศทางและแนวโน้มในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านหน่วยความจำในปัจจุบัน และสามารถก้าวตามเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วได้ทัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและเตรียมฟิล์มบางประกอบของพอลิไวนิลคาร์บาโซลกับอนุภาคนาโนเงิน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PVK:Ag NPs สำหรับสร้างเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำ
- 1.2.3 สร้างอุปกรณ์หน่วยความจำที่โค้งงอได้จากฟิล์มบาง PVK:Ag NPs

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สามารถหาเงื่อนไขที่เหมาะสมระหว่างพอลิไวนิลคาร์บาโซลกับอนุภาคนาโนเงินในการเตรียมเป็นฟิล์มบางได้
- 1.3.2 สามารถประดิษฐ์อุปกรณ์หน่วยความจำที่โค้งงอได้จากฟิล์มบางประกอบของพอลิไวนิลคาร์บาโซลกับอนุภาคนาโนเงินได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคและวิธีการเตรียมฟิล์มบางจากวัสดุประกอบด้วยวิธีการหมุนเคลือบ
- 1.4.2 สามารถนำข้อมูลและเงื่อนไขที่ได้ไปสู่การพัฒนาเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำได้

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

เนื้อหาของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนหลัก ดังนี้

- บทที่ 1: กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย
- บทที่ 2: กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของอุปกรณ์หน่วยความจำ และทฤษฎีการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า
- บทที่ 3: กล่าวถึงวิธีการทดลองของงานวิจัย กระบวนการเตรียมสารประกอบระหว่างพอลิไวนิลคาร์บาโซลกับอนุภาคนาโนเงิน และกล่าวถึงกระบวนการประดิษฐ์อุปกรณ์หน่วยความจำ
- บทที่ 4: กล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางและผลของการตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์
- บทที่ 5: เป็นการสรุปภาพรวมของงานวิจัยนี้ทั้งหมด
- บทที่ 6: เป็นการสรุปภาพรวมของผลผลิตที่ได้จากการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 อุปกรณ์หน่วยความจำนาโน

องค์ประกอบพื้นฐานของหน่วยความจำคือ เซลล์มูลฐาน ซึ่งสามารถจำแนกได้หลายประเภทเช่น ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว (1T), ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว กับตัวเก็บประจุ 1 ตัว (1T1C), ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว กับตัวต้านทาน 1 ตัว (1T1R) เช่นในกรณีของ Dynamic Random Access Memory (DRAM) จะอาศัยการทำงานของทรานซิสเตอร์ (T) หนึ่งและตัวเก็บประจุ (C) หนึ่งตัว จึงถูกจัดเป็นเซลล์ชนิด 1T1C ในกรณีอื่นๆ เช่น phase change memory จะอาศัยทรานซิสเตอร์หนึ่งตัวและความต้านทาน (R) หนึ่งตัว โดยจะถูกจัดเป็นเซลล์ประเภท 1T1R ตัวอย่างของหน่วยความจำต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างและความหมายของเซลล์มูลฐานสำหรับหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ [10]

Cell Element	Type	Non-volatility	Retention Time
1T1R or 1D1R [n]	MRAM	Non-volatile	> 10 years
	Phase Change Memory	Non-volatile	> 10 years
	Polymer Memory	Non-volatile	> 10 years
	Molecular memory	Non-Volatile	> years
	Insulator Resistance Change Memory	Non-Volatile	> years
1T1C [n]	DRAM	Volatile	~ seconds
	FeRAM	Non-volatile	> 10 years
1T [n]	FB DRAM	Volatile	< seconds
	Flash Memory	Non-volatile	> 10 years
	SONOS	Non-volatile	> 10 years
	Nano Floating Gate Memory	Non-volatile	> 10 years
	Engineered Tunnel Barrier Memory	Non-volatile	> 10 years
	FeFET Memory	Non-volatile	> years
Multiple T [n]	SRAM	Volatile	large
	STTM [ข]	Volatile	small

[n] 1T1R-1 transistor-1 resistor 1D1R-1 diode-1 resistor 1T1C-1 transistor-1 capacitor 1T-1 transistor FB DRAM-floating body DRAM FeFET-ferroelectric FET Multiple T-multiple transistor SONOS-silicon/oxide/nitride/oxide/silicon
[ข] STTM-scaleable 2-transistor memory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ [10]

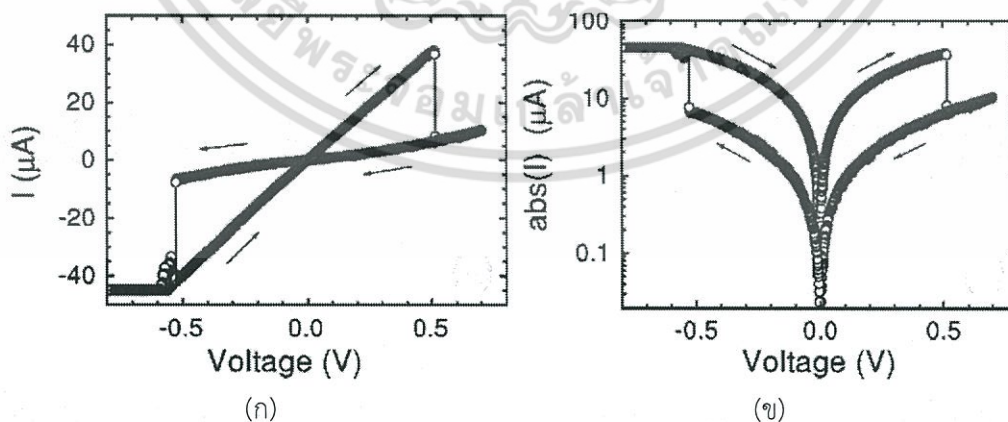
Properties		Nano-floating Gate Memory	Ferroelectric FET Memory	Insulator Resistance Change Memory	Polymer or organic Memory
Storage Mechanism		Charge on floating gate	polarization on a ferroelectric gate dielectric	Multiple mechanisms	Not known
Cell Elements		1T	1T	1T1R or 1R	1T1R or 1R
Device Types		1 Nanocrystal 2 Direct tunneling	FET with FE gate insulator	1 M-I-M 2 Solid Electrolyte 3 FE tunneling 4 FE Schottky diode 5 FE-I-FE	M-I-M (nc)-I-M
Read Time	Minimum required	<15 ns	<15 ns	<15 ns	<15 ns
	Best projected	2.5 ns	2.5 ns	<10 ns	<10 ns
	Demonstrated	20 ns	20 ns	2 ms	~10 ns
Write/Erase time	Minimum required	1 μ s/10 ms	Application dependent	Application dependent	Application dependent
	Best projected	1 μ s/10 ms	2.5 ns	<20 ns	Not known
	Demonstrated	W: 1–10 μ s E: 10–100 ms	500 ns	25 ns	<10 ns
Retention Time	Minimum required	>10 y	>10 y	>10 y	>10 y
	Best projected	>10 y	>1 y	>10 y	Not known
	Demonstrated	>200 hours	30 days	1 y	6 month
Write Cycles	Minimum required	>1E5	>1E5	>1E5	>1E5
	Best projected	>1E5	>3E16	>3E16	>3E16
	Demonstrated	>1E4	~1E12	~1E5	~1E6
Write Operating	Minimum required	Application dependent	Application dependent	Application dependent	Application dependent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Properties		Nano-floating Gate Memory	Ferroelectric FET Memory	Insulator Resistance Change Memory	Polymer or organic Memory
Voltage (V)	Best projected	>3 V	<0.9 V	<0.5 V	Not known
	Demonstrated	± 6 V	± 6 V	0.24 V	$\sim \pm 2$ V
Read Operating Voltage (V)	Minimum required	2.5 V	2.5 V	2.5 V	2.5 V
	Best projected	0.7 V	0.7 V	<0.2 V	~ 1 V
	Demonstrated	2.5 V	2.5 V	0.2 V	~ 1 V

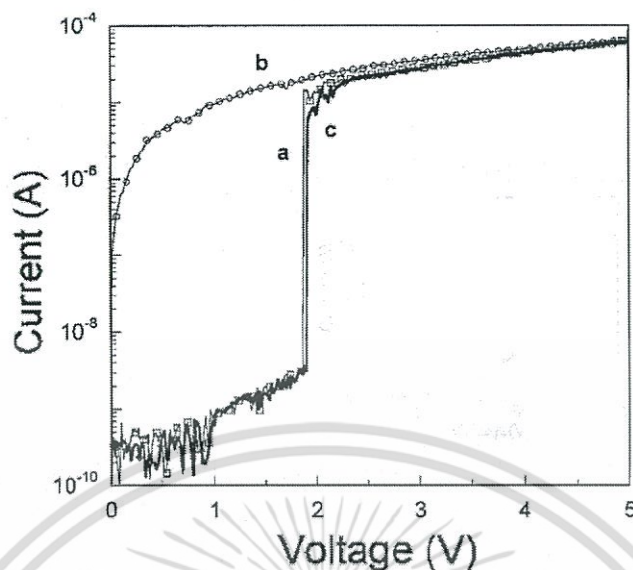
2.1.1 หน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวน

โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวนคือโครงสร้างแบบ โลหะ/ฉนวน/โลหะ (metal/insulator/metal: MIM) ซึ่งอาศัยหลักการฉีกกระแสผ่านโครงสร้างแล้ววัดกระแสรั่วที่มีลักษณะเป็นฮิสเทอรีซิส ชั้นฉนวนมักถูกสร้างจาก TiO_2 , NiO , Al_2O_3 หรือ SrZrO_3 ที่ถูกโคปด้วยโลหะ เช่น Cr การบันทึกข้อมูลสามารถกระทำได้โดยการป้อนค่าความต่างศักย์ ให้แก่โครงสร้าง MIM ซึ่งสามารถทำให้ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานรวมของโครงสร้างระหว่างสภาวะความต้านทานต่ำและสูงได้ เช่น ผลการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันผ่านโครงสร้าง $\text{Au/SrZrO}_3\text{:Cr/SrRuO}_3$ [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดย Au คือชั้นโลหะด้านบน ในขณะที่ SrRuO_3 คือชั้นโลหะด้านล่าง และ SrZrO_3 คือชั้นฉนวนที่ถูกโคปด้วย Cr สำหรับการอ่านข้อมูลกระทำได้โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าในระดับที่ต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของโครงสร้างแล้วทำการวัดค่ากระแส [12]



รูปที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (ก) เซิงเส้น และ (ข) ลอการิทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน


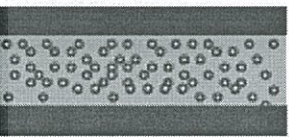

2.1.2 หน่วยความจำจากพอลิเมอร์

หน่วยความจำจากพอลิเมอร์ ในความเป็นจริงแล้วมีสารกึ่งตัวนำอินทรีย์หลายชนิดที่นำมาทำการศึกษาและจัดอยู่ในหน่วยความจำประเภทนี้ มีโครงสร้างที่ง่ายคือ มีชั้นพอลิเมอร์หรือชั้นสารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างขั้วโลหะ โดยสามารถจำแนกได้เป็นโครงสร้างแบบชั้นเดียวและโครงสร้างแบบสามชั้น เช่น โครงสร้างแบบสามชั้นที่ใช้สารกึ่งตัวนำ 2-amino-4, 5-imidazole-dicarbonitrile (AIDCN) [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข้อแตกต่างระหว่างหน่วยความจำชนิดนี้กับหน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวนคือ ชั้นโลหะบาง ๆ ที่คั่นกลางระหว่างชั้นฟิล์ม โดยมีผู้เสนอว่ากลไกการเก็บประจุของโครงสร้างนี้เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มโลหะบาง ๆ หรืออนุภาคนาโนในชั้นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเล็ก ๆ ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่ได้เชื่อมต่อเป็นพื้นผิวเดียวกันอย่างต่อเนื่อง [12]

2.2 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์หน่วยความจำนาโน

สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่เข้ามามีบทบาทในช่วงหลายปีที่ผ่านมา และได้มีการศึกษาพัฒนาเรื่อยมาซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามรูปแบบที่พบเห็นได้บ่อยในหลาย ๆ งานวิจัยแสดงดังตาราง

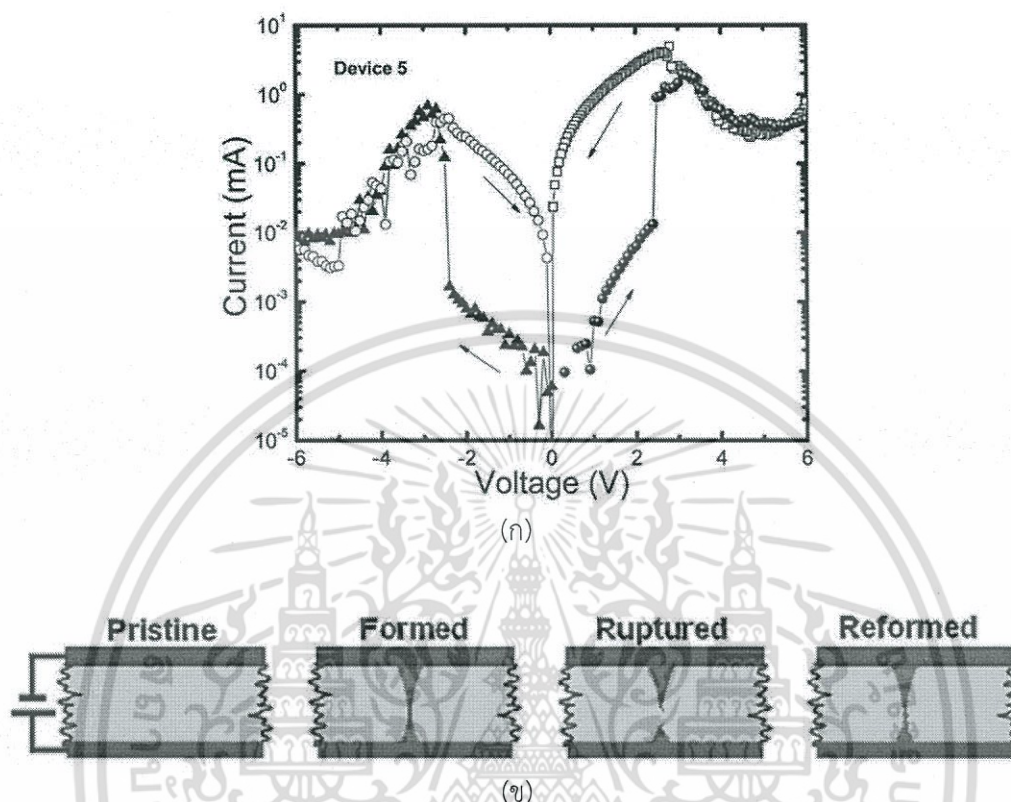
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์หน่วยความจำนาโน [13]

	<p>โครงสร้างแบบชั้นเดียว (1L)</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีทั้งในโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์ชั้นเดียว - สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ชั้นเดียว - รวมถึงชั้นของโลหะออกไซด์
	<p>ใช้คุณสมบัติของอนุภาคนาโน (nanoparticles) กระจายตัวในชั้นของฟิล์มบาง</p> <ul style="list-style-type: none"> - อนุภาคนาโนที่นำมาใช้มีทั้งอนุภาคของโลหะและอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ - เช่น อนุภาคของ ทอง, เงิน, CdSe, ZnS, C60, PCBM และอื่น ๆ
	<p>อาศัยสมบัติเฉพาะของชั้นฟิล์มบางโลหะ ที่ถูกแทรกอยู่ภายใน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชั้นโลหะจะทำหน้าที่ในการกักและเก็บประจุ จึงทำให้ตัวอุปกรณ์สามารถเปลี่ยนสถานะในการนำไฟฟ้าได้

2.3 กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

อุปกรณ์หน่วยความจำเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์, อนินทรีย์, พอลิเมอร์ และโลหะออกไซด์ในโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สำหรับการบันทึกและอ่านข้อมูลสามารถทำได้โดยการให้ความต่างศักย์แก่ตัวอุปกรณ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเกิดขึ้นภายในและส่งผลให้ตัวอุปกรณ์แสดงสมบัติของหน่วยความจำออกมา โดยค่าของกระแสที่สถานะสูงเรียกว่า “สถานะเปิด (ON state)” และที่สถานะต่ำเรียกว่า “สถานะปิด (OFF state)” โดยมีอัตราส่วนของค่ากระแสที่สถานะเปิดกับสถานะปิดขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้และรูปแบบโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ ซึ่งทั้งสามโครงสร้างคือ โครงสร้างแบบชั้นเดียว, โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน และโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะบาง ๆ เป็นชั้นกลาง ซึ่งจะมีกลไกในการทำงานที่แตกต่างกัน [12]

2.3.1 โครงสร้างแบบชั้นเดียว

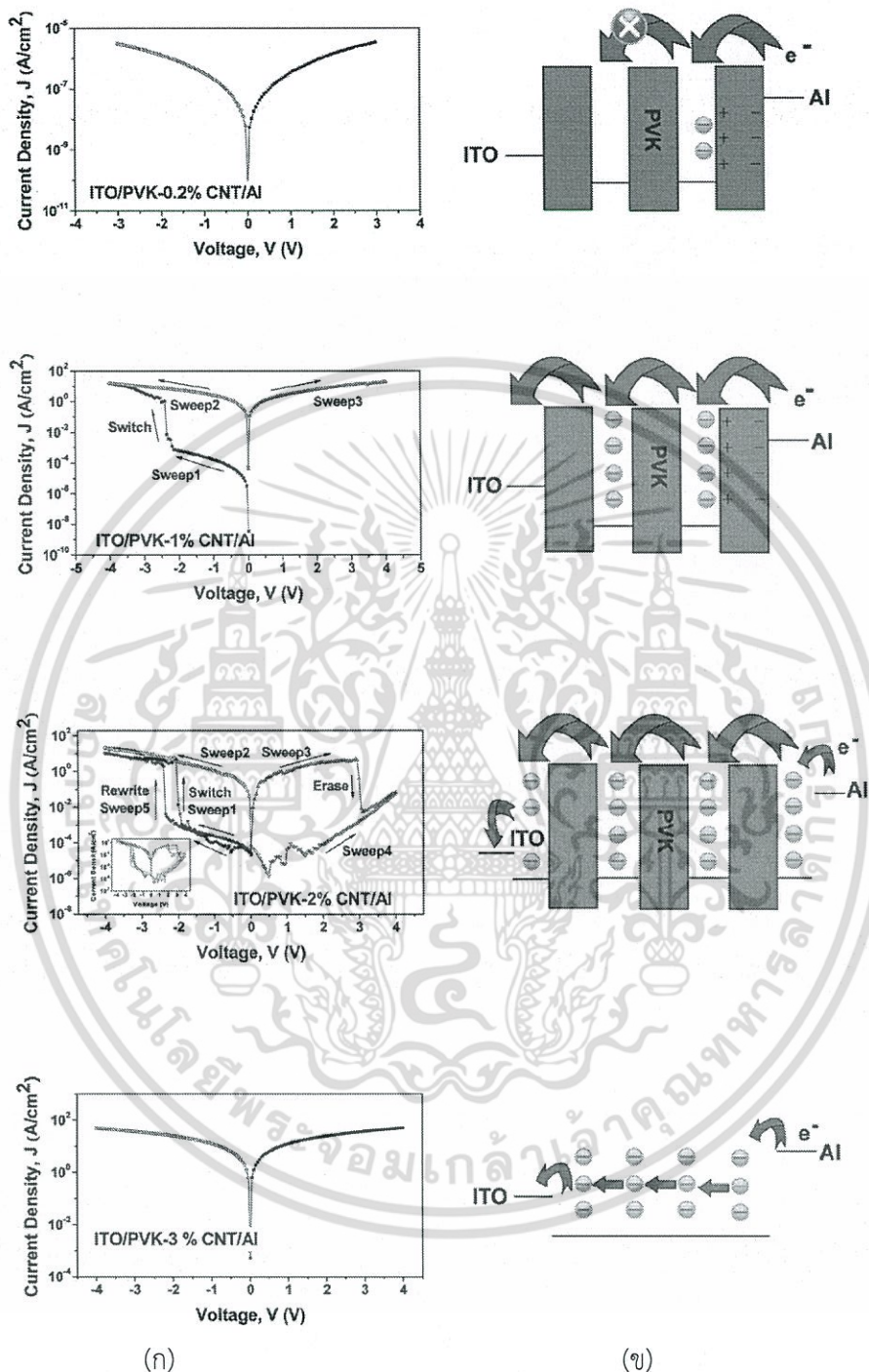


รูปที่ 2.3 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะสำหรับโครงสร้างชั้นเดียว [14,15]

โดยทั่วไปอุปกรณ์หน่วยความจำแบบชั้นเดียวจะเป็นโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MIM) ซึ่งอาศัยหลักการฉีกกระแสผ่านโครงสร้างของตัวอุปกรณ์แล้ววัดกระแส สำหรับกลไกการทำงานคือกลไกที่เกิดจากเส้นใยโลหะ (metallic filaments) จากรูปที่ 2.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง รูป (ก) และ (ข) ในช่วงเริ่มต้น (pristine) ที่แรงดันไฟฟ้า 0 ถึง +2 โวลต์การนำจะมีค่าต่ำ หลังจากนั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า +2 โวลต์ ภายในชั้นสารกึ่งตัวนำจะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะเป็นเส้นทางเฉพาะขนาดเล็ก (formed) ทำให้การไหลของกระแสเป็นไปได้ง่าย จึงเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปิดไปสู่สถานะเปิด หลังจากนั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ +4 โวลต์ กระแสจะเริ่มลดลงเนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะเป็นเส้นทางเฉพาะขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะ และเมื่ออุณหภูมิภายในเส้นทางกับบริเวณข้างเคียงมีความแตกต่างกันก็จะทำให้เส้นทางเหล่านี้เกิดการแตกออก (rupture) จึงทำให้ความสามารถในการนำกระแสลดลง และในชั้นของสารกึ่งตัวนำสามารถสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะขึ้นมาได้ใหม่เมื่ออุณหภูมิลดลง (reformed)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน

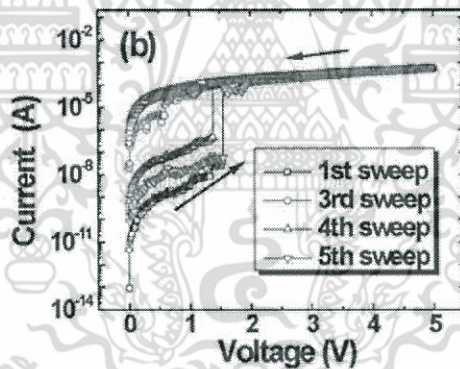


รูปที่ 2.4 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์สำหรับ โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน [16]

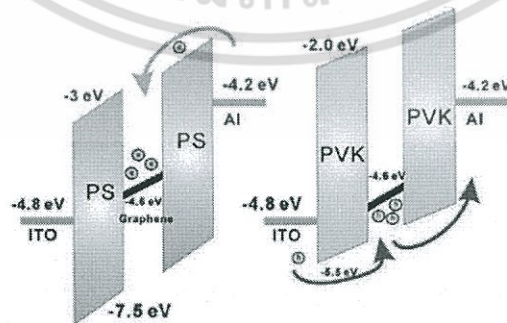
อุปกรณ์หน่วยความจำโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโนจะมีลักษณะและวิธีการ สร้างคล้ายกับโครงสร้างแบบชั้นเดียว เพียงแต่สารที่นำมาใช้เป็นชั้นทำงาน (active layer) ส่วนใหญ่จะเป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์เนื่องจากต้องมีการผสมอนุภาคนาโนลงไปและมีความจำเป็นที่จะต้องทำให้อนุภาคเหล่านั้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เช่น โครงสร้างที่เป็นท่อคาร์บอนขนาดนาโน (CNT) ผสมลงไปใน poly-(N-vinylcarbazole) (PVK) [16] จากรูปที่ 2.4 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง รูป (ก) และ (ข) ที่ความเข้มข้นของ CNT 0.2% จะไม่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะเนื่องจากอนุภาคนาโนในชั้นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเล็ก ๆ หรือที่เรียกว่าคลัสเตอร์ (cluster) นั้นอยู่ห่างกันมากทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง (electron hopping) ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทำให้การนำไฟฟ้าเป็นไปได้ยาก แต่เมื่อความเข้มข้นของ CNT เพิ่มขึ้นถึง 1-2% ทำให้เกิดการกระจายตัวที่เหมาะสมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็สามารถเกิดขึ้นได้ โดย PVK ที่อยู่รอบ ๆ CNT จะทำหน้าที่เป็นชั้นกักอิเล็กตรอน จึงทำให้ตัวอุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปิดไปสู่สถานะเปิด ในทางตรงกันข้ามหากปริมาณของ CNT มีมากเกินไปจนทำให้กลุ่มก้อนของ CNT อยู่ใกล้ชิดกันมาก ก็จะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีความคล่องตัวสูงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ดีไม่เกิดการจับประจุ จึงไม่แสดงสมบัติแบบสองสถานะให้เห็น [12]

2.3.3 โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะเป็นชั้นกลาง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์สำหรับ

โครงสร้างสามชั้นที่มีชั้นโลหะบาง ๆ แทรก [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นของโลหะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีทั้งลักษณะของข้อผิดพลาดแบบสมมาตร (ข้อผิดพลาดเดียวกัน) และไม่สมมาตร (ข้อผิดพลาดต่างกัน) ในโครงสร้างสามชั้นนี้กลไกที่ทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะจะเกิดจากการดักจับและปลดปล่อยพาหะซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโน แต่สิ่งที่ต่างกันคือตำแหน่งในการดักจับพาหะ สำหรับในโครงสร้างแบบสามชั้นจะใช้คุณสมบัติของความเป็นผลึกขนาดนาโนแทนคุณสมบัติของอนุภาคขนาดนาโนที่ผสมในพอลิเมอร์ จากรูปที่ 2.5 ชั้นของพอลิเมอร์จะเป็นชั้นที่ทำหน้าที่กักพาหะให้อยู่ในชั้นของ กราฟีน (graphene) [17] ซึ่งสามารถจับได้ทั้งโฮลและอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำและขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของข้อผิดพลาดที่นำมาใช้

2.4 คุณสมบัติเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการวิเคราะห์ถึงลักษณะเฉพาะจากความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ (I-V) ถือเป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบกลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยลักษณะของกราฟ I-V จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และจะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของอุปกรณ์และรูปแบบพฤติกรรมในวงจรไฟฟ้า เช่น แรงดันที่ใช้ในการ อ่าน เขียน

นอกจากนี้ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าที่เกิดจากชั้นทำงานที่อยู่ระหว่างสองข้อผิดพลาดสามารถนำไปใช้ในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุเช่นการนำทางไฟฟ้า, การเคลื่อนที่ของพาหะและประสิทธิภาพของการฉีดพาหะ [18]

ลักษณะเฉพาะจาก I-V ของอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็น โลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ จะถูกควบคุมโดยกระบวนการขั้นพื้นฐาน 2 กระบวนการ คือ

- การฉีดพาหะจากข้อผิดพลาดเข้าไปยังชั้นของสารกึ่งตัวนำ
- การเคลื่อนที่ของพาหะในชั้นของสารกึ่งตัวนำ

โดยปกติค่ากระแสจะถูกกำหนดโดยขีดจำกัดของการฉีดพาหะหรือขีดจำกัดของการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากความไม่ตรงกันของระดับพลังงานระหว่างฟังก์ชันงานของข้อผิดพลาดและระดับพลังงานการเคลื่อนที่ของพาหะของสารกึ่งตัวนำ รวมถึงความคล่องตัวของพาหะและการดักจับพาหะในชั้นของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นที่บริเวณรอยต่อ โลหะกับสารกึ่งตัวนำ จึงเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่จำเป็นในการทำความเข้าใจถึงกลไกและลักษณะการนำของอุปกรณ์

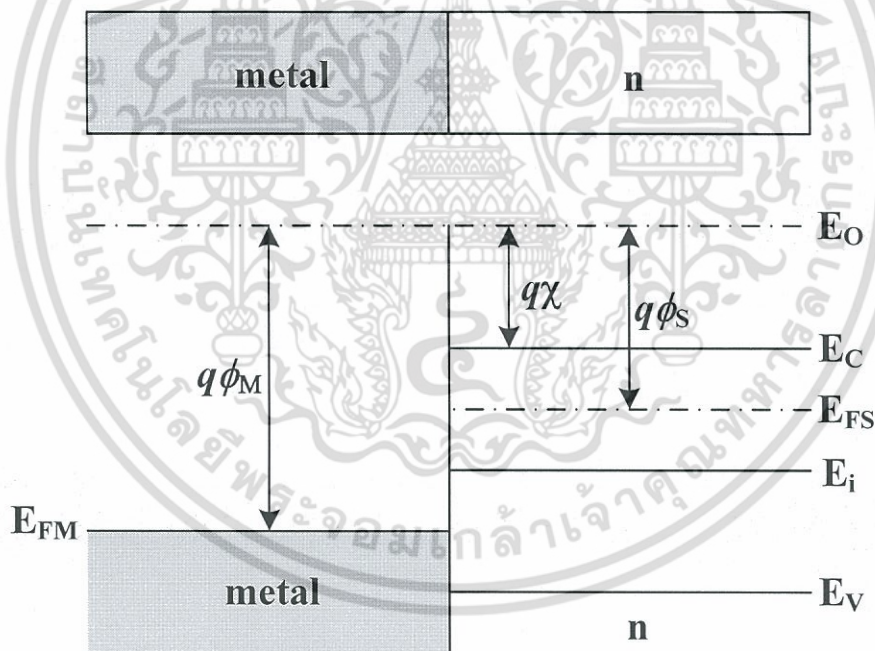
2.5 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะให้ลักษณะสมบัติแรงดันไฟฟ้าที่แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ รอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) และรอยสัมผัสช็อตตี้ (schottky contact) โดยปกติการใช้งานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกจะเป็นลักษณะของรอยสัมผัสโอห์มมิก ซึ่งจะไม่มีผลเกี่ยวกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง

2.5.1 โลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในภาวะสมดุลความร้อนก่อนการสัมผัส

พิจารณาที่แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนการสัมผัส ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้สำหรับการศึกษาทั่วไป แสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีระดับพลังงานที่เรียกว่า ระดับสุญญากาศ (E_0) หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกเนื้อสาร ในด้านโลหะจะมีระดับเฟอร์มิของโลหะ (E_{FM}) อยู่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศ เรียกว่า ฟังก์ชันงานของโลหะ ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งหมายถึง ค่าพลังงานน้อยสุดที่อิเล็กตรอนต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะ



รูปที่ 2.6 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส

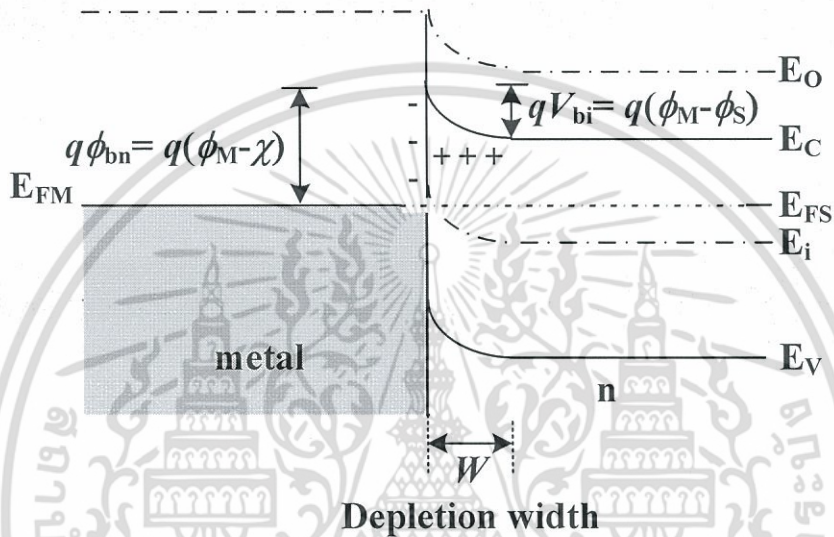
$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.1)$$

$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.2)$$

ส่วนด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (E_i) ซึ่งค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ (E_{FS}) ดังสมการที่ 2.2 ส่วนค่าอิเล็กตรอนแอฟฟี-นิตีของสารกึ่งตัวนำ (χ) คือ ความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศกับระดับการนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าต้องการเพื่อที่จะเคลื่อนที่ไปหยุดนิ่งที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่าแตกต่างกันตามชนิดของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน มีค่า 4.03 eV เป็นต้น

2.5.2 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนหลังการสัมผัส



รูปที่ 2.7 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำหลังการสัมผัส

เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน แสดงในรูปที่ 2.7 เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($\phi_m > \phi_s$) ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะ จนเกิดเป็นไอออนบวกทางด้านสารกึ่งตัวนำ และเกิดไอออนลบทางด้านโลหะ และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัสโดยมีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไม่ให้แพร่เข้าไปในโลหะ ซึ่งสนามไฟฟ้านี้ทำให้แถบพลังงานบริเวณรอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้น โดยที่การโค้งงอของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะมีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (contact potential : V_{bi}) หรือกำแพงศักย์ภายใน (potential barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำดังสมการ

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.3)$$

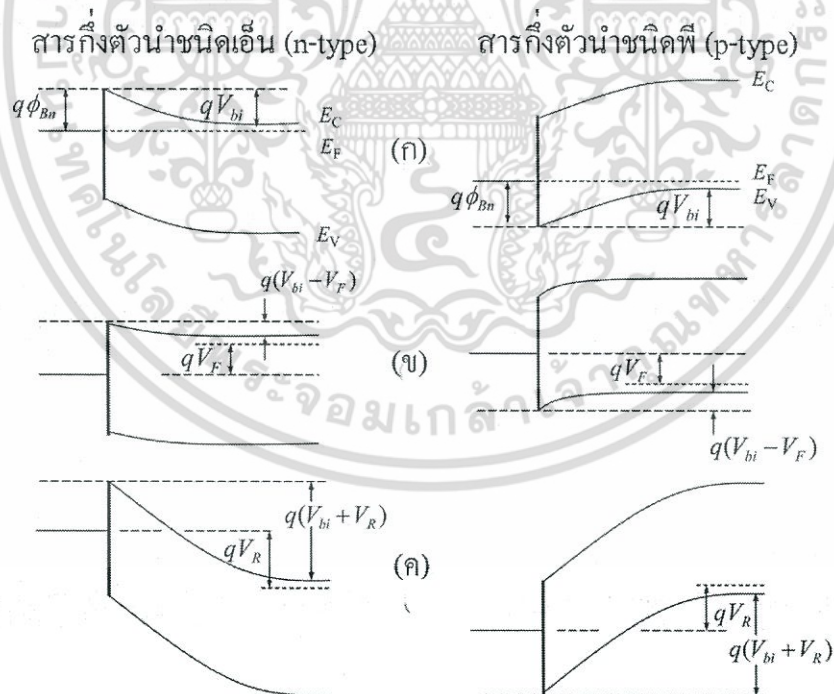
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิล็กตรอนด้านโลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช็อตกี (Schottky barrier: ϕ_{bn}) มีค่าดังสมการที่ (2.4)

$$qV_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.4)$$

2.5.3 บริเวณปลอดพาหะ

รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีภายใต้เงื่อนไขการไบอัสที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 2.8(ก) รอยต่ออยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนไม่มีการไบอัส และเมื่อมีการป้อนแรงดันไบอัสตรงให้กับรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.8(ข) และสำหรับการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.8(ค) ในขณะที่ไบอัสตรงให้กับรอยต่อสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [รูปที่ 2.8(ข)] ระดับเฟอร์มีด้านโลหะจะลดต่ำลงกว่าด้านสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้ศักย์ทางด้านของสารกึ่งตัวนำลดลงทำให้ความเหมาะสมของการแพร่พาหะมีการเปลี่ยนแปลงโดยอิล็กตรอนจะแพร่จากฝั่งสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมากกว่าที่แพร่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำและนำไปสู่กระแสบวกที่ไหลผ่านรอยต่อโดยเทียบกับศักย์ที่พื้นผิว (V_{bi}) แต่ในขณะที่ไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [รูปที่ 2.8(ค)] ระดับเฟอร์มีด้านโลหะจะถูกยกสูงขึ้นกว่าด้านสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้ศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นและบริเวณปลอดพาหะกับสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อกว้างขึ้น



รูปที่ 2.8 ระดับพลังงานของ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสที่แตกต่างกัน (ก) สมดุลความร้อน (ข) ไบอัสตรง และ (ค) ไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การฉีดพาหะของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างกระบวนการนำของพาหะ [14]

Conduction process	Expression	Temperature dependence	Voltage dependence
Schottky emission	$J = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{q(V/d)/4\pi\epsilon_i})}{kT} \right]$	$\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) \sim \frac{1}{T}$	$\ln(J) \sim V^{1/2}$
Poole-Frenkel emission	$J = \frac{V}{d} \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{q(V/d)\pi\epsilon_i})}{kT} \right]$	$\ln(J) \sim \frac{1}{T}$	$\ln\left(\frac{J}{V}\right) \sim V^{1/2}$
Thermionic emission	$J = T^2 \exp \left[\frac{-(\phi - q\sqrt{qV/4\pi d\epsilon_i})}{kT} \right]$	$\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) \sim \frac{1}{T}$	$\ln(J) \sim V^{1/2}$
Fowler-Nordheim tunneling	$J = \left(\frac{V}{d}\right)^2 \exp \left[\frac{-4d\sqrt{2m^*\phi_B^{3/2}}}{3q\hbar V} \right]$	N/A	$\ln\left(\frac{J}{V^2}\right) \sim V^{1/2}$
Space charge limited	$J = \frac{9}{8} \frac{\epsilon_i \mu V^2}{d^3}$	N/A	$J \sim V^2$
Ohmic conduction	$J = \frac{V}{d} \exp \left(\frac{-\Delta E_{ae}}{kT} \right)$	$\ln(J) \sim \frac{1}{T}$	$J \sim V$

A^* =effective Richardson constant, ϕ_B = barrier height, ϵ_i = insulator dynamic permittivity, k = Boltzmann's constant, m^* = effective, d = insulator thickness, μ = charge carrier mobility, ΔE_{ae} = activation energy of electron, and ΔE_{ai} activation energy of ions

ตารางที่ 2.4 แสดงการกระบวนการนำพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ จากรูปแบบกระบวนการนำดังสมการในตารางนั้นสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้

ตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดกระบวนการเทอร์โมไอออไนคิมิสชันที่บริเวณรอยต่อ (Thermionic emission) การพล็อตกราฟระหว่างระหว่าง $\ln(J) \sim V^{1/2}$ จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง

2.7 การดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

ประจุพาหะที่ถูกดักอยู่ในสารกึ่งตัวนำนั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาหลังจากระยะเวลาผ่านไป หรือเกิดการรวมตัวใหม่เมื่อเจอประจุพาหะตรงข้าม โดยสถานะดักจับอาจทำหน้าที่เป็นทั้งสถานะดักจับหรือสถานะที่ทำให้เกิดการรวมตัว โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วนของปริมาณพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย ผลกระทบที่เห็นได้ชัดจากการดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำคือ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของพาหะ เพราะพาหะจะถูกกักและไม่สามารถมีส่วนร่วมในการไหลของกระแส แต่อย่างไรก็ตาม พาหะที่ถูกจับจะมีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้าในชั้นของสารกึ่งตัวนำ และหากสถานะดักจับมีการปลดปล่อยพาหะในปริมาณที่ต่ำพอที่จะทำให้เข้าถึงภาวะสมดุลการเคลื่อนที่ และหากการปลดปล่อยพาหะเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยสามารถทำให้มีการหน่วงได้ ก็จะส่งผลให้เกิดคุณสมบัติแบบฮิสเทอรีซิสขึ้น ด้วยเหตุผลนี้เองจึงเป็นสมมติฐานที่สำคัญที่จะทำความเข้าใจถึงพื้นฐานและนำไปสู่การประยุกต์ใช้ความรู้จากสถานะในการดักจับพาหะเพื่อที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำต่อไป

2.7.1 การเกิดสถานะดักจับ

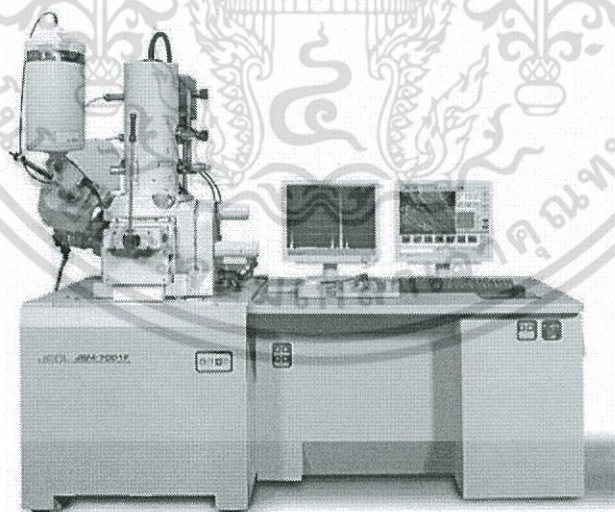
แหล่งที่มาของสถานะดักจับในสารกึ่งตัวนำคือ:

- (1) ความบริสุทธิ์ (impurities) [20]: เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลในสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปจะมีความบกพร่องมากกว่าเมื่อเทียบกับปฏิสัมพันธ์จากแรงภายในโมเลกุลเอง เมื่อสารกึ่งตัวนำไม่มีความบริสุทธิ์ (มีโมเลกุลมากกว่าหนึ่งชนิด) ระดับพลังงานจะเกิดการซ้อนทับกัน ทำให้ในช่องว่างของระดับพลังงานเกิดเป็นสถานะดักจับขึ้น
- (2) ข้อบกพร่องของผลึก (structural defects) [20]: ถึงแม้ว่าสารกึ่งตัวนำจะมีความบริสุทธิ์โดยมีโมเลกุลเพียงชนิดเดียวก็ตาม แต่ในความเป็นจริงระดับพลังงานที่แน่นอนของสารกึ่งตัวนำไม่สามารถกำหนดได้จากโครงสร้างทางเคมีเพียงอย่างเดียว อย่างเช่นในกรณีของพอลิเมอร์การเชื่อมต่อกันของสายโซ่จะมีผลกระทบต่อระดับพลังงาน HOMO และ LUMO จึงกล่าวได้ว่าความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานได้ โดยในกรณีของพอลิเมอร์ก็คือความยาวของสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันนั่นเอง สำหรับในผลึกข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมาจากบริเวณขอบของผลึก (grain boundaries) โดยข้อบกพร่องของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อสถานะดักจับที่เพิ่มขึ้น
- (3) การจับคู่ของพาหะ (geminate pairs) [20]: เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีความเป็นฉนวนที่ต่ำจึงมีพลังงานคู่ออมบ์ที่แข็งแรง โดยโฮลและอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญต่อการเกิดพลังงานคู่ออมบ์เป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีหลายโมเลกุลที่ถูกแยกออกจากโฮลและอิเล็กตรอนก็ตาม โดยคู่ของพาหะที่เกิดพลังงานคู่ออมบ์จะเรียกว่า คู่ geminate

(4) การดักจับด้วยตัวเอง (self-trapping) [20]: ประจุพาหะส่วนเกินมักจะนำไปสู่การเสียรูปของโมเลกุลโดยจะทำให้เกิดการลดลงของพลังงาน ซึ่งพาหะดังกล่าวเมื่อรวมกับการเปลี่ยนรูปของโมเลกุลแล้วกลายเป็นลักษณะกึ่งอนุภาคจะถูกเรียกว่า โพลารอน (polaron) และถ้าหากประจุพาหะ 2 ประจุเกิดการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันจะเรียกว่า ไบโพลารอน (bipolaron) โดยในความเป็นจริงแล้วโพลารอนและไบโพลารอนไม่ใช่สถานะดักจับเนื่องจากมันสามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้ แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของโพลารอนและไบโพลารอนจะมีความคล่องตัวต่ำกว่าของประจุพาหะค่อนข้างมาก จึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของพาหะ โดยปกติพลังงานส่วนเกินจะมีค่าลดลงไม่มากไปกว่าสิบเมกะอิเล็กตรอนโวลต์จึงไม่พิจารณาว่าเป็นสถานะดักจับ แต่สำหรับในพอลิเมอร์บางชนิด เช่น polythiophene หรือ polyacetylene การเกิดโพลารอนและไบโพลารอนจะเกิดจากการลดลงของพลังงานในระดับหลายร้อยเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในกรณีนี้ประจุพาหะจะถูกจับด้วยสายโซ่ของตัวพอลิเมอร์เอง โดยกลไกดังกล่าวจะเรียกว่าการดักจับด้วยตัวเอง

2.8 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์

2.8.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอาศัยลำอิเล็กตรอนเป็นตัวแทนของแสงในการทำให้เสมือนว่ามองเห็นภาพ โดยลำอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะถูกควบคุมโฟกัสให้กราด (สแกน) ไปทั่วพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนมีปฏิสัมพันธ์กับชิ้นงาน ก็จะมีการเอกสเรชันเป็นเอกสเรชันที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียพลังงาน พลังงานที่หายไปจะถูกแปลงไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่น เช่น ความร้อน การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ หรือ อิเล็กตรอนสะท้อนกลับ หรือ การปล่อยแสง หรือการเปล่งรังสีเอกซ์ พลังงานทั้งหมดเหล่านี้เป็นสัญญาณของข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของพื้นผิวของชิ้นงาน เช่นรูปร่างและองค์ประกอบของมัน ภาพที่แสดงโดย SEM จะแปลผลจากความเข้มที่แตกต่างกันบนตำแหน่งใดๆ ที่เกิดปฏิสัมพันธ์ของสัญญาณให้เป็นภาพที่อยู่ในตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งของลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน

2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)



รูปที่ 2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านอาศัยลำอิเล็กตรอนเป็นตัวแทนของแสงในการทำให้เสมือนว่ามองเห็นภาพเช่นเดียวกับ SEM แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ตัวอย่างที่จะศึกษาจะต้องมีลักษณะที่แบนและบางมาก ทำให้เกิดการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านตัวอย่างไปจะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ ซึ่งจะปรากฏบนฉากและสร้างภาพขึ้นมา

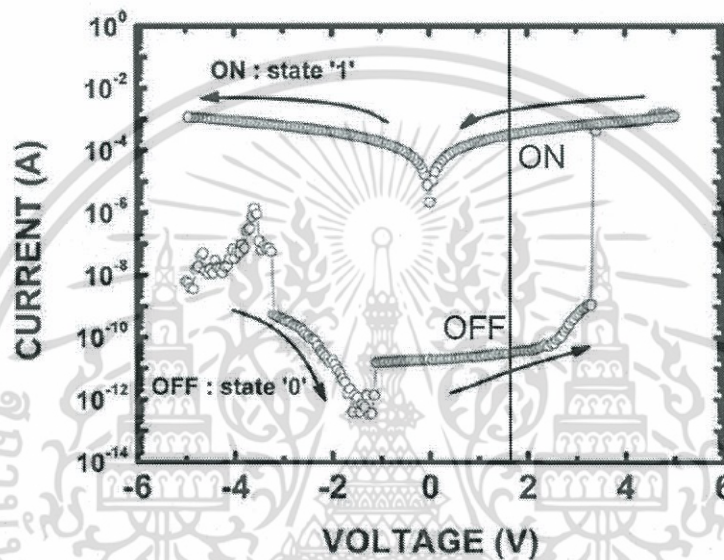
2.9 การตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ภายหลังการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ สิ่งที่เป็นอุปสรรคอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ก็คือ การทดสอบคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ ในความเป็นจริงแล้วการทดสอบคุณสมบัตินี้มีอยู่มากมายหลายการทดสอบ ไม่ว่าจะเป็นอนุกรมที่มีผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ ความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์ ขนาดพื้นที่ทำงานที่มีผลต่อความเป็นอุปกรณ์แบบสองสถานะ และอื่น ๆ แต่ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างวิธีการตรวจสอบคุณสมบัติที่พบเห็นได้จากงานวิจัยทั่วไป ซึ่งมีการตรวจสอบหลักอยู่ 4 แบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 ความเป็นฮิสเตอรีซิส

ฮิสเตอรีซิส คือ ผลต่างสูงสุดของค่ากระแสที่อ่านได้จากอุปกรณ์ โดยทำการวัดที่ค่าแรงดันไบอัสเดียวกัน สำหรับในอุปกรณ์หน่วยความจำก็คือค่าที่แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสถานะทั้งสองสถานะนั่นเอง โดยค่าที่วัดได้นี้จะเรียกว่าค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด แสดงดังรูปที่ 2.11 ในโครงสร้างของ PET/ITO/PMMA/graphene/PMMA/Al ซึ่งสามารถให้ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดได้สูงถึง 10^7 [21]

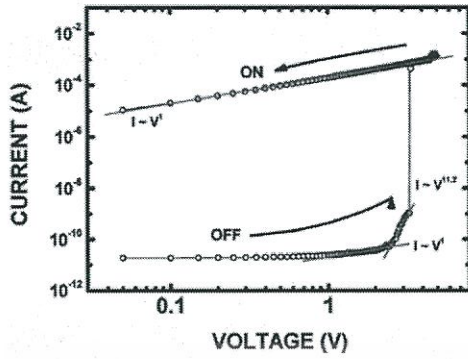


รูปที่ 2.11 การหาค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

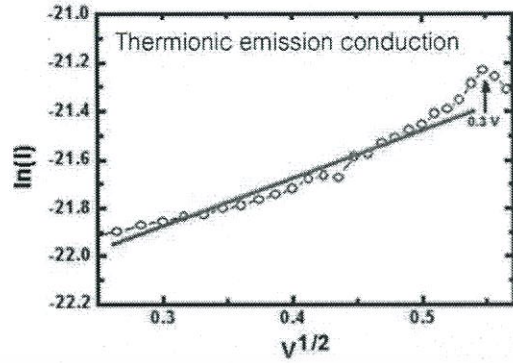
2.9.2 กลไกการนำกระแส

สำหรับกลไกการนำกระแสจะเป็นการพูดถึงกระบวนการฉีดกระแสในตัวอุปกรณ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ อุดมhuri และฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ได้อธิบายถึงกลไกในการฉีดกระแสของตัวอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่นกลไกการนำกระแสที่เกิดจากสเปซชาร์จ [21], เทอร์โมไอออไนซึม [22], Pool-Frenkel อิมิสชัน และการทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordhem แสดงดังรูปที่ 2.12 (ก)-(ง) ตามลำดับ

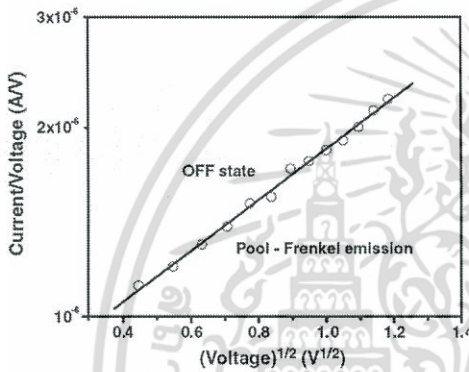
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



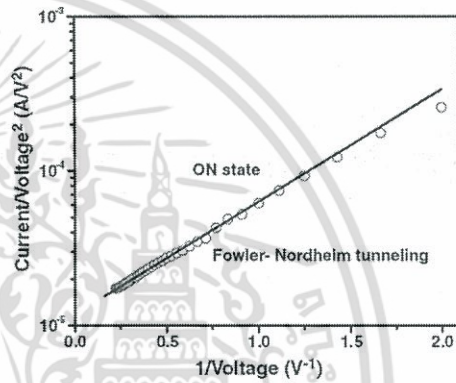
(ก)



(ข)



(ค)

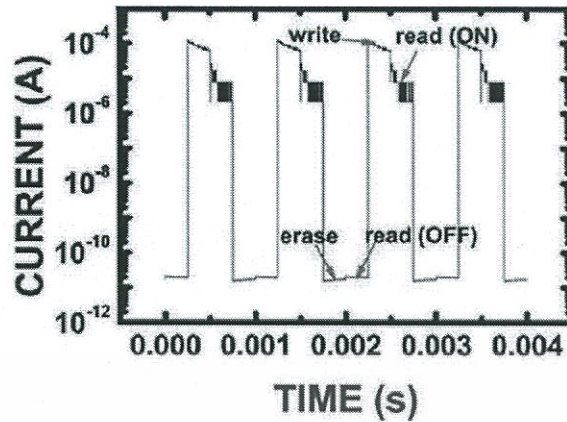


(ง)

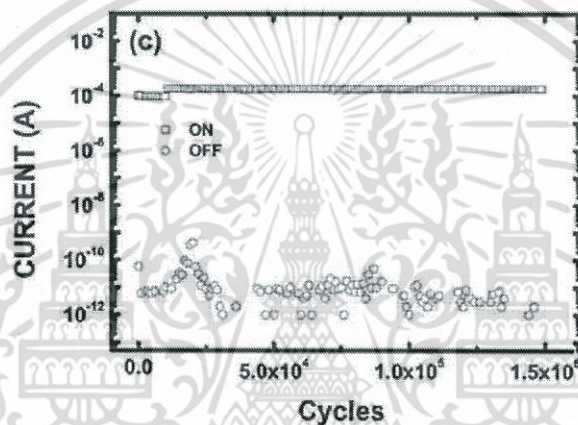
รูปที่ 2.12 ส่วนหนึ่งของกลไกการนำในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ (ก) สเปซชาร์จ (ข) เทอร์มิโอนิกอิมิสชัน (ค) Pool-Frenkel อิมิสชัน และ (ง) การทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordhem

2.9.3 ความสามารถในการทำซ้ำ

ความสามารถในการทำซ้ำคือจำนวนครั้งของการตรวจวัดที่ควรจะได้ค่าเดิมภายใต้เงื่อนไขเดิม สำหรับในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะจะเรียกว่า สมบัติในการอ่าน-เขียนซ้ำ หรือ switching cycles นั่นเอง โดยปกติจะใช้การป้อนความต่างศักย์แบบพัลส์ที่ใช้ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน แล้วเก็บข้อมูลเฉพาะตำแหน่งกระแสเปิดและปิด เพื่อดูความสามารถของอุปกรณ์ สำหรับตัวอย่างผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2.13



(ก)

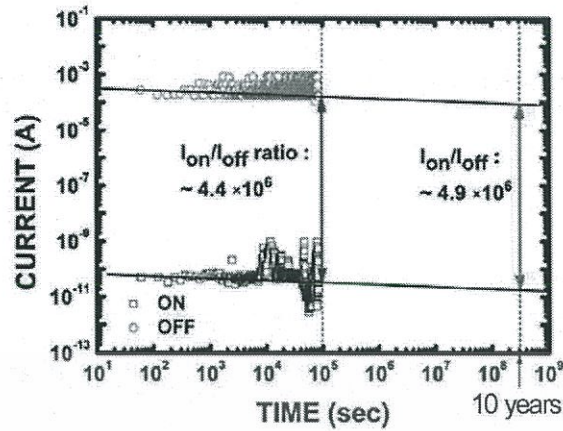


(ข)

รูปที่ 2.13 การทดสอบสมบัติการ อ่าน-เขียนซ้ำ (ก) ลักษณะพัลส์ และ (ข) จำนวนครั้ง [21]

2.9.4 เสถียรภาพ

ความมีเสถียรภาพเป็นการวัดสถานะของค่าเอาต์พุตของอุปกรณ์หน่วยความจำภายใต้เงื่อนไขการป้อนศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าคงที่เป็นระยะเวลาสั้น โดยปกติจะทำการป้อนความต่างศักย์ที่ใช้ในการ เขียน หรือลบ หนึ่งครั้ง และหลังจากนั้นจะทำการป้อนแรงดันที่ใช้สำหรับการอ่านค่าเพื่อทำการอ่านค่าระยะยาว มีจุดประสงค์เพื่อดูแนวโน้มของความสามารถในการเก็บรักษาข้อมูลหรือสถานะของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ [21]

2.9.5 สมบัติการโค้งงอ

คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่โค้งงอได้ก็คือความสามารถในการโค้งงอ ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งมีสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายดังสมการ [23,24]

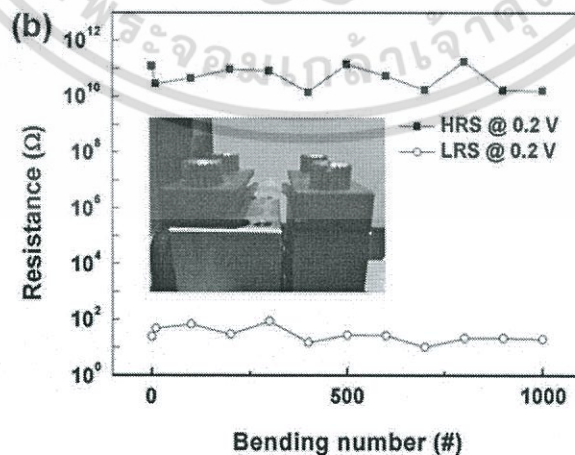
$$strain = \frac{(substrate\ thickness) + (total\ film\ thickness)}{2 \times (bending\ curvature\ radius\ of\ the\ substrate)} \times 100\% \quad (2.5)$$

Strain คือ ค่าความเครียด หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความสามารถที่อุปกรณ์ทนได้เมื่อมีการโค้งงอ

Substrate thickness คือ ความหนาของฐานรองรับ

Total film thickness คือ ความหนาของชั้นฟิล์มบาง

Bending curvature คือ รัศมีความโค้งขณะเกิดการโค้งงอ

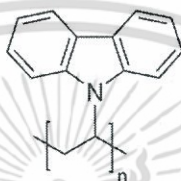


รูปที่ 2.15 การทดสอบเสถียรภาพการโค้งงอของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบโค้งงอได้ [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 พอลิไวนิลคาร์บาโซล หรือ Poly (9-vinylcarbazole) (PVK)

พอลิไวนิลคาร์บาโซล หรือ Poly (9-vinylcarbazole) (PVK) ถือเป็นวัสดุพอลิเมอร์อินทรีย์ ที่มีคุณสมบัติเด่นคือการเคลื่อนที่ของโฮล (hole transport) [25] ซึ่งได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และออปติกส์ [26,27] ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิไวนิลคาร์บาโซล มีระดับพลังงาน HOMO และ LUMO ประมาณ 5.5 และ 2 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ [28,29] โดยลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคาร์บาโซลแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลคาร์บาโซล

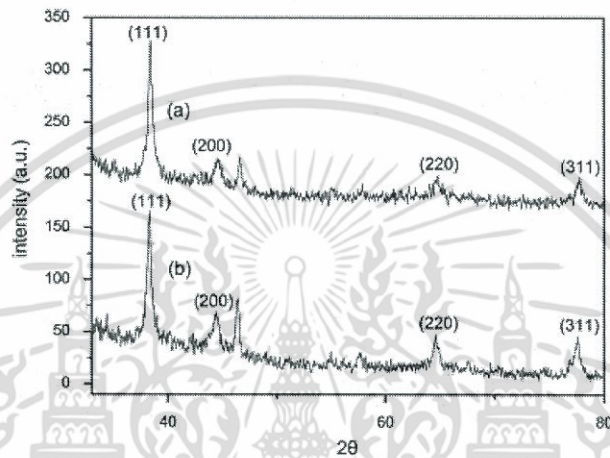
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของ PVK ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

related categories	Hole Transport (HT) & Hole Injection Layer (HIL) Materials, Hole Transport Materials, Host Materials, Materials Science, OLED and PLED Materials, Organic and Printed Electronics, Phosphorescent Host Materials
form	powder
mol wt	average Mw ~1,100,000
refractive index	n _{20/D} 1.683
transition temp	T _g 220 °C
density	1.2 g/mL at 25 °C(lit.)
Orbital energy	HOMO 5.5-5.8 eV LUMO 2.0-2.2 eV

2.11 อนุภาคนาโนเงิน [30]

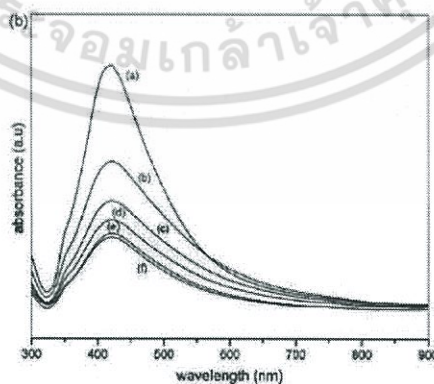
อนุภาคนาโนเงินเป็นอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่มอนุภาคนาโนโลหะ อนุภาคนาโนเงินปัจจุบันได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอนุภาคนาดังกล่าวมีคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์ สามารถนำไปใช้สำหรับฆ่าเชื้อและผลิตเครื่องมือสำหรับการผ่าตัด [31] ทางอุตสาหกรรมใช้อนุภาคนาโนเงินเป็นสารเร่งปฏิกิริยา [32] นอกจากนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วยังสามารถนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [33] จากรายงานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาถึงโครงสร้างอนุภาคนาโนเงิน จะพบว่าโครงสร้างที่สำคัญ คือ โครงสร้างแบบคิวบิก (Cubic structure) โดย Yusheng Liu และคณะ [34] ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินขนาด 6-30 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค gamma radiation อนุภาคนาโนเงินที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก เฟสเซนเตอร์ บนระนาบ (111), (200), (220) และ (311) ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคนาโนเงิน [34]

สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งได้แก่สมบัติทางแสงโดย S.L. Smitha และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาถึงการเกิดปรากฏการณ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนเงิน โดยในการทดลองพบว่าสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนเงินจะมีช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 300-600 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนเงินที่ปริมาณอัตราส่วนของโพแทสเซียมคลอไรด์ต่างๆ กัน [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การทบทวนวรรณกรรม

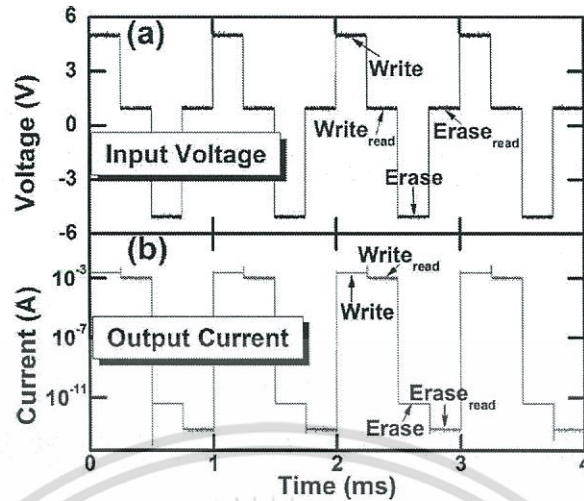
ในช่วงที่ผ่านมาการศึกษาอุปกรณ์หน่วยความจำนั้นได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาโครงสร้าง วัสดุ หรือกลไกในการเปลี่ยนสถานะดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น สำหรับตัวอย่างที่น่าสนใจและสอดคล้องกับการวิจัยนี้ มีดังนี้

ในปี ค.ศ. 2015 D.Y.Yun และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะจากวัสดุประกอบโดยใช้อนุภาคนาโน $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) ผสมกับพอลิเมอร์ polymethyl methacrylate (PMMA) ซึ่งได้หน่วยความจำที่มีคุณสมบัติเป็นประเภท nonvolatile ที่สามารถเขียนข้อมูลซ้ำได้ โดยหน่วยความจำประเภท nonvolatile นี้คือหน่วยความจำที่สามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยงวงจร โดยกลไกที่ทำให้เกิดลักษณะของหน่วยความจำขึ้นได้คือการดักจับประจุจากอนุภาคนาโนนาโนของ CZTS โดยที่สามารถให้ค่าอัตราส่วน ON/OFF ได้มากถึง 10^3 สำหรับโครงสร้างและวิธีการเตรียมอุปกรณ์หน่วยความจำแสดงดังรูปที่ 2.19 และลักษณะการเขียนข้อมูลซ้ำแสดงดังรูปที่ 2.20



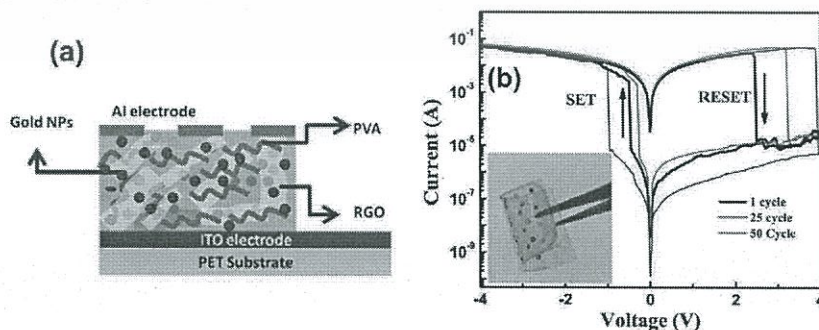
รูปที่ 2.19 โครงสร้างและวิธีการเตรียมอุปกรณ์หน่วยความจำจากอนุภาคนาโน CZTS [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเขียน-ลบข้อมูลซ้ำ [36]

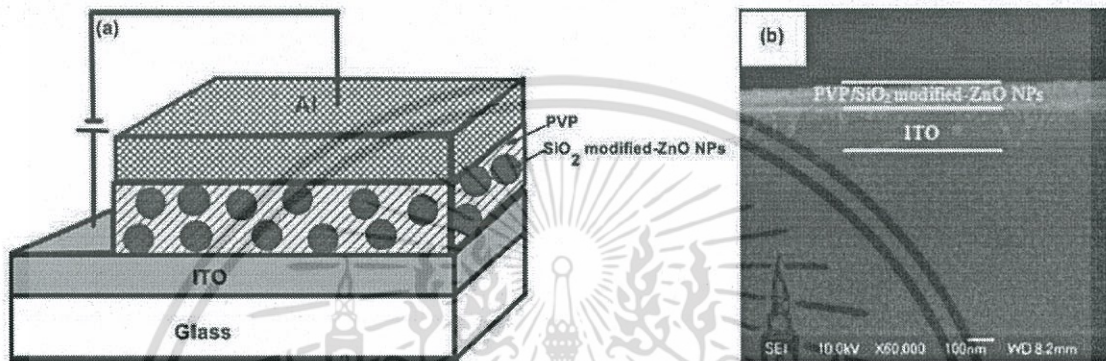
ในปี ค.ศ. 2015 A. Midya และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาอุปกรณ์หน่วยความจำจากวัสดุประกอบระหว่างอนุภาคนาโนทองและกราฟีนออกไซด์ใน polyvinyl alcohol หรือ PVA สำหรับจุดเด่นในงานวิจัยของ Midya และคณะคือ อุปกรณ์หน่วยความจำที่โปร่งแสงและสามารถโค้งงอได้ และกลไกในการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำจะเป็นกลไกที่เกิดจากการดักจับประจุในอนุภาคนาโนทองและกลไกที่เกิดจากเส้นใยขนาดเล็กหรือที่เรียกว่า filament โดยเส้นใยขนาดเล็กนี้จะเป็นช่องทางเดินกระแสที่มีปัจจัยการเกิดได้หลายอย่าง เช่น เกิดขึ้นได้จากการจัดเรียงตัวของออกซิเจนในชั้นทำงาน เกิดจากตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เอง และปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้จะแตกต่างจากการดักจับประจุ กล่าวคือประจุสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นใยขนาดเล็กได้อย่างต่อเนื่องจากขั้วไฟฟ้าหนึ่งไปอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งได้ทันที ถึงแม้ว่าลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าจะเหมือนกันกับการดักจับประจุ แต่กลไกที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษากลไกในการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำจึงเป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน โดยโครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำและสมบัติทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.21



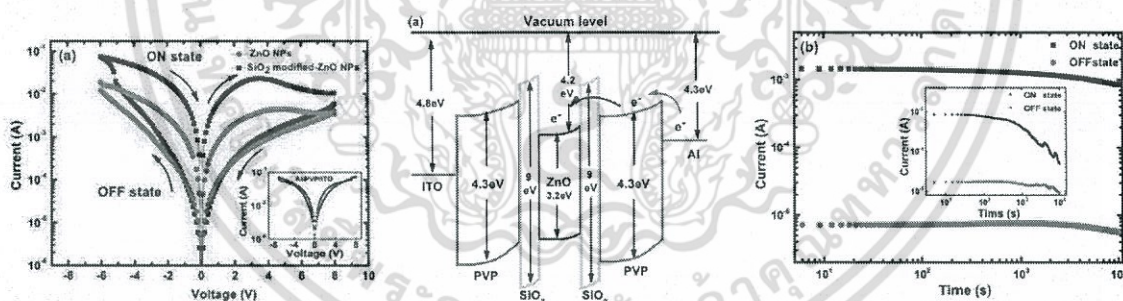
รูปที่ 2.21 โครงสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำและสมบัติทางไฟฟ้า [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 2014 Q. Shi และคณะ [38] ได้ศึกษาโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้างของวัสดุประกอบระหว่างอนุภาคนาโนซิงออกไซด์ (ZnO) ในพอลิเมอร์ poly-4-vinyl-phenol หรือ PVP จุดเด่นของโครงสร้างนี้คืออนุภาคนาโนเล็กของ ZnO ที่ถูกเคลือบไว้บาง ๆ ด้วยออกไซด์ของซิลิคอน (SiO₂) หรือที่เรียกว่าอนุภาคนาโนแบบ core-shell โดยโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.22 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ และภาพตัดขวางจากกล้อง SEM [38]



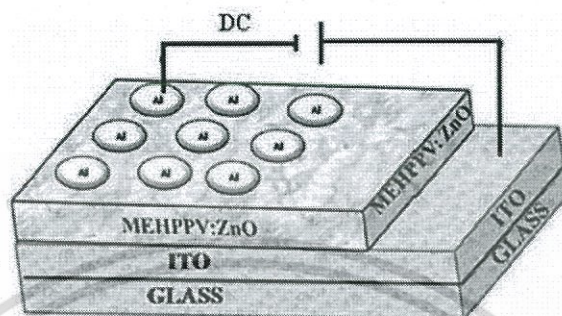
รูปที่ 2.23 สมบัติทางไฟฟ้า กลไกการเกิด และความเสถียรของอุปกรณ์ระยะยาว [38]

โดยกลไกการเกิดลักษณะของหน่วยความจำเป็นผลมาจากการดักจับประจุในตัว core-shell ที่เกิดจาก ZnO กับ SiO₂ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะและกลไกการเกิดแสดงดังรูปที่ 2.23 ถึงแม้ว่าค่าอัตราส่วน ON/OFF ของโครงสร้างดังกล่าวจะมีค่าไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ก่อนหน้านี้ แต่สิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งคือ ความเสถียรของอุปกรณ์ระยะยาว

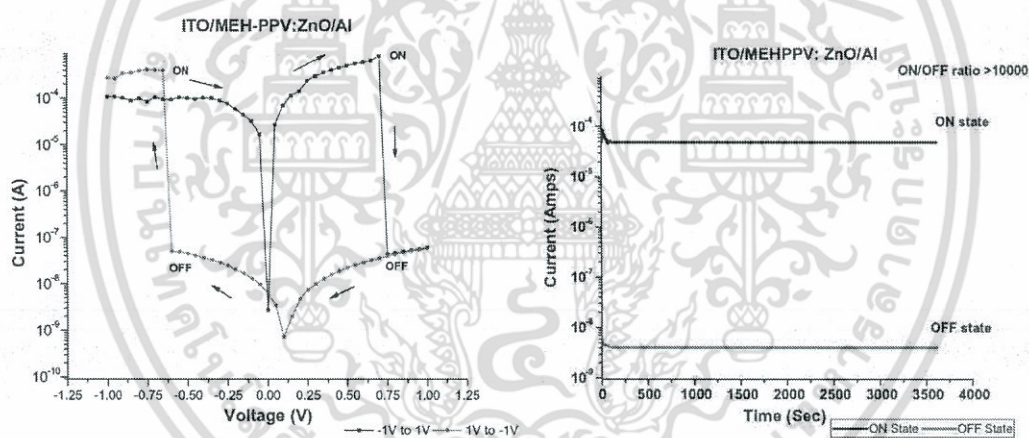
อีกหนึ่งงานวิจัยที่น่าสนใจที่ใช้หลักการหมุนเคลือบคืองานวิจัยของ CH.V.V. Ramana และคณะ [39] ในปี ค.ศ. 2013 โดยใช้วัสดุประกอบระหว่างพอลิเมอร์ poly-[2-methoxy-5-(20-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] หรือ MEHPPV กับ ZnO โครงสร้างดังรูปที่ 2.24 จุดเด่นที่สำคัญของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี่คือใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมากโดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในการเขียนหรือลบข้อมูลน้อยกว่า 1 V และใช้แรงดันในการอ่านข้อมูลเพียง 0.2 V แสดงดังรูปที่ 2.25



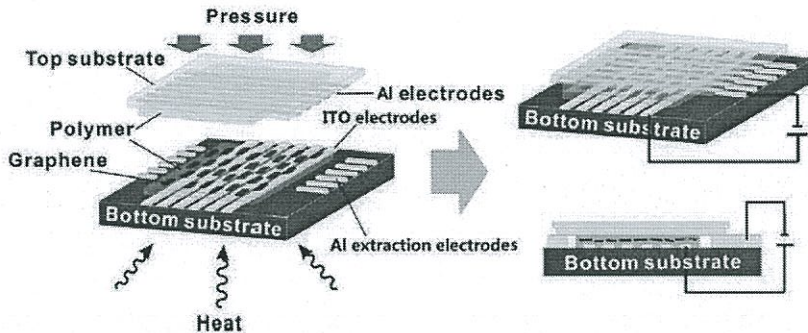
รูปที่ 2.24 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ [39]



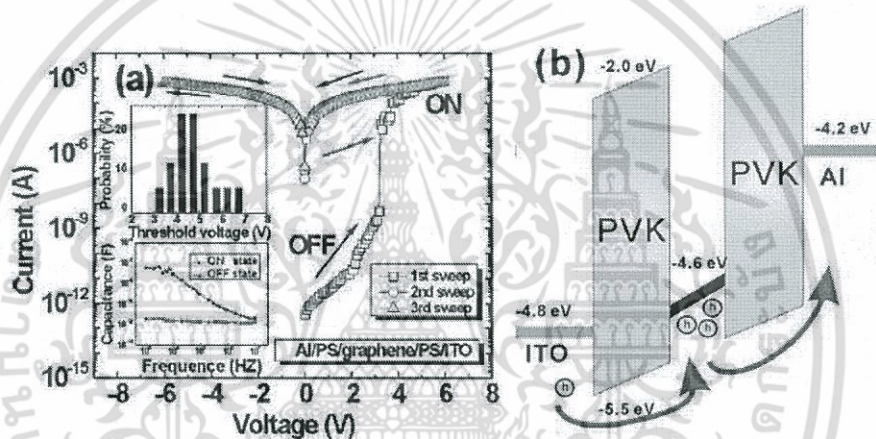
รูปที่ 2.25 สมบัติทางไฟฟ้า และการอ่านข้อมูลระยะยาว [39]

สำหรับพอลิเมอร์ PVK ในโครงการวิจัยนี้ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับอุปกรณ์หน่วยความจำ ตัวอย่างเช่นในปี ค.ศ. 2012 C. Wu และคณะ [27] ได้ใช้ PVK ในโครงสร้างสามชั้น โดยใช้กราฟีนออกไซด์แทรกอยู่ระหว่างชั้น PVK และประกบด้วยขั้วไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการสร้างแบบเดียวกับกระจกนิรภัยหรือที่เรียกว่ากระบวนการ laminated แสดงดังรูปที่ 2.26 และจากงานวิจัยพบว่าอุปกรณ์ได้แสดงค่าอัตราส่วน ON/OFF ที่สูงโดยลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเกิดแสดงดังรูปที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



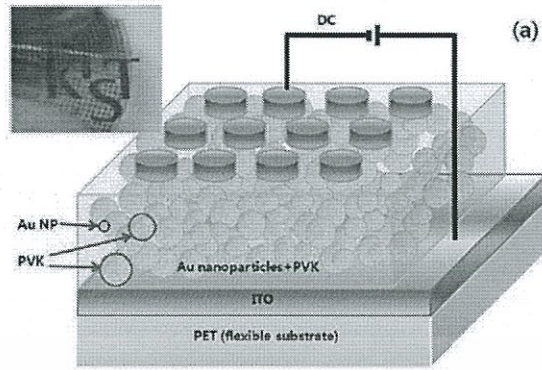
รูปที่ 2.26 กระบวนการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำด้วยวิธี laminated [40]



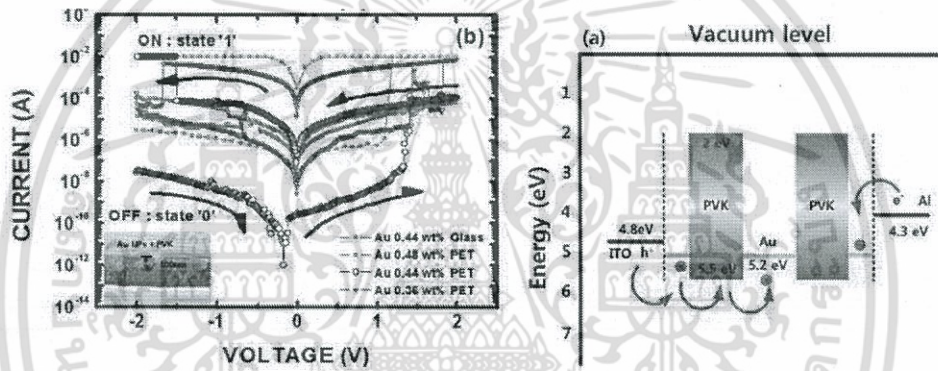
รูปที่ 2.27 สมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเกิดของอุปกรณ์หน่วยความจำ [40]

สำหรับงานวิจัยชิ้นสุดท้ายที่จะยกตัวอย่างนี้ยังคงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจ นั่นคือการใช้วัสดุประกอบระหว่างอนุภาคนาโนท่อนกับ PVK ซึ่งเป็นงานวิจัยในปี ค.ศ. 2011 ของ D.I. Son และคณะ [41] โดยเป็นการสร้างบนฐานรองรับพลาสติกที่สามารถโค้งงอได้แสดงดังรูปที่ 2.28 แต่อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดคุณสมบัติของหน่วยความจำก็ยังคงเป็นการดักจับประจุของอนุภาคนาโนท่อน ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวสามารถปรับค่าอัตราส่วน ON/OFF และค่าแรงดันในการเขียนข้อมูลได้จากความเข้มข้นของอนุภาคนาโนท่อนที่อยู่ในชั้นฟิล์มบางพอลิเมอร์ PVK โดยที่สมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเกิดของอุปกรณ์หน่วยความจำแสดงดังรูปที่ 2.29 และจากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำมาเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ลักษณะโครงสร้างและภาพถ่ายของอุปกรณ์ [41]



รูปที่ 2.29 สมบัติทางไฟฟ้าและกลไกการเกิดของอุปกรณ์หน่วยความจำ [41]

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบภาพรวมของงานวิจัยที่ผ่านมาของอุปกรณ์หน่วยความจำ

วัสดุ	โครงสร้าง	กลไกการเกิด	ON/O FF	การสร้าง	จุดเด่น	ผู้ศึกษา
วัสดุประกอบ PMMA:CZTS	1 ชั้น ระหว่างขั้วไฟฟ้า	การดักจับ ประจุ	$>10^9$	หมุนเคลือบ	ON/OFF สูง	[36] ค.ศ. 2015
วัสดุประกอบ PVA:Au	1 ชั้น ระหว่างขั้วไฟฟ้า	การดักจับ ประจุ + เส้นใยขนาด เล็ก	$>10^3$	หมุนเคลือบ	โปร่งแสง + โค้งงอได้	[37] ค.ศ. 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ	โครงสร้าง	กลไกการเกิด	ON/OFF	การสร้าง	จุดเด่น	ผู้ศึกษา
วัสดุประกอบ PVP:ZnO (ZnO-SiO ₂ core-shell)	1 ชั้น ระหว่างขั้วไฟฟ้า	การดักจับประจุ	$\sim 10^3$	หมุนเคลือบ	ใช้อุณหภูมิแบบเปลือกหอย (core-shell nanoparticles)	[38] ค.ศ. 2014
วัสดุประกอบ MEHPPV:ZnO	1 ชั้น ระหว่างขั้วไฟฟ้า	การดักจับประจุ	$> 10^4$	หมุนเคลือบ	ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (<1V)	[39] ค.ศ. 2013
PVK/graphene	โครงสร้างสามชั้น ระหว่างขั้วไฟฟ้า PVK/grapheme/PVK	การดักจับประจุ	$> 10^7$	หมุนเคลือบ + การ laminated	วิธีการสร้าง (การ laminated) ON/OFF สูง	[40] ค.ศ. 2012
วัสดุประกอบ PVK:Au	1 ชั้น ระหว่างขั้วไฟฟ้า	การดักจับประจุ	$> 10^6$	หมุนเคลือบ	โค้งงอได้	[41] ค.ศ. 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยสำหรับการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

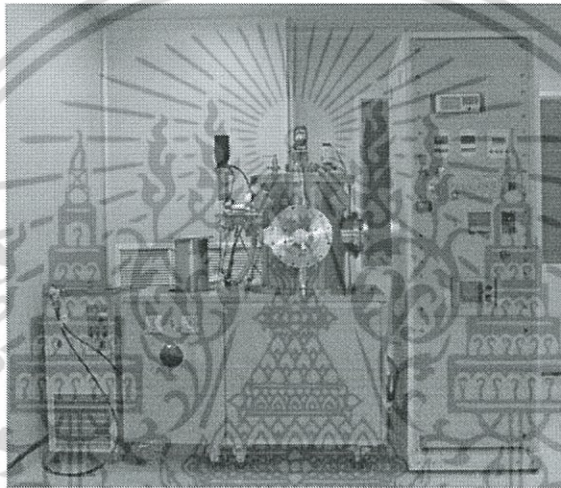
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือ ที่ใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำและเพื่อใช้ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs (vary %wt)/Al ที่อัตราการมีอยู่ของ Ag NPs ต่างกัน ตรวจสอบสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์กลไกในการเคลื่อนที่ของพาหะ แล้วทำการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้เพื่อทำการหาเงื่อนไขของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PVK:Ag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NPs จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับ PEN/ITO ซึ่งโค้งงอได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้

3.1 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

ระบบระเหยสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยระบบจะถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถระเหยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับระเหยขี้ไฟฟ้าอลูมิเนียม



รูปที่ 3.2 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

3.2 ระบบเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ



รูปที่ 3.3 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยการหมุนเคลือบดังรูปที่ 3.3 เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการเคลือบฟิล์มบางที่มีความหนาตั้งแต่ระดับนาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร จากสารตั้งต้นที่มีลักษณะเป็นของเหลวลงบนแผ่นฐานรองรับ ซึ่งแผ่นฐานรองรับจะติดอยู่บนแกนของมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบค่าหนึ่งซึ่งระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าความเร็วรอบถึง 10,000 rpm โดยในขณะที่ทำการหมุน ของเหลวส่วนเกินจะถูกเหวี่ยงออกไปจากแผ่นฐานรองรับ เกิดเป็นชั้นฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอเกิดขึ้น

3.3 กระบวนการกัดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ (ITO)

เป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อกัด (etching) ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บางส่วนที่ไม่ต้องการออกจากแผ่นฐานรองรับเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของขั้วไฟฟ้า โดยส่วนที่เหลือจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด โดยมีวิธีการดังนี้

- ปิดแผ่นหน้ากากลงบนแผ่นฐานรองรับในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดออกดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผ่นฐานรองรับ ITO ที่ถูกปิดด้วยหน้ากาก (แถบดำหมายถึงบริเวณที่เป็นหน้ากาก)

- นำแผ่นฐานรองรับดังกล่าวไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กับสารละลายกรดไนตริก (HNO₃) ในอัตราส่วน 3:1 เป็นเวลา 15 นาที เพื่อทำการกัด ITO ออก
- นำแผ่นฐานรองรับที่ได้ละลายเรียบร้อยแล้วไปล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (DI water) เพื่อทำการล้างสารละลายกรดออก

3.4 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

ก่อนที่จะทำการเตรียมฟิล์มบาง PVK:Ag NPs บนฐานรองรับจะมีขั้นตอนการทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ฝุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนบนพื้นผิว โดยขั้นตอนการทำความสะอาดแบ่งได้เป็น

3.4.1 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกเคลือบ ITO

1. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 20 นาที
2. ล้างด้วยอะซิโตน (acetone: CH₃COCH₃) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที
3. ล้างด้วยเมทานอล (methanol: CH₃OH) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที
4. ล้างด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanol: (CH₃)₂CHOH) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที และเป่าให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ PEN

1. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 20 นาที
2. ล้างด้วยเมทานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที
3. ล้างด้วยไอโซโพรพานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที และเป่าให้แห้ง

3.5 การเตรียมสารประกอบระหว่าง PVK:Ag NPs

ขั้นตอนแรกทำการละลาย PVK ในสารละลาย chlorobenzene ในอัตราส่วนระหว่าง PVK ต่อสารละลายคือ 30 mg/ml ในเครื่องอัลตราโซนิก หลังจากนั้นทำการใส่อนุภาคนาโนเงินลงไปโดยมีเงื่อนไขดังนี้

PVK:Ag NPs (2 wt%)

PVK:Ag NPs (4 wt%)

PVK:Ag NPs (6 wt%)

PVK:Ag NPs (8 wt%)

PVK:Ag NPs (10 wt%)

3.6 การสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำด้วยวิธีการหมุนเคลือบ

3.6.1 การสร้างชั้นฟิล์มบาง PVK:Ag NPs

อุปกรณ์หน่วยความจำจะประกอบไปด้วยชั้นทำงานซึ่งก็คือ PVK:Ag NPs ที่มีอัตราส่วนของ Ag NPs แตกต่างกัน โดยมีเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มคือที่ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการระเหยชั้นไฟฟ้าอลูมิเนียมให้มีความหนา 100 นาโนเมตร โดยมีโครงสร้างดังต่อไปนี้

- ITO / PVK:Ag NPs 2wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 4wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 6wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 8wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 10wt% /Al 100 nm

3.6.2 การระเหยชั้นไฟฟ้าด้านบนด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

นำฐานรองรับที่ทำการเตรียมชั้น PVK:Ag NPs เสร็จแล้ว มาทำการระเหยชั้นไฟฟ้าอลูมิเนียมเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยชั้นอลูมิเนียมมาติด แสดงดังรูปที่ 3.5

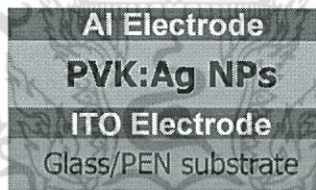


รูปที่ 3.5 ลักษณะหน้ากากสำหรับระเหยอลูมิเนียม (แถบดำหมายถึงบริเวณที่เป็นหน้ากาก) (ก) บนฐานรองรับพลาสติก (ข) บนฐานรองรับกระจก

ทำการระเหยขั้วไฟฟ้า Al ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลุก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยอยู่ในช่วง 1-2 nm/s
- ความหนา 100 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว จะมีพื้นที่ทำงาน 2 ตารางมิลลิเมตรซึ่งเกิดจากการตัดกันระหว่างขั้วไฟฟ้า ITO ด้านล่างกับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านบน โดยโครงสร้างในลักษณะภาพตัดขวางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 จากนั้นนำอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบชั้นเดียว

3.7 การศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านต่าง ๆ

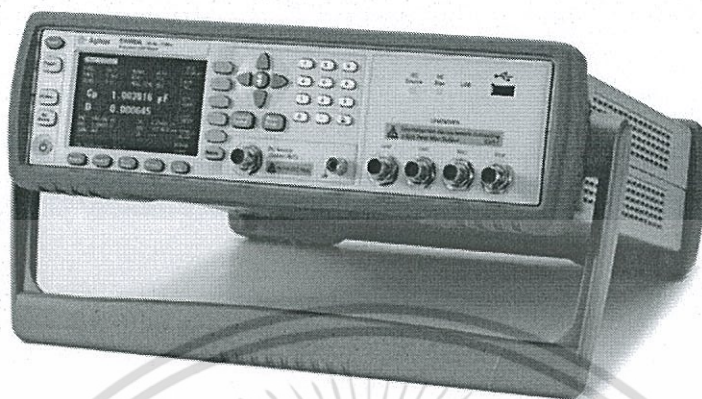
3.7.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ ด้วยระบบวัดทางไฟฟ้าในที่มืด ซึ่งจัดเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่อง Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter ดังรูปที่ 3.7 สำหรับการตรวจวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ และชุดทดสอบความสามารถในการ อ่าน-เขียนของอุปกรณ์โดย Keithley 2410 ดังรูปที่ 3.8 เพื่อทำการตรวจวัด

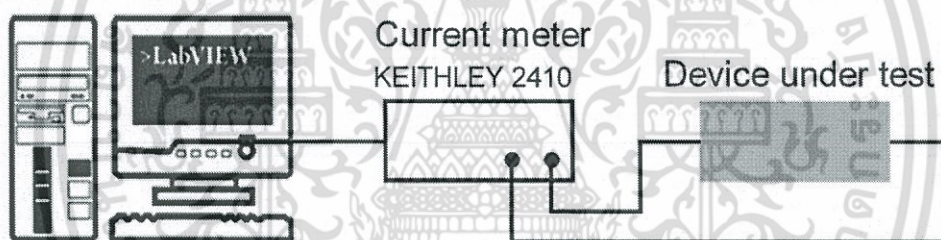
- กระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เสถียรภาพของตัวอุปกรณ์



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้า Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter [62]

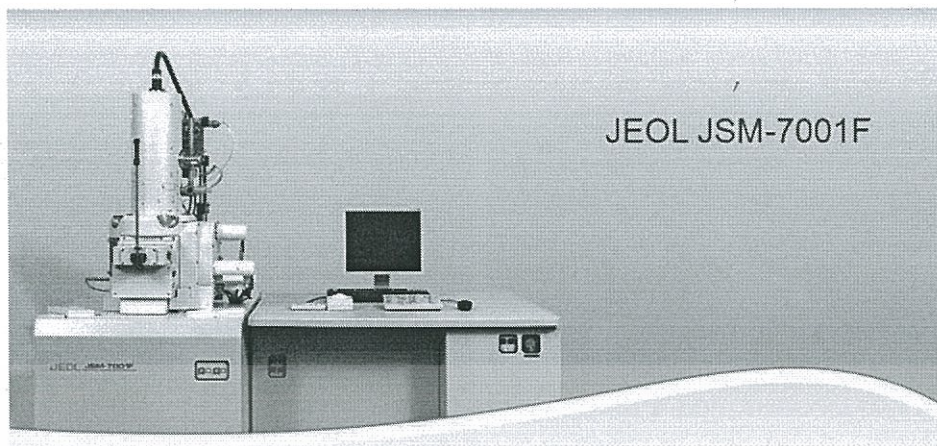


รูปที่ 3.8 ชุดทดสอบความสามารถในการ อ่าน-เขียน และเสถียรภาพของอุปกรณ์

3.7.2 กล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดถูกใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างกันอย่างกว้างขวาง โดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวดตัวอย่างแล้วแสดงภาพที่ได้จากสัญญาณของที่ได้รับจากอัตรกิริยาของอิเล็กตรอนที่พื้นผิว มีกำลังขยายตั้งแต่ 10-300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง หลักการทำงานคืออันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) และทำการตรวจวัดสัญญาณโดยตัวตรวจวัดสัญญาณ หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างเป็นภาพ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดที่ใช้ในการตรวจวัดเป็นเครื่องของบริษัท JEOL รุ่น JSM-7001F ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ซึ่งมีกำลังขยายที่มากกว่า SEM ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโนได้

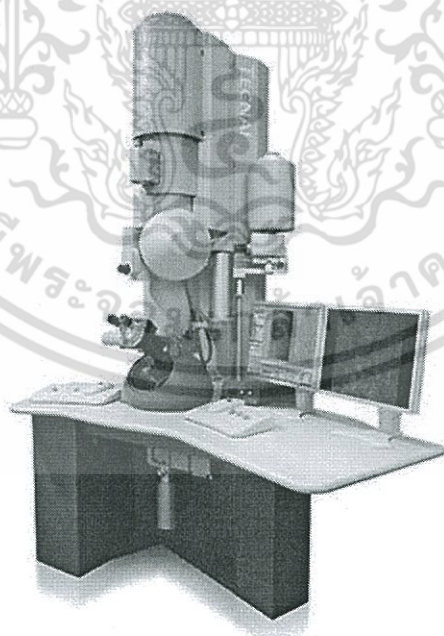
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดรุ่น JSM-7001F

3.7.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านได้ถูกใช้ในการพิจารณาลักษณะองค์ประกอบภายในตลอดจนโครงสร้างอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาตัวอย่างที่มีความบาง ซึ่งจะให้รายละเอียดที่สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจจจายรายละเอียดสูงมาก สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่ใช้ในการตรวจวัดเป็นเครื่องของบริษัท Philips รุ่น TECNAI 20



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านรุ่น TECNAI 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การทดสอบสมบัติการโค้งงอ

สำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมจะถูกนำมาสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับที่โค้งงอได้ ซึ่งจะมีการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับอุปกรณ์ที่สร้างบนฐานรองรับระจก แต่จะมีการตรวจวัดสมบัติความโค้งงอของอุปกรณ์เพิ่มเติมเข้ามา โดยชุดเครื่องมือทดสอบได้จัดเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ชุดทดสอบสมบัติการโค้งงอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้น โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับพลาสติก

โดยในส่วนของ การวิเคราะห์ผลการทดลองได้ทำการศึกษาสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อที่จะสามารถอธิบายถึงกลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะและกลไกการนำกระแสของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

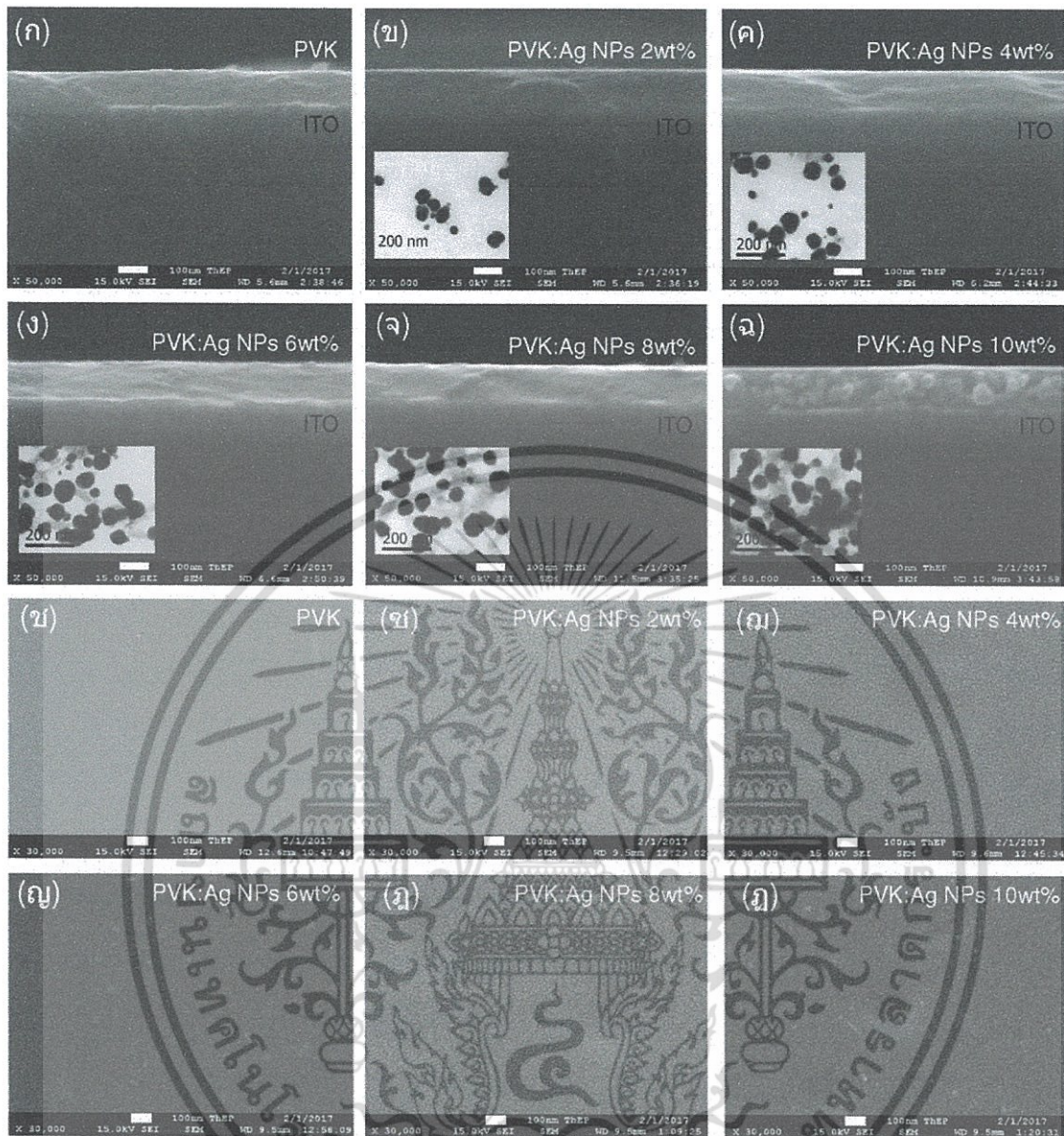
4.1 อุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก โดยเริ่มจากการเตรียมฐานรองรับกระจกเคลือบ ITO หลังจากนั้นทำการเตรียมชั้นวัสดุประกอบ PVK:Ag NPs ด้วยวิธีการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 60 วินาที และมีหัวแคโทดที่เป็นโลหะอลูมิเนียมที่มีความหนา 100 นาโนเมตรด้านบน

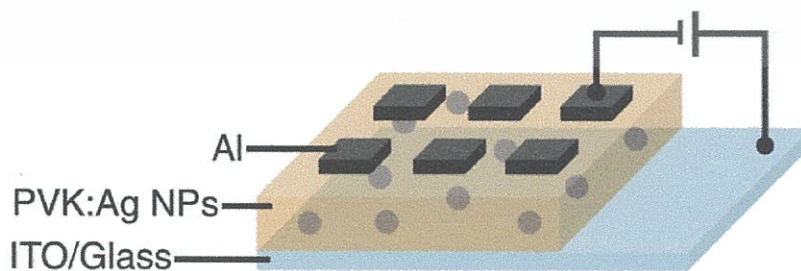
ซึ่งความหนาของชั้นวัสดุประกอบและลักษณะการกระจายตัวในสารละลายของอนุภาคนาโนเงินที่อัตราส่วนต่างๆ ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 ในขณะที่โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยมีโครงสร้างที่ทำการศึกษาดังนี้

- ITO / PVK:Ag NPs 2wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 4wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 6wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 8wt% /Al 100 nm
- ITO / PVK:Ag NPs 10wt% /Al 100 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 (ก-ฉ) ความหนาของชั้นวัสดุประกอบ PVK:Ag NPs ที่อัตราส่วนต่างกัน ภาพแทรก: ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินที่อัตราส่วนต่างกัน และ (ข-ง) ลักษณะพื้นผิวของชั้น PVK:Ag NPs

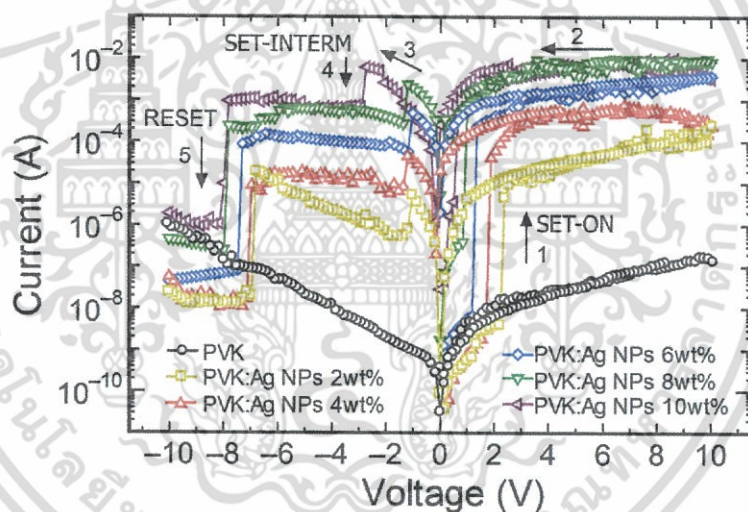


รูปที่ 4.2 โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1(ก-ฉ) จะพบว่า หลังจากทำการหมุนเคลือบบนฐานรองรับกระจกแล้ว อัตราส่วนผสมของอนุภาคนาโนเงิน 2-8 wt% ไม่มีการแสดงลักษณะของอนุภาคให้เห็นในภาพตัดขวาง อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วน 10 wt% อนุภาคนาโนเงินถูกพบได้ชัดเจน โดยจุดประสงค์หลักสำหรับการตรวจวัดภาพตัดขวางคือการวิเคราะห์ค่าความหนา ซึ่งที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนต่างกันมีความหนาที่ใกล้เคียงกันดังนั้นข้อมูลความหนาจะใช้เพื่อยืนยันสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำมาจากการมีอยู่ของอนุภาคนาโนเงิน ไม่ใช่เป็นผลที่เกิดจากความหนาที่ต่างกัน เนื่องจากมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลจากความหนาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติหน่วยความจำ [1-7] สำหรับภาพ TEM แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินในสารละลาย PVK ในขณะที่ลักษณะพื้นผิวของชั้น PCK:Ag NPs จากภาพ FESEM ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1(ช-ฎ) มีลักษณะพื้นผิวที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเงินสม่ำเสมอ

4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก



รูปที่ 4.3 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจกที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงินต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจกแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยในการวัดค่ากระแสกับความต่างศักย์จะทำการป้อนค่าความต่างศักย์จาก 0 ถึง +10 โวลต์ และ +10 ถึง -10 โวลต์ โดยในส่วนของโครงสร้างที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไม่แสดงสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำออกมาให้เห็น แต่เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งเมื่อมีการคงอยู่ของอนุภาคนาโนเงินอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้แสดงสมบัติการเปลี่ยนสถานะความนำไฟฟ้าออกมา จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าสถานะเริ่มต้นของอุปกรณ์นั้น ตัวอุปกรณ์ทุกอัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงินจะมีสถานะความนำทางไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งก็คือสถานะปิด (OFF-state) ของอุปกรณ์ โดย

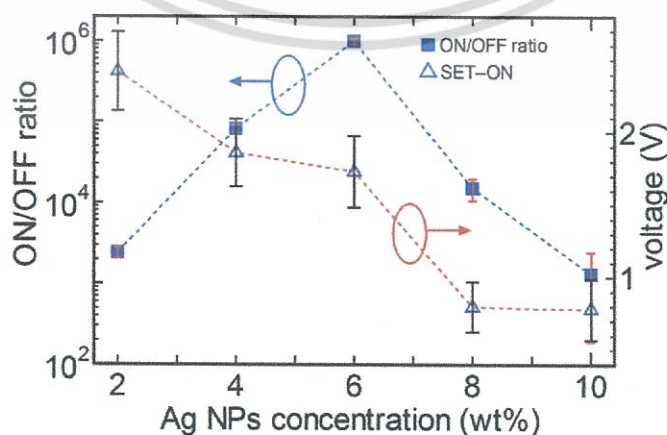
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดั่งเส้นที่ 1 ในรูปที่ 4.3 แต่เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้อุปกรณ์เพิ่มขึ้นถึงค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มหรือแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage, V_{th} หรือ setting voltage, SET-ON) การฉีดกระแสในตัวอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเปลี่ยนเป็นการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งก็คือสถานะเปิด (O-state) ของอุปกรณ์ โดยแสดงดั่งเส้นที่ 2 ในรูปที่ 4.3 โดยตลอดการป้อนแรงดันที่ลดลงอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะยังคงรักษาสถานะเปิดไว้ได้

สำหรับการป้อนแรงดันย้อนกลับจะพบว่า จากแรงดัน 0 ถึง -10 โวลต์ ค่าความนำจะยังคงถูกรักษาไว้จนกระทั่งแรงดันถูกป้อนไปจนถึงค่าแรงดันเปลี่ยนสถานะกลาง (SET-INTERM) อุปกรณ์ โดยแสดงดั่งเส้นที่ 4 ในรูปที่ 4.3 และเมื่อมีการป้อนแรงดันที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าเปลี่ยนสถานะปิดของอุปกรณ์ ค่าความนำจะเปลี่ยนจากสถานะ SET-INTERM ไปเป็นสถานะ OFF-state อย่างรวดเร็ว โดยแสดงดั่งเส้นที่ 5 ในรูปที่ 4.3

จากผลการทดลองดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถประพฤติตัวเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำได้ อีกทั้งยังสามารถแสดงลักษณะของหน่วยความจำแบบสามสถานะออกมาได้อย่างชัดเจน จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าอุปกรณ์ที่มีอัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงินต่างกันก็จะให้ค่าความต่างระหว่างอัตราส่วนของค่าสถานะ ON/OFF ON/INTERM และ INTERM/OFF แตกต่างกัน

จากข้อมูลในรูปที่ 4.3 ได้ถูกนำมาเสนอเพื่อให้เห็นผลกระทบของอนุภาคนาโนที่อัตราส่วนต่างๆ เช่น ผลของค่าอัตราส่วน ON/OFF (เก็บข้อมูลที่แรงดัน -0.5 V) และค่าแรงดันในการเขียนข้อมูล (SET-ON) โดยข้อมูลทั้งหมดแสดงในรูปที่ 4.4 จะพบว่าค่าอัตราส่วน ON/OFF จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงินเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันที่อัตราส่วนอนุภาคนาโนเงิน 8 wt% ค่าอัตราส่วน ON/OFF จะลดลง เนื่องจากค่าความนำในสถานะ OFF เพิ่มขึ้น (เห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.3) โดยการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสในสถานะ ON เป็นผลมาจากการคงอยู่ของอนุภาคนาโนเงินที่อยู่ใกล้ชิดกัน ซึ่งจะส่งผลให้เกิเส้นทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ต่อเนื่องเป็นผลให้เกิดค่าความนำที่สูงขึ้น [42] โดยจากผลการทดลองนี้ ได้แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงิน 6 wt% มีค่าอัตราส่วน ON/OFF สูงที่สุด ดังนั้นจึงได้ใช้โครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al เป็นโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะ ซึ่งจะกล่าวถึงในตอนต่อไป

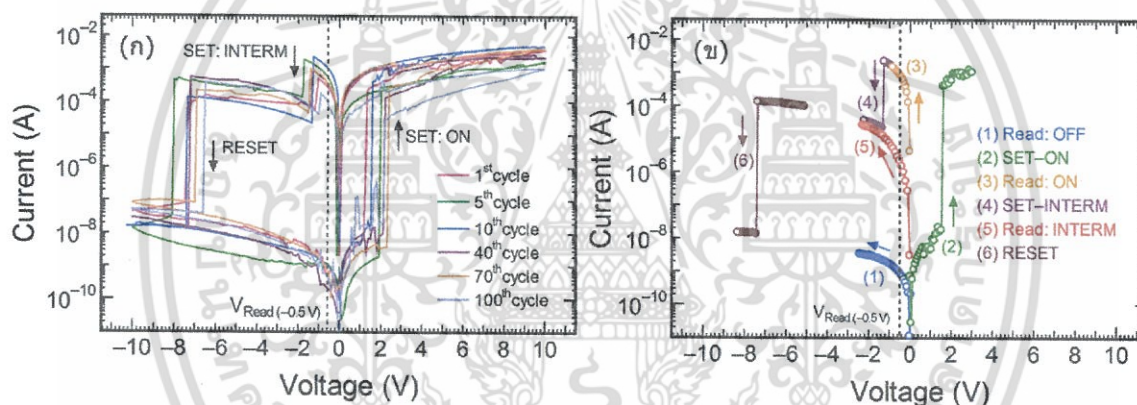


รูปที่ 4.4 ผลกระทบของอนุภาคนาโนเงินที่ส่งผลต่อค่าอัตราส่วน ON/OFF และค่า SET-ON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าซ้ำของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้างที่เหมาะสม (ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al)

เพื่อศึกษาความสามารถในการทำซ้ำของอุปกรณ์หน่วยความจำที่มีโครงสร้างที่เหมาะสม กับความสามารถในการทำซ้ำอย่างต่อเนื่องที่ 100 ครั้ง ได้แสดงในรูปที่ 4.5(ก) สำหรับในการทำซ้ำนี้ อุปกรณ์จะถูกป้อนแรงดันจาก 0 V ไป +10 V ไป -10 V และไป 0 V เพื่อให้ครบรอบการ อ่าน-เขียน-ลบ ข้อมูลของตัวอุปกรณ์ จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอุปกรณ์มีความสามารถในการเขียน (SET ON) การเปลี่ยนเป็นสถานะกลาง (SET-INTERM) และการลบข้อมูล (RESET) ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นผลการทดลองได้ยืนยันว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นประพฤติตัวเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะ (Multilevel memory) [43-45] นอกจากนี้ในรูปที่ 4.5(ข) ได้แสดงลักษณะตัวอย่างของรอบการ “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” ของอุปกรณ์หน่วยความจำ



รูปที่ 4.5 (ก) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al ที่ได้ทำการตรวจวัดซ้ำอย่างต่อเนื่อง เส้นประในรูปแสดงถึงค่าแรงดันในการอ่านข้อมูล (V_{read}) ที่ -0.5 V (ข) ลักษณะตัวอย่างของรอบการ “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” ของอุปกรณ์หน่วยความจำ

4.1.3 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al จากค่ากระแสกับความต่างศักย์

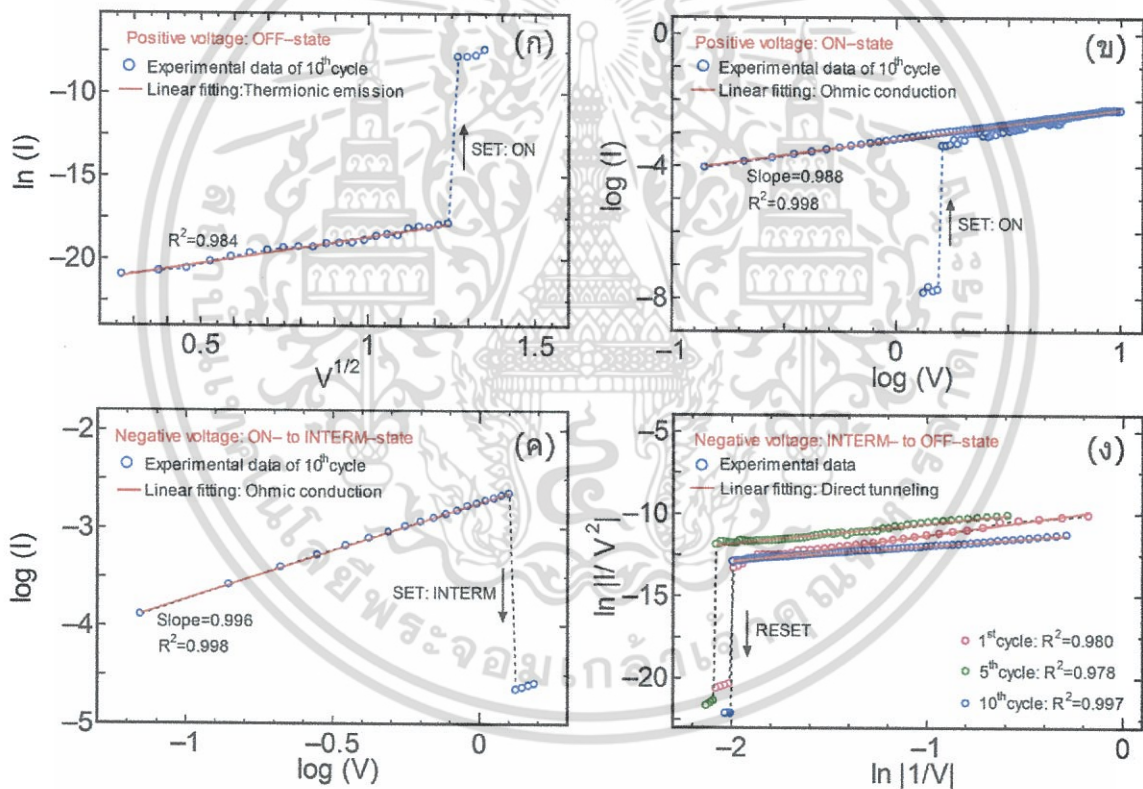
เพื่อศึกษากลไกการนำของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในรูปที่ 4.5(ก) ได้ถูกนำมาจัดรูปใหม่เพื่อให้เข้ากับสมการการนำทางไฟฟ้า ในรูปที่ 4.6(ก) แสดงการเขียนกราฟระหว่าง $\ln||I||$ กับ $V^{1/2}$ ของการสแกนซ้ำครั้งที่ 10 จากข้อมูลในรูปที่ 4.5(ก) ในช่วงแรงดันไฟฟ้าบวก (OFF-state) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความเข้ากันได้กับสมการการนำทางไฟฟ้าที่เกิดจากผลของอุณหภูมิจึงแสดงได้ดังสมการ [46,47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = T^2 \exp \left[\frac{-(\phi_b - q\sqrt{qV/4\pi\epsilon d})}{kT} \right] \quad (4.1)$$

โดยที่

- T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
 ϕ_b คือ ระดับพลังงานของกำแพงศักย์
 q คือ ค่าคงที่ประจุ
 ϵ คือ the electronic permittivity
 d คือ ความหนาของชั้นทำงาน
 k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann



รูปที่ 4.6 ข้อมูลการทดลองและข้อมูลการเทียบสมการของโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al (ก) การนำแบบ thermionic ในช่วงแรงดันบวก (OFF-state) (ข) การนำแบบ ohmic ในช่วงแรงดันบวก (ON-state) (ค) การนำแบบ ohmic ในช่วงแรงดันลบ (ON- ไปเป็น INTERM-state) และ (ง) การนำแบบ direct tunneling ในช่วงแรงดันลบ (INTERM- ไปเป็น OFF-state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการนำแบบ thermionic อิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยการฉีดประจุจากขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกดักจับภายในชั้นของ PVK:Ag NPs จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าได้ให้ไปถึงค่าแรงดันการเขียน (SET-ON) หลังจากนั้นค่าสถานะจะเปลี่ยนจากสถานะ OFF ไปเป็นสถานะ ON

รูปที่ 4.6(ข) แสดงการเขียนกราฟระหว่าง $\log(I)$ กับ $\log(V)$ ในช่วงแรงดันไฟฟ้าบวก (ON-state) ซึ่งในความสัมพันธ์เชิงเส้นได้แสดงค่าความชันเป็น 0.988 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ในช่วงสถานะ ON นี้เป็นไปตามการนำแบบโอมห์มิก จากข้อมูลนี้สามารถที่จะทำการยืนยันการนำทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ในสถานะ ON ทางฝั่งการป้อนแรงดันลบได้เป็นโอมห์มิกเช่นเดียวกันเนื่องจากมีค่าความชันที่เข้าใกล้ 1 [14,46] โดยแสดงในรูปที่ 4.6(ค)

ในสถานะ ON และ OFF ของผลการทดลองนั้นกลไกการนำสามารถวิเคราะห์ได้สอดคล้องกับทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามค่าสถานะกลาง (INTERM-state) ของอุปกรณ์มีความจำเป็นที่จะต้องอธิบายให้ชัดเจน ดังนั้นลำดับการทำซ้ำครั้งที่ 1 5 และ 10 จากข้อมูลในรูปที่ 4.5(ก) ได้ถูกนำมาเขียนกราฟเทียบกับสมการเพื่อยืนยันกลไกการนำทางไฟฟ้าในสถานะ INTERM-state ซึ่งโดยปกติที่บริเวณรอยต่อของโลหะ/สารกึ่งตัวนำ (metal/insulator contact) จะเกิดกลไกการนำได้หลายลักษณะในเวลาเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามจะมีเพียงกลไกเดียวที่ประพุดตัวเด่นที่สุดออกมา [45-47] ในรูปที่ 4.5(ง) จะพบว่าการเขียนกราฟระหว่าง $\ln(W^2)$ กับ $\ln|1/V|$ ได้แสดงลักษณะกราฟออกมาเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นไปตามการนำแบบ direct tunneling เป็นไปตามสมการที่ 4.2 [47]

$$I \propto V \exp\left(-\frac{2d\sqrt{2m^*\phi_b}}{\hbar}\right) \quad (4.2)$$

โดยที่

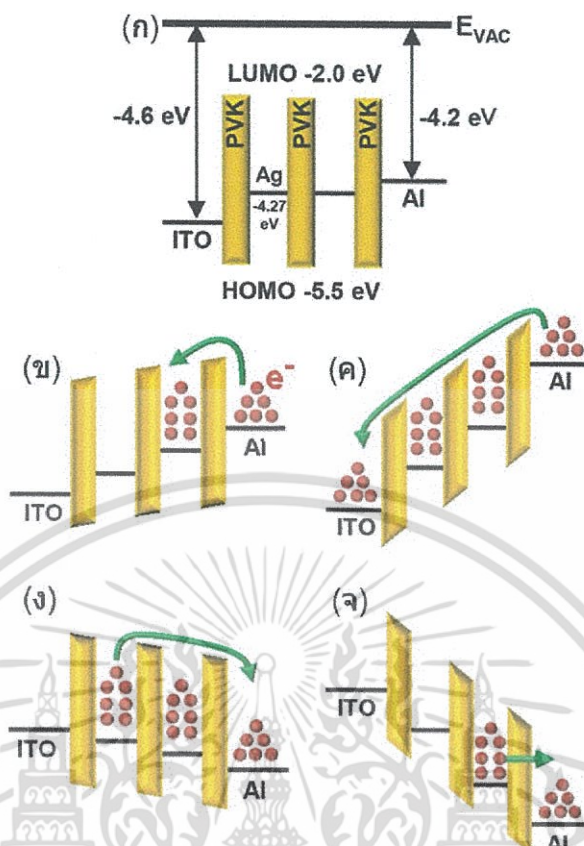
- m^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอน
- \hbar คือ ค่าคงที่ของ Planck แบบลดรูป

จากข้อมูลที่ได้พบว่าค่าความชันของเส้นตรงในรูปที่ 4.6(ง) มีค่าแตกต่างกันซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากปริมาณของอิเล็กตรอนที่เกิดการทะลุผ่าน (tunneling) ชั้นของ PVK:Ag NPs

4.1.4 กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al

จากข้อมูลการทดลอง สมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ และการเขียนกราฟให้เข้ากับสมการการนำทางไฟฟ้าทำให้ทราบว่ากลไกการนำในแต่ละช่วงแรงดันประพุดตัวอย่างไร หลังจากนั้นจะทำการนำเสนอรูปแบบการนำในลักษณะของแผนภาพระดับพลังงานเพื่อให้สามารถทำความเข้าใจได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยแผนภาพระดับพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แผนภาพแถบพลังงานที่สถานะการนำแตกต่างกัน (ก) สถานะเริ่มต้น (ข) สถานะ OFF ด้านแรงดันบวก (ค) สถานะ ON ด้านแรงดันบวก (ง) การเปลี่ยนจากสถานะ ON ไปเป็น INTERM ด้านแรงดันลบ และ (จ) การเปลี่ยนจากสถานะ INTERM ไปเป็น OFF ด้านแรงดันลบ

ระดับฟังก์ชันงานของ ITO และ Al นั้นได้รับการยอมรับอยู่ที่ -4.6 และ -4.2 eV ตามลำดับ ในขณะที่ระดับฟังก์ชันงานของ Ag จะอยู่ที่ -4.27 eV โดยการประมาณค่าจากขนาดอนุภาคตั้งสมการ [48]

$$\phi = \phi_{\infty} + \frac{1.08}{D(\text{nm})} (\text{eV}) \quad (4.3)$$

โดยที่

- ϕ_{∞} คือ ระดับฟังก์ชันงานของ Ag แบบ bulk
- D คือ ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคนาโนเงิน

และจากข้อมูลขนาดอนุภาคนาโนเงินจากผู้ผลิต (average diameter ≤ 100 nm) ซึ่งในการทดลองได้ใช้ค่า 100 nm ในการคำนวณ ดังนั้นระดับฟังก์ชันงานของ Ag จึงอยู่ที่ -4.27 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ (LUMO) และระดับพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ (HOMO) ของพอลิเมอร์ PVK มีค่าประมาณ -2.0 และ -5.5 eV ตามลำดับ ดังนั้นจากระดับพลังงานของวัสดุที่กล่าวมาทำให้ทราบได้ว่าชั้นของ PVK:Ag NPs วัสดุพอลิเมอร์ PVK จะประพฤติตัวเป็นชั้นทะลุผ่านของอิเล็กตรอนและยังเป็นชั้นที่คอยขัดขวางอิเล็กตรอนในโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้น

รูปที่ 4.7(ก) แสดงสถานะเริ่มต้นของอุปกรณ์หน่วยความจำ เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันบวก อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปในชั้น PVK:Ag NPs และอิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปมากขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น และในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปจะยังไม่สามารถทำให้เกิดกระแสไหลได้เนื่องจากอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกดักจับในชั้นของ PVK:Ag NPs จากบ่อศักย์ที่เกิดขึ้น ในกระบวนการฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้านี้อธิบายได้โดยการฉีดกระแสแบบ thermionic ในสถานะ OFF ของอุปกรณ์ โดยอิเล็กตรอนจะข้ามผ่านกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่าง โลหะ/สารกึ่งตัวนำ [46,47] ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7(ข)

เมื่อแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ระดับพลังงานจะเกิดการโค้งงอ (bending of energy bands) ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า Al เข้าไปในชั้น PVK:Ag NPs และถูกดักจับได้ง่ายยิ่งขึ้น หลังจากนั้นเมื่อให้แรงดันไปจนถึง SET-ON จะทำให้สถานะดักจับเต็ม จึงทำให้อิเล็กตรอนเป็นอิสระจากสถานะดักจับและสามารถเคลื่อนที่จนเกิดกระแสไหลได้ ซึ่งก็คือกระบวนการเขียนข้อมูลในอุปกรณ์หน่วยความจำ และในสถานะนี้อุปกรณ์จะเข้าสู่สถานะ ON ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7(ค)

หลังจากที่อุปกรณ์เข้าสู่สถานะ ON อุปกรณ์จะยังคงสถานะดังกล่าวไว้ถึงแม้ว่าจะลดแรงดันลงเนื่องจากสถานะดักจับนั้นเต็มไปด้วยอิเล็กตรอนจึงทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า Al สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างสะดวก สอดคล้องกับการนำแบบ ohmic และจากผลการทดลองทำให้ทราบว่าอุปกรณ์สามารถคงสถานะ ON ได้แม้กระทั่งหยุดป้อนแรงดัน ($V=0$ V) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติของ non-volatile memory หรือก็คืออุปกรณ์หน่วยความจำที่สามารถเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีกระแสไฟฟ้าเลี้ยงวงจร ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุพอลิเมอร์ PVK ที่ทำหน้าที่ในการกักเก็บอิเล็กตรอนไม่ให้หลุดออกมาจากบ่อศักย์

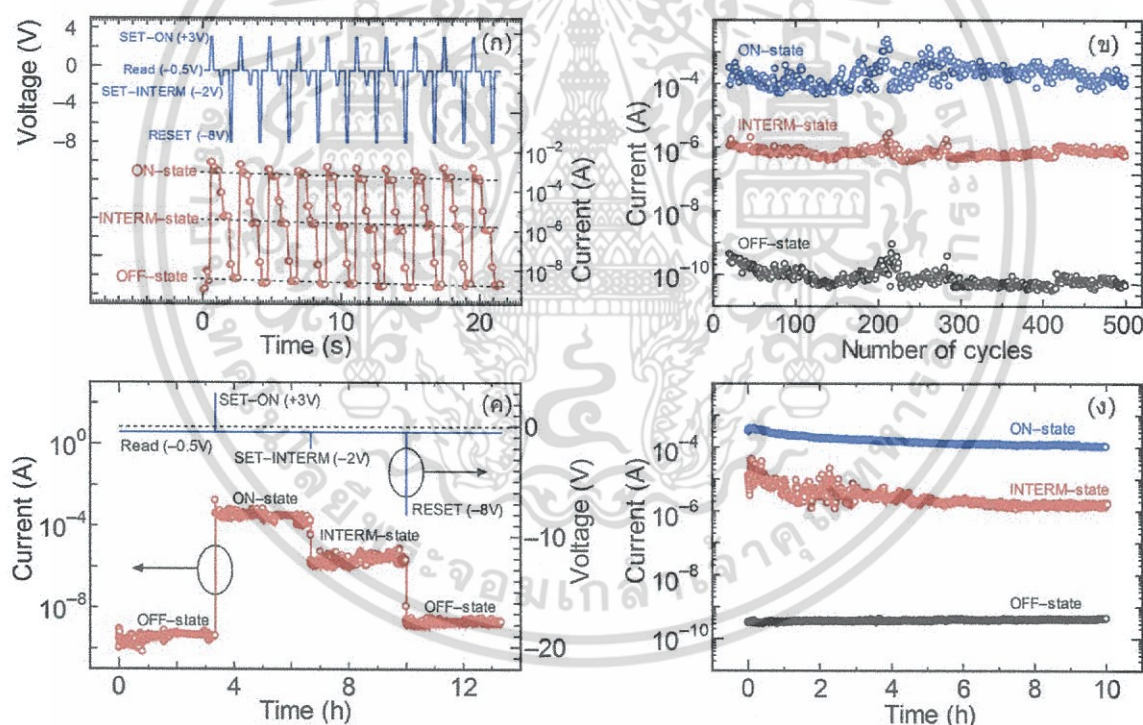
ในลำดับต่อมาอุปกรณ์หน่วยความจำจะถูกป้อนแรงดันด้านลบแสดงดังที่แสดงในรูปที่ 4.7(ง) ในสถานะนี้อุปกรณ์จะยังคงรักษาสถานะ ON ไว้ เนื่องจากสถานะดักจับจะมีอิเล็กตรอนเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า Al ซึ่งสอดคล้องกับการนำแบบ ohmic

เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงสถานะ INTERM ความต่างของระดับพลังงานของแผนภาพระดับพลังงานในรูปที่ 4.7(ก) จะถูกนำมาอธิบายอีกครั้ง จากสถานะเริ่มต้นแสดงให้เห็นว่าผลต่างของระดับพลังงาน LUMO ของ PVK กับฟังก์ชันงานของ Al คือ 2.2 eV และในทางตรงกันข้ามผลต่างของระดับพลังงาน LUMO ของ PVK กับฟังก์ชันงานของ ITO คือ 2.6 eV แต่ทว่าความลึกของบ่อศักย์ที่เกิดขึ้นจากผลต่างของระดับพลังงาน LUMO ของ PVK กับฟังก์ชันงานของ Ag มีค่าคงที่ที่ 2.27 eV ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวหากเราพิจารณาผลต่างของระดับพลังงานระหว่างด้าน ITO กับ Al จะพบว่าความสูงของ

กำแพงศักย์ทางด้านของขั้วไฟฟ้า Al จะต่ำกว่าทางด้านของ ITO ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์ที่ต่ำนี้จะส่งผลให้การฉีดอิเล็กตรอนจากฝั่งไบอัสตรง (แรงดันบวก) เป็นไปได้ง่ายกว่าทางด้านไบอัสย้อนกลับ (แรงดันลบ)

ถึงแม้ว่าอุปกรณ์จะแสดงสถานะ ON ออกมาทางฝั่งแรงดันลบในช่วงแรงดันต่ำ แต่การปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจะไม่สมดุลกับอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามาจากขั้วไฟฟ้า ITO เนื่องจากกำแพงศักย์ที่สูงกว่า ดังนั้นเมื่อแรงดันลบถูกป้อนจนถึงแรงดัน SET-INTERM ตัวอุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนจากสถานะ ON ไปเป็นสถานะ INTERM ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7(ง) และหลังจากนั้นหากอุปกรณ์ถูกป้อนแรงดันลบเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดัน RESET ตัวอุปกรณ์จะเกิดการเปลี่ยนสถานะอีกครั้งจากสถานะ INTERM กลับไปเป็นสถานะ OFF เป็นผลเนื่องมาจากอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากชั้นดักจับโดยสมบูรณ์ [50] โดยที่รูปแบบการนำในช่วงที่เปลี่ยนกลับมาเป็นสถานะ OFF อธิบายได้จากปรากฏการณ์ direct tunneling ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7(จ)

4.1.5 การทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al



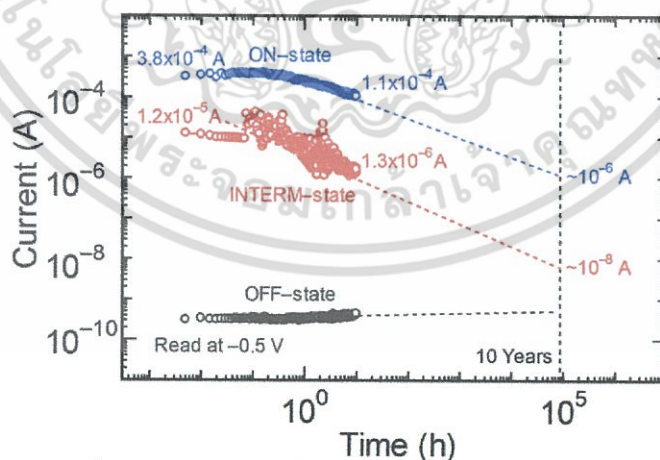
รูปที่ 4.8 (ก) ตัวอย่างการ “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะ (ข) ความสามารถในการอ่านเขียนซ้ำของสถานะ OFF ON และ INTERM สำหรับ 500 รอบ (ค) ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ (ง) การทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์สามสถานะในระยะยาวเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบรอบการ เขียน/อ่าน ของอุปกรณ์หน่วยความจำส่วนใหญ่จะถูกใช้เพื่อทดสอบสมบัติความเป็น non-volatile ของตัวอุปกรณ์ และเพื่อแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สามารถที่จะทำซ้ำได้ สำหรับผลการทดลองในรูปที่ 4.8(ก) ตัวอุปกรณ์แสดงสถานะที่แตกต่างกันได้สามสถานะอย่างชัดเจน โดยประกอบไปด้วย สถานะ OFF ON และ INTERM นอกจากนี้ผลการทดลองในรูปที่ รูปที่ 4.8(ข) ได้แสดง การกระจายของขอมูลในแต่ละสถานะที่แรงดันการอ่านข้อมูล -0.5 V เป็นจำนวน 500 รอบการทำงาน ซึ่งมี ข้อมูลเพียงเล็กน้อยที่เกิดการกระจายตัวแบบเสื่อมประสิทธิภาพ

เพื่อยืนยันความสามารถในการรักษาเสถียรภาพของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น การเก็บรักษาข้อมูลในระยะยาวจึงถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.8(ค) ความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้ถูกอ่านค่า จากตัวอุปกรณ์เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมงในแต่ละสถานะ หลังจากสถานะเริ่มต้น (OFF) ถูกเก็บข้อมูลที่แรงดัน การอ่าน -0.5 V เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง อุปกรณ์จะถูกป้อนแรงดัน SET-ON อุปกรณ์จะถูกเก็บข้อมูลที่ สถานะ ON ต่อไปอีก 4 ชั่วโมง ในขั้นตอนสุดท้ายอุปกรณ์จะถูกป้อนแรงดัน SET-INTERM ที่ -2 V อุปกรณ์ จะเปลี่ยนจากสถานะ INTERM ไปเป็นสถานะ OFF อีกครั้ง โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ที่ตั้งที่กล่าวมานั้น ช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่าได้ถูกนำมาใช้ทำการทดสอบกับอุปกรณ์หน่วยความจำแสดงดังรูปที่ 4.8(ง) อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะที่สร้างขึ้นได้แสดงสถานะที่แตกต่างกันได้นานถึง 10 ชั่วโมง จาก ข้อมูลการเก็บรักษาสถานะ 10 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่าง ON/OFF ON/INTERM และ INTERM/OFF คือ 1.7×10^6 3.5×10^2 และ 5.0×10^3 ตามลำดับ

4.1.6 การประมาณการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al



รูปที่ 4.9 การประมาณการเสื่อมเสถียรภาพของอุปกรณ์สามสถานะในระยะยาวเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง

โดยปกติอุปกรณ์หน่วยความจำจะถูกคาดหวังว่าจะต้องมีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้เป็น เวลาที่ยาวนานอย่างน้อยเป็นเวลา 10 ปี [51,52] จากข้อมูลการตรวจสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

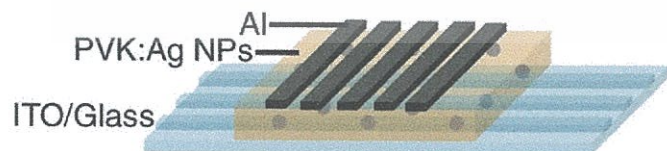
หน่วยความจำได้ถูกนำมาประมาณการเสื่อมสภาพโดยการลากเส้นประมาณการของแต่ละสถานะแสดงดังรูปที่ 4.9 จากการประมาณการพบว่าสถานะ OFF ของอุปกรณ์มีความเสถียรของการเก็บรักษาข้อมูลเป็นอย่างดีโดยที่มีค่ากระแสอยู่ในช่วง 10^{-9} - 10^{-10} A ตลอดระยะเวลาการประมาณค่า 10 ปี แต่อย่างไรก็ตามสถานะ ON และสถานะ INTERM พบเจอความไม่เสถียรของข้อมูลอย่างชัดเจน โดยในสถานะ ON ระหว่างเส้นประมาณการ 10 ปี ค่ากระแสจะลดลงจาก 3.8×10^{-4} ไปเป็น 1.1×10^{-4} A และในสถานะ INTERM ระหว่างเส้นประมาณการ 10 ปี ค่ากระแสจะลดลงจาก 1.2×10^{-5} ไปเป็น 1.3×10^{-6} A และที่จุดสิ้นสุดที่เวลา 10 ปี ค่ากระแสของสถานะ ON และ OFF จะอยู่ที่ 10^{-6} และ 10^{-8} ตามลำดับ จากข้อมูลจะพบว่าอัตราการเสื่อมสภาพของสถานะ ON จะต่ำกว่าสถานะ INTERM ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการสูญเสียอิเล็กตรอนออกจากสถานะดักจับที่แตกต่างกัน

จากข้อมูลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงิน พบว่าที่อัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงินที่ 6 wt% ได้แสดงสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำออกมาโดยมีค่าอัตราส่วน ON/OFF สูงที่สุด และจากผลการตรวจสอบสมบัติการทำซ้ำและการรักษาเสถียรภาพ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ให้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงได้ใช้โครงสร้างที่เหมาะสมดังกล่าวไปศึกษาต่อบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ ซึ่งจะได้มีการนำเสนอในหัวข้อถัดไป

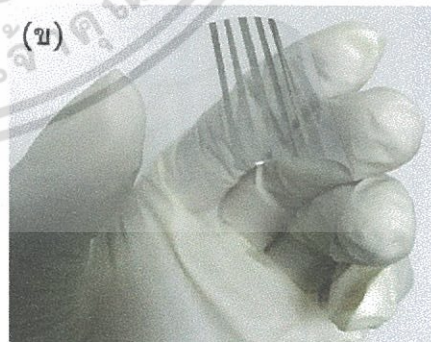
4.2 อุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับพลาสติก

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับพลาสติก โดยใช้เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มเช่นเดียวกับบนฐานรองรับกระจก ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับพลาสติก แสดงดังรูปที่ 4.10(ก) และ 4.10(ข)

(ก)



(ข)



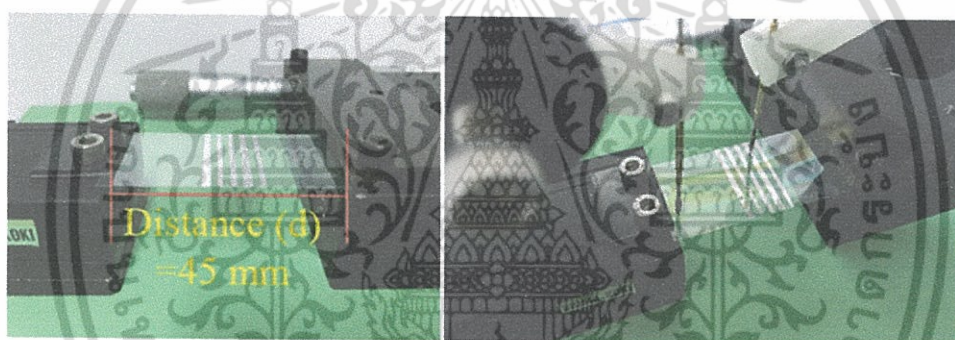
รูปที่ 4.10 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับกระจก และ (ข) ภาพถ่ายอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

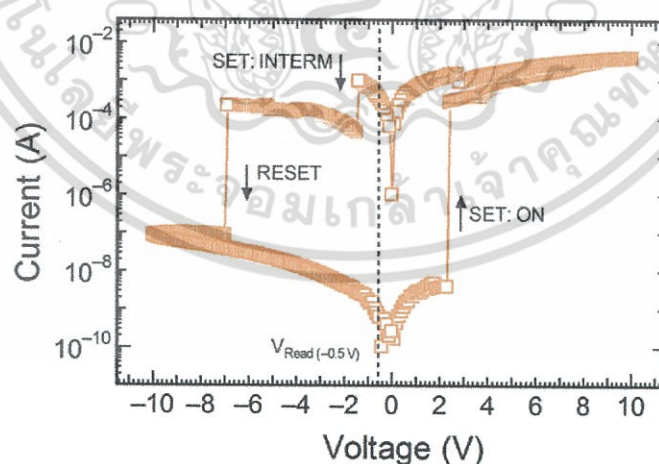
ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาโครงสร้างที่เหมาะสมของตัวอุปกรณ์ลงบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ โดยฐานรองรับที่ใช้คือพลาสติก polyethylene naphthalate (PEN) ซึ่งเป็นพลาสติกเคลือบ ITO ของบริษัท Peccell Technologies

4.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับ PEN ในลักษณะแบนราบ

รูปที่ 4.11(ก) แสดงการทดสอบค่ากระแสและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ในลักษณะแบนราบ (flat) ก่อนที่จะมีการโค้งงอ โดยระยะ d คือระยะห่างระหว่างขอบของอุปกรณ์ รูปที่ 4.11(ข) เป็นการแสดงสมบัติเฉพาะของค่ากระแสและความต่างศักย์ของโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับ PEN จากรูปพบว่าพฤติกรรมของอุปกรณ์ที่แสดงออกมาให้เห็นมีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างที่ทำการสร้างบนฐานรองรับกระจก โดยค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะยังคงมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดมากกว่า 10^6



(ก)



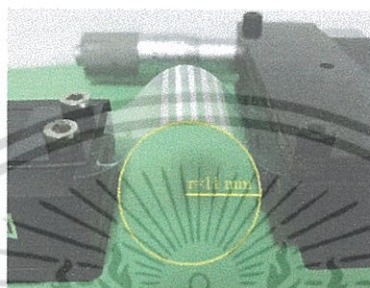
(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) การทดสอบค่ากระแสและความต่างศักย์ในลักษณะแบนราบ, d =ระยะห่างจากขอบถึงขอบของอุปกรณ์ และ (ข) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับที่โค้งงอได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับ PEN ภายใต้การโค้งงอ

เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำที่สามารถโค้งงอได้ จึงได้ทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกัน โดยมีวิธีการใช้การประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อหาขนาดของรัศมีความโค้ง โดยการหารัศมีความโค้งขณะโค้งงอนั้นแสดงดังรูปที่ 4.12 และมีขั้นตอนในการทดสอบการโค้งงอดังตารางที่ 4.1

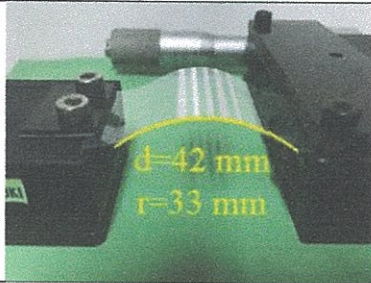
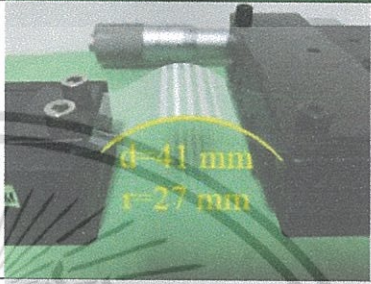

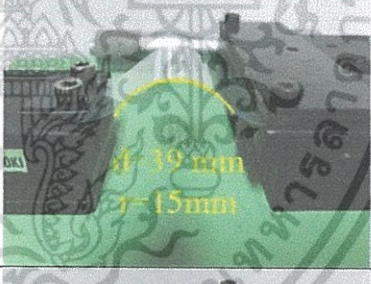
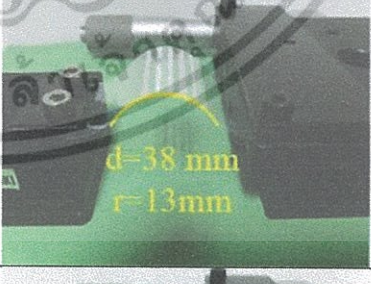
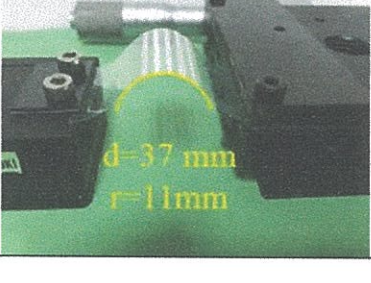


รูปที่ 4.12 การหารัศมีความโค้งขณะทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ตารางที่ 4.1 ขั้นตอนการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกัน

ขอบถึงขอบ (d)	รัศมีความโค้ง (r)	ลักษณะทางกายภาพ
45 mm	-	
44 mm	49 mm	
43 mm	36 mm	

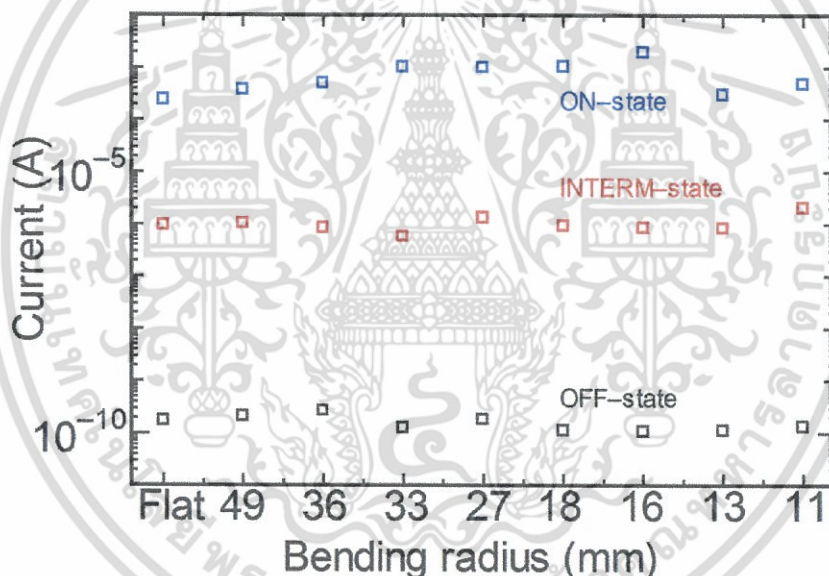
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบถึงขอบ (d)	รัศมีความโค้ง (r)	ลักษณะทางกายภาพ
42 mm	33 mm	
41 mm	27 mm	
40 mm	18 mm	
39 mm	15 mm	
38 mm	13 mm	
37 mm	11 mm	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 ทำการทดสอบโดยการโค้งฐานรองรับ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์แบบต่อเนื่องจากระยะ $d=45$ mm (flat) [รูปที่ 4.11(ก)] และลดลงไปเป็นจนถึงระยะ $d=37$ mm ($r=11$ mm) ตามลำดับ โดยในแต่ละระยะการโค้งจะทำการวัดค่ารัศมีความโค้ง (r) และทำการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์โดยที่ระยะ $d=45$ mm จะนิยามว่าไม่มีการโค้ง ในขณะที่ระยะ d ลดลงจะนิยามว่าเป็นการเพิ่มระยะการโค้ง

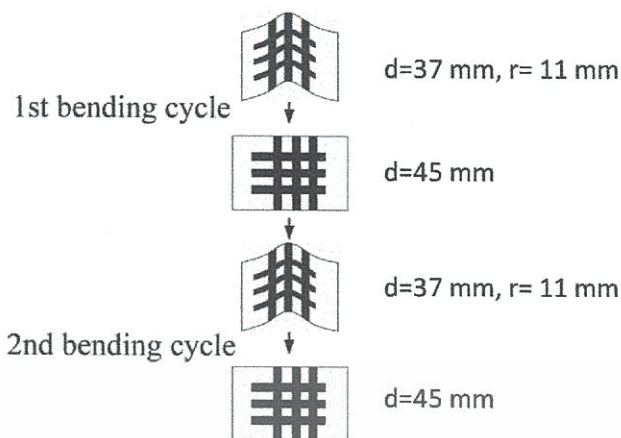
จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 นั้นได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าทั้งสามสถานะและทำการอ่านค่ากระแสที่แรงดัน -0.5 V โดยข้อมูลได้แสดงในรูปที่ 4.13 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์หน่วยความจำยังคงแสดงความสามารถในการเปลี่ยนสถานะออกมาได้เป็นอย่างดีแม้จะอยู่ในสถานะการโค้งของฐานรองรับ แต่อย่างไรก็ตามยังคงเห็นการกระจายตัวของค่ากระแสเกิดขึ้น โดยน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากความเครียดเชิงกลที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มจากการโค้ง โดยเฉพาะคุณสมบัติของซิลิโคนอลูมิเนียมที่มีความแข็งแต่เปราะ



รูปที่ 4.13 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับที่โค้งงอได้ ทดสอบโดยการโค้งที่มีการเพิ่มระยะการโค้ง

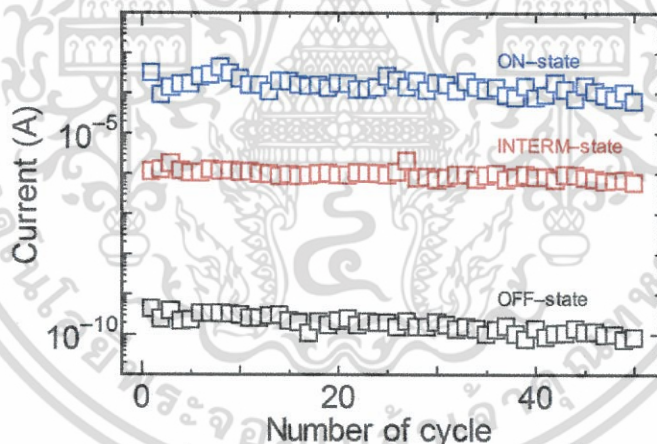
จากผลการทดสอบความสามารถในการโค้งของฐานรองรับที่ระยะแตกต่างกัน (รัศมีความโค้งแตกต่างกัน) ทำให้ทราบความสามารถโดยคร่าวของระยะในการโค้ง ดังนั้นในการทดสอบขั้นต่อไปจะเป็นการทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของตัวอุปกรณ์ภายหลังการโค้งโดยจะทำการทดสอบจากอุปกรณ์ตัวใหม่ที่ยังไม่มีการโค้งมาก่อน โดยนำมาทำการทดสอบที่ระยะ $d=37$ mm หรือที่รัศมีความโค้ง 11 mm ซึ่งเป็ระยะมากที่สุดที่อุปกรณ์ยังคงสามารถแสดงสมบัติของหน่วยความจำได้ ขั้นตอนการนับจำนวนครั้งแสดงดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ลักษณะการตรวจวัดสมบัติการโค้งงอแบบนั้บรอบ

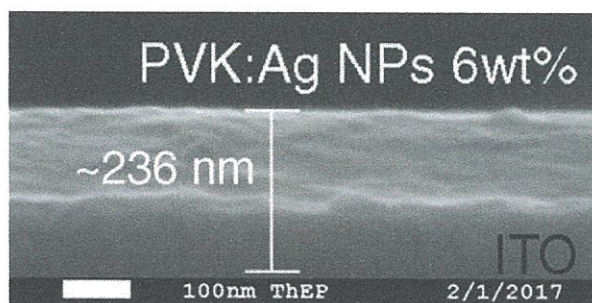
จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ในแต่ละรอบของการโค้งงอมีการให้ค่ากระแสของแต่ละสถานะที่ใกล้เคียงกัน โดยตลอดการทำซ้ำการโค้งงอ 50 รอบ อุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นสามารถแสดงสถานะที่แตกต่างกันทั้งสามสถานะได้อย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการทำซ้ำภายหลังจากการโค้งงอ

จากข้อมูลรัศมีการโค้งงอที่ได้ ได้ถูกนำมาคำนวณหาค่าความเครียดจากการโค้งงอเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง จากสมการที่ 2.5 จำเป็นที่จะต้องทราบความหนาของชั้นฟิล์มบางที่สร้างขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นฉนวนไฟฟ้า Al มีความหนาคงที่ 100 nm จากระบบตรวจวัดความหนาของระบบระเหยสารด้วยความร้อนที่มีค่าความผิดพลาด $\pm 0.1\text{ nm}$ โดยความหนาที่ได้จากชั้นไฟฟ้า ITO และ ชั้น PVK:Ag NPs แสดงดังรูปที่ 4.16 และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการโค้งงอแสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่าความหนาของชั้น ITO และ PVK:Ag NPs

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดกับตัวอุปกรณ์ระหว่างโค้งงอ

Distance: d (m)	Bending radius: r (m)	Substrate thickness (m)	Total film thickness (m)		Strain (%)
			ITO/Ag NPs	Al electrode	
4.50E-02	Flat				-
4.40E-02	4.90E-02				0.13
4.30E-02	3.60E-02				0.17
4.20E-02	3.30E-02				0.19
4.10E-02	2.70E-02	1.25E-04	2.36E-07	1.00E-07	0.23
4.00E-02	1.80E-02				0.35
3.90E-02	1.50E-02				0.42
3.80E-02	1.30E-02				0.48
3.70E-02	1.10E-02				0.57

จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่เกิดจากการโค้งงอ จะอยู่ในช่วง 0% ถึง 0.57% ซึ่งอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นยังคงสามารถแสดงสมบัติที่แตกต่างกันทั้งสามสถานะได้ จากสมการที่ 2.5 จะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดคือค่าความโค้งงอ โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดจะอยู่ในช่วง 0.5-1.2% [23]

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 คือ อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจก และ อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับพลาสติก

สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับกระจกจากการทดลองพบว่าสมบัติทางไฟฟ้าโดยเฉพาะค่าอัตราส่วนกระแสระหว่างสถานะ ON/OFF ON/INTERM และ INTERM/OFF จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอนุภาคนาโนเงิน ซึ่งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างที่เหมาะสมคือ ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al ที่มีค่าแรงดันในการอ่านข้อมูลอยู่ที่ -0.5 V โดยจากการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีรูปแบบการนำเป็นแบบ thermionic ohmic และแบบ direct tunneling สำหรับช่วงสถานะ OFF ON และสถานะ INTERM ตามลำดับ นอกจากนี้ความสามารถในการอ่านและเขียนซ้ำซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของอุปกรณ์หน่วยความจำยังได้รับการทดสอบมากกว่า 500 ครั้ง และมีระยะเวลาการทดสอบการเก็บรักษาของข้อมูลนานกว่า 10 ชั่วโมง

หลังจากนั้นได้นำโครงสร้างที่เหมาะสมมาสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs 6wt%/Al บนฐานรองรับพลาสติก จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสามสถานะได้อย่างดีเมื่อมีการทดสอบในสภาพแบนราบโดยมีระยะจากขอบถึงขอบ (d) ของตัวอุปกรณ์อยู่ที่ระยะ 45 mm ในขณะที่มีความสามารถในการโค้งงอมากที่สุดของอุปกรณ์อยู่ที่ระยะ $d=37$ mm หรือที่รัศมีความโค้ง 11 mm โดยทั่วไปความสามารถในการโค้งงอมักจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ทำงาน โดยในงานวิจัยนี้มีขนาดพื้นที่ทำงานอยู่ที่ 2 mm^2 ซึ่งจะได้รับผลกระทบที่เกิดจากความเครียดระหว่างการโค้งงอที่มาก แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบภายหลังการโค้งงอที่ระยะ $d=37$ mm อุปกรณ์ยังคงแสดงสมบัติการอ่าน-เขียนซ้ำของสถานะ ON OFF และ INTERM ได้ตลอดช่วงการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถที่จะพัฒนาไปสู่อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

อุปกรณ์หน่วยความจำนาโนนั้นได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีสิ่งที่ต่างกันเช่น โครงสร้าง วัสดุที่ใช้ วิธีการสร้าง และอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยใช้วัสดุประกอบพอลิเมอร์ระหว่าง PVK และอนุภาคนาโนเงิน ในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag nanoparticles/Al อีกทั้งยังสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้างดังกล่าวได้อย่างละเอียดชัดเจน ซึ่งถือเป็นการนำเสนอโครงสร้างใหม่ที่ยังไม่เคยมีการนำเสนอมาก่อน และยังสามารถนำโครงสร้างที่เหมาะสมดังกล่าวไปพัฒนาบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้

ในปัจจุบันอุปกรณ์หน่วยความจำได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากความจุของหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นแต่มีขนาดที่เล็กลง ซึ่งการพัฒนาดังกล่าวในแวดวงอุตสาหกรรมประเภตินี้ นับเป็นเรื่องที่ยุ่ยากเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเมื่อขนาดของทรานซิสเตอร์ภายในถูกย่อให้เล็กลงไปถึงระดับหนึ่ง ปรากฏการณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์บางอย่างจะแสดงผลไม่เหมือนเดิม ดังนั้นอุปกรณ์หน่วยความจำนาโนที่มีโครงสร้างใหม่จึงจำเป็นที่จะต้องได้รับการศึกษาและพัฒนา เป็นที่ทราบกันดีว่าอุปกรณ์หน่วยความจำได้เข้าไปมีส่วนเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายๆ ชนิด ดังนั้นหากการพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำประเภทนี้ประสบความสำเร็จจะเป็นการส่งผลต่อเศรษฐกิจเชิงคุณภาพที่สำคัญ

ซึ่งจากผลการวิจัยที่ผ่านมา ผลผลิตที่ได้รับประกอบไปด้วย 1. ตัวอย่างของอุปกรณ์ต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะบนฐานรองรับพลาสติก และ 2. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูลสากล ISI

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. S. Meena, S. M. Sze, U. Chand and T.-Y. Tseng, *Nanoscale Research Letters* 9 (2014) 526.
- [2] K. Lian, R. Li, H. Wang, J. Zhang and D. Gamota, *Materials Science and Engineering B* 167 (2010) 12.
- [3] S. Ali, J. Bae, K. H. Choi, C. H. Lee, Y. H. Doh, S. Shin, N. P. Kobayashi, *Organic Electronics* 17 (2015) 121.
- [4] J.Y. Son, Y.H. Shin, H. Kim and H. M. Jang, *ACS Nano* 5 (2010) 2655.
- [5] Toan T. Dao, T. V. Tran, K. Higashimine, H. Okada, D. Mott, S. Maenosono, and H. Murata, *Appl. Phys. Lett.* 99 (2011) 233303.
- [6] F. Li, T. W. Kim, W. Dong and Y. H. Kim, *Thin Solid Films* 517 (2009) 3916.
- [7] J. H. Ham, D. H. Oh, S. H. Cho, J. H. Jung, T. W. Kim, E. D. Ryu and S. W. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 112101.
- [8] D. Prime and S. Paul, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 367 (2009) 4141.
- [9] M. A. Mamo, W. S. Machado, W. A. L. van Otterlo, N. J. Coville, I. A. Hümmelgen, *Organic Electronics* 11 (2010) 1858.
- [10] 2005 International Technology Roadmap for Semiconductors. [Online]. Available: <http://public.itrs.net>
- [11] A. Beck, J. G. Bednorz, Ch. Gerber, C. Rossel, D. Widmer., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, July 2000, pp. 139.
- [12] กรกช อ่อนละออ. 2555. “การศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและกลไกการสวิตช์แบบสองสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำจากสารอินทรีย์-อนินทรีย์” วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิตกิตติมศักดิ์สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [13] L. P. Ma, J. Liu, Y. Yang, , *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, April 2002, pp. 2997.
- [14] Q. D. Ling, D. J. Liaw, C. Zhu, D. S. H. Chan, E. T. Kang and K. G. Neoh, *Progress in Polymer Science*, Vol. 33, 2008, pp. 917-978.
- [15] Y. T. You, M. L. Wang, H. N. Xuxie, B. Wu, Z. Y. Sun and X. Y. Hou, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 97, December 2010, pp. 233301.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] G. Liu, Q. D. Ling, E. Y. H. Teo, C. X. Zhu, D. S. H. Chan, K. G. Neoh and E. T. Kang, ACS NANO, Vol. 3, 2009, pp. 1929-1937.
- [17] C. Wua, F. Li a, T. Guo T. W. Kim, Organic Electronics, Vol. 13, 2011, pp. 178-183.
- [18] E. H. Rhoderick, Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon, Oxford, 1978.
- [19] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, Third Edition, Wiley & Sons, New York, 2007.
- [20] F. Gutman and L. E. Lyons, Organic Semiconductors, Wiley, New York, 1967.
- [21] Dong Ick Son, Tae Whan Kim, et al., Nano Lett., Vol. 10, 2010, pp. 2441-2447.
- [22] Dong Ick Son, Dong Hee Park, et al., J. Phys. Chem. C, Vol. 155, 2011, pp. 2341-2348.
- [23] I. Chung, K. Cho, J. Yun and S.Kim, Microelectronic Engineering 97 (2012) 122.
- [24] K. Onlaor, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, Appl Phys A 112 (2013) 495.
- [25] S.H. Wang, Z.H. Zeng, S.H. Yang, L.T. Weng, P.C. Wong, K.C. Ho, Macromolecules 33 (2000) 3232.
- [26] K. Bradley, J.C.P. Gabriel, G. Gruner, Nano Lett. 3 (2003) 1353.
- [27] L. Valentini, V. Bavastrello, E. Stura, I. Armentano, C. Nicolini, J.M. Kenny, Chem. Phys. Lett. 383 (2004) 617.
- [28] C. Wu, F. Li, T. Guo and T.W. Kim, Organic Electronics 13 (2012) 178.
- [29] Y. Xu, J. Peng, J. Jiang, W. Xu, W. Yang, Y. Cao, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 193502.
- [30] ยุวัฒน์ บุญหนัก. 2554. “การปลูกฟิล์มบางอนุภาคนาโนเงินโดยระบบการพ่นด้วยไฟฟ้าสถิตสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ความชื้น” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [31] J.B. Wright, K. Lam, D. Hansen, R.E. Burrell, American Journal of Infection Control 27 (1999) 344.
- [32] M.C. Daniel, D. Astruc, Chemical Reviews 104 (2004) 293.
- [33] A. Kiesow, J. E. Morris, C. Radehaus, A. Heilmann, Journal of Applied Physics 94 (2003) 6988.
- [34] Yusheng Liu, Shimou Chen, Lei Zhong, Guozhong Wu, Radiation Physics and Chemistry 78 (2009) 251.
- [35] S.L. Smitha, K.M. Nissamudeen, Daizy Philip, K.G. Gopchandran, Spectrochimica Acta Part A 71 (2008) 186.
- [36] D.Y. Yun, N. S.Arul, D.U. Lee, N.H.Lee and T. W. Kim, Organic Electronics 24 (2015) 320.
- [37] A. Midya, N. Gogurla and S. K. Ray, Current Applied Physics 15 (2015) 706.

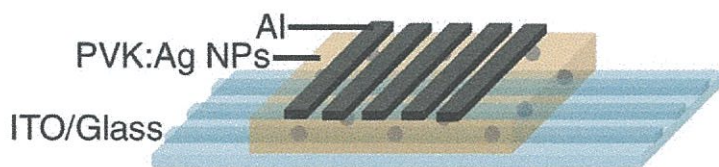
- [38] Q. Shi, J. Xu, Y. Wu, Y. Wang, X. Wang, Y. Hong, L. Jiang and L. Li, *Physics Letters A* 378 (2014) 3544.
- [39] CH.V.V. Ramana, M.K. Moodley, V. Kannan and A. Maity, *Solid-State Electronics* 81 (2013) 45.
- [40] C. Wu, F. Li, T. Guo and T. W. Kim, *Organic Electronics* 13 (2012) 178.
- [41] D. I. Son, D. H. Park, J. Bi. Kim, J.-W. Choi, T. W. Kim et al., *J. Phys. Chem. C* 115 (2011) 2341.
- [42] K. Onlaor, T. Thiwawong and B.Tunhoo, *Organic Electronics* 31 (2016) 19.
- [43] H. Li, Q. Xu, N. Li and et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 132 (2010) 5542.
- [44] J. S. Lee, Y. M. Kim, J. H. Kwon and et al., *Adv. Mater.* 23 (2011) 2064.
- [45] W. Hu, L. Zou, C. Gao and et al., *Journal of Alloys and Compounds* 676 (2016) 356.
- [46] Z. Ji, Q. Mao, W. Ke, *Solid State Commun.* 150 (2010) 1919-1922.
- [47] J. M. Beebe, B. S. Kim, J. W. Gadzuk, C. D. Frisbie and J. G. Kushmerick, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 026801.
- [48] L. Zhou and M. R. Zachariah, *Chemical Physics Letters* 525-526 (2012) 77.
- [49] Gang Liu, Qi-Dan Ling, Eric Yeow Hwee Teo et al., *ACS Nano* 3 (2009) 1929.
- [50] K. Nagashima, H. Koga, U. Celano and et al., *Scientific Reports* 4 (2014) 5532.
- [51] C.M. Huang, Y.S. Liu, C.C. Chen, K.H. Wei and J.T. Sheu, *Appl. Phys. Lett.* 93 (2008) 203303.
- [52] Y. Han, K. Cho and S. Kim, *Microelectronic Engineering* 88 (2011) 2608.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับพลาสติก

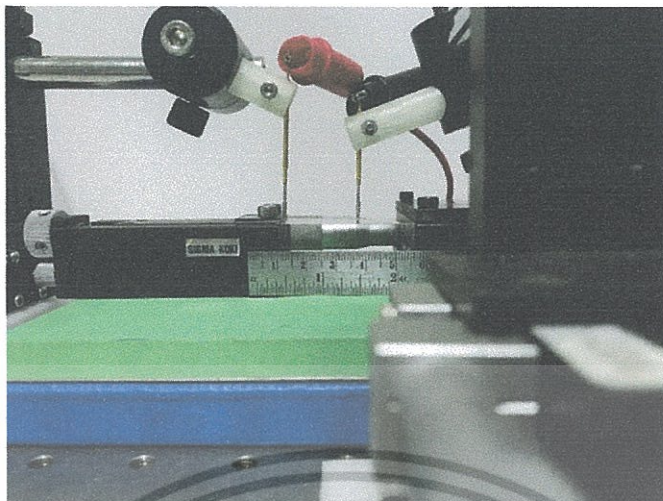


ลักษณะของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบโค้งงอได้ที่สร้างขึ้น

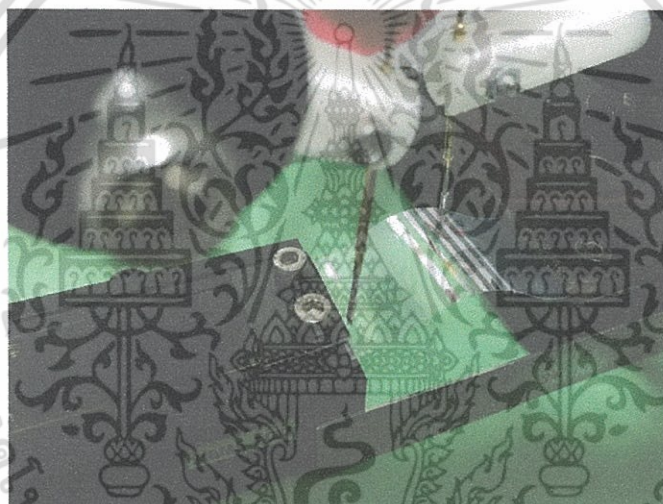


ลักษณะการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าในลักษณะที่ไม่มีการโค้งงอ

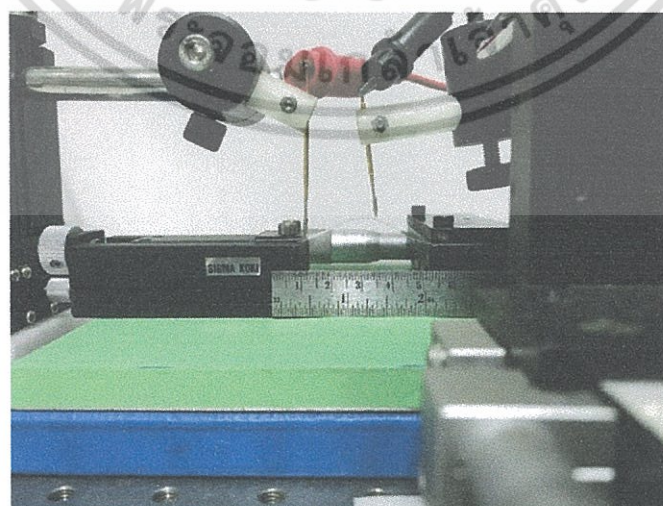
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การวัดระยะความโค้งของฐานรองรับขณะวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

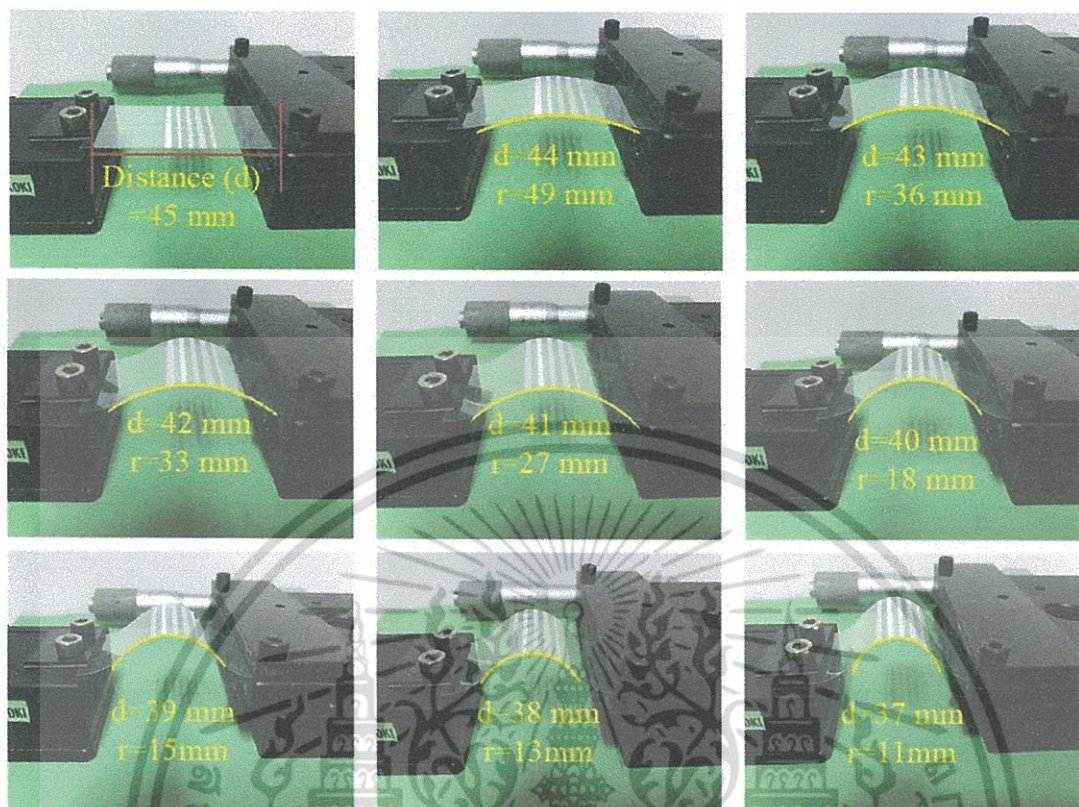


ลักษณะการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าในลักษณะที่มีการโค้งงอ



การวัดระยะความโค้งของฐานรองรับขณะวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การวัดระยะของรัศมีมีความโค้งของฐานรองรับขณะวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับกาสับสนุนจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560
ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

Korakot Onlaor, Thutiyaoporn Thiwawong and Benchapol Tunhoo, "Multilevel conductance switching and carrier transport mechanisms of memory devices based on an ITO/PVK:Ag nanoparticles/Al structure", Journal of Alloys and Compounds Volume 732, 25 January 2018, Pages 880-886.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Alloys and Compounds

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jalcom>

Multilevel conductance switching and carrier transport mechanisms of memory devices based on an ITO/PVK:Ag nanoparticles/Al structure



Korakot Onlaor^{a, b, c, *}, Thutiyaoporn Thiwawong^{a, b, c}, Benchapol Tunhoo^{a, b, c}

^a Electronics and Control System for Nanodevice Research Laboratory, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Bangkok, 10520, Thailand

^b Thailand Center of Excellence in Physics, Commission on Higher Education, Ministry of Education, 328 Si Ayutthaya Road, Bangkok, 10400, Thailand

^c Nanotec-KMITL Excellence Center on Nanoelectronic Devices, Bangkok, 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 July 2017

Received in revised form

13 October 2017

Accepted 23 October 2017

Keywords:

PVK

Silver

Nanoparticles

Memory

Multilevel

ABSTRACT

Multilevel conductance switching was achieved using silver nanoparticles (Ag NPs) embedded in poly(9-vinylcarbazole) (PVK) with a structure of ITO/PVK:Ag NPs/Al. The current-voltage (*I-V*) curves of the memory devices at low reading voltages showed three distinguished states of current. The memory devices exhibited non-volatile rewritable memory characteristics. The carrier transport mechanisms of the devices in each state were analyzed by theoretical models based on the experimental *I-V* data. In addition, retention time measurements showed clearly three current states with good data retention properties. From the retention times test, the average values of ON/OFF, ON/intermediate (INTERM) and INTERM/OFF current ratios of the memory devices were 1.7×10^6 , 3.5×10^2 and 5.0×10^3 , respectively.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In recent years, electrical switching memory devices based on organic materials have attracted extensive attention as they offer many advantages such as easy fabrication process, low power consumption and low fabrication cost [1–3]. However, there are inherent restrictions, one of which is the problem of density storage [4,5]. In an attempt to solve the problems, different processes, structures and materials have been studied to enhance device performance [4–16]. Different types of memory were observed such as non-volatile write-once-read-many-times (WORM) memory devices [1,6], rewritable memory devices [8], natural material-based memory devices [9,10] and other various memory characteristics. In particular, multilevel memory type is currently receiving interest, as a single cell can be selected to store more than 2 states; this suggests that multilevel memory device is an alternative method of achieving high density data storage [2,5,11–14].

Multilevel memory devices have been investigated using many

kinds of conduction mechanisms, for instance, charge trapping-detrapping process [5], filamentary conduction [2], redox switching process [15], however the optimum method remains a matter of discussion. Nowadays, in several structures of multilevel memory devices, much attention has been focused on structures comprising nanoparticles (NPs) blending with the polymer host, as a diversity of NPs and polymer materials [2,5,16,17]. Metal NPs is one of the candidates for improved memory performance because of the higher work function of metal [18–23]. For metal NPs blended polymer, a wide energy gap of polymer usually acts as a charge blocking layer when compared with the metal work function. Silver nanoparticles (Ag NPs) are desirable because they have been reported in the field of memory device applications as a candidate for practical data storage [20–22]. Compared to the accepted work function of Ag, poly(9-vinylcarbazole) (PVK) is another choice, as it is well known that PVK is a hole transport in organic electronics and plays an important role in several electronic devices, especially as a memory type comprising NPs blending, such as PVK:carbon nanotubes [8], PVK:gold NPs [22], PVK:titanium dioxide NPs [24] and PVK: graphene sheets [25].

In the present study, we report on the fabrication of multilevel memory devices with different Ag NPs concentrations embedded in the PVK matrix, based on the structure of indium-tin oxide/PVK:Ag

* Corresponding author. Electronics and Control System for Nanodevice Research Laboratory, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Bangkok, 10520, Thailand.

E-mail address: korakot.onlaor@gmail.com (K. Onlaor).

<https://doi.org/10.1016/j.jalcom.2017.10.197>

0925-8388/© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

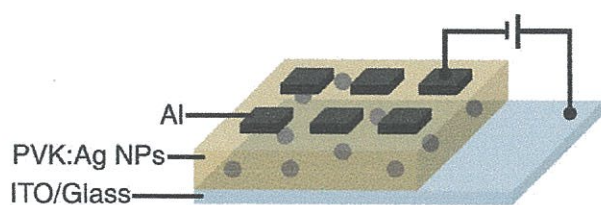


Fig. 1. Schematic illustration of the ITO/PVK:Ag NPs/Al memory devices.

NPs/aluminum (ITO/PVK:Ag NPs/Al). In addition, the carrier transport mechanisms of the fabricated multilevel memory devices are also reported and explained by using theoretical electrical models and energy-band diagrams. Furthermore, the retention time characteristics of the memory device for ON-state, OFF-state and intermediate state (INTERM-state) were investigated to report the stability of multilevel memory devices.

2. Experimental details

2.1. Materials

To prepare the active PVK:Ag NPs layer, PVK (average molecular weight: 1,100,000) and Ag NPs (average particle size < 100 nm) were purchased from Sigma-Aldrich. The PVK was dissolved in chlorobenzene with a concentration of 30 mg/ml and stirred until a slightly viscous solution was obtained. Then, Ag NPs were mixed into the PVK solution with a concentration of 2, 4, 6, 8 and 10 wt% by ultrasonication for 4 h.

2.2. Device fabrication and characterization

To fabricate the memory devices based on the ITO/PVK:Ag NPs/Al structure, ITO coated glass with sheet resistance of $10 \Omega/\square$ was used as a substrate. The substrates were cleaned by ultrasonication with deionized high purity water, acetone, methanol and isopropanol for 20 min per step. After the substrates were dried completely, the prepared solution was spin-coated on top of the ITO

layer at a speed rate of 4000 rpm for 60 s in ambient condition. To remove residual solvent, the samples were baked at 60°C for 4 h. Finally, 100 nm-thick Al top electrodes were deposited through a shadow mask by thermal evaporation at a base pressure of 2×10^{-6} mbar; the active area of each cell is 1 mm^2 . A sample schematic diagram of the structure is shown in Fig. 1. To observe dispersion of Ag NPs, the PVK:Ag NPs solution was dropped on a copper grid and examined with a transmission electron microscope (TEM, Philips TECNAI 20). The thickness of the film coated on the substrate was investigated by a field emission scanning electron microscope (FE-SEM, JSM-7001F) to ensure comparable film thicknesses in each Ag NPs concentration. All electrical property measurements were performed using a Keithley 2410 source meter at room temperature.

3. Results and discussion

After the coating process, thicknesses of PVK:Ag NPs layers with different Ag NPs concentrations were obtained by FE-SEM, as shown in Fig. 2. In the case of Ag NPs 2–8 wt%, Ag NPs in the PVK layer were not observed from the FE-SEM images, while for Ag NPs concentration of 10 wt%, Ag NPs can be clearly seen inside the layer. However, all PVK:Ag NPs layers are uniformly thick, with thickness between 120 and 140 nm. These uniform thicknesses can be used to confirm electrical switching behaviors, which should depend on Ag NPs concentration in the layer rather than being due to thickness. Plan-view bright-field TEM images of different Ag NP concentrations, used to investigate Ag NPs dispersion in the PVK solution, are shown in the inset of Fig. 2. The amount of Ag NPs is seen to increase with increasing Ag NPs concentration. As observed, the Ag NPs with different shapes and sizes are distributed in the PVK solution.

Switching characteristics of memory devices can be examined by applying a bias voltage to the ITO electrode (see a test structure, Fig. 1). Voltages across the device were scanned from 0 V to +10 V and +10 V to -10 V, while the current was recorded in each scan step, the results are presented in Fig. 3. For the device without Ag NPs, memory properties were not observed. Interestingly, in the case of Ag NPs 2–10 wt%, as the applied voltages were swept from

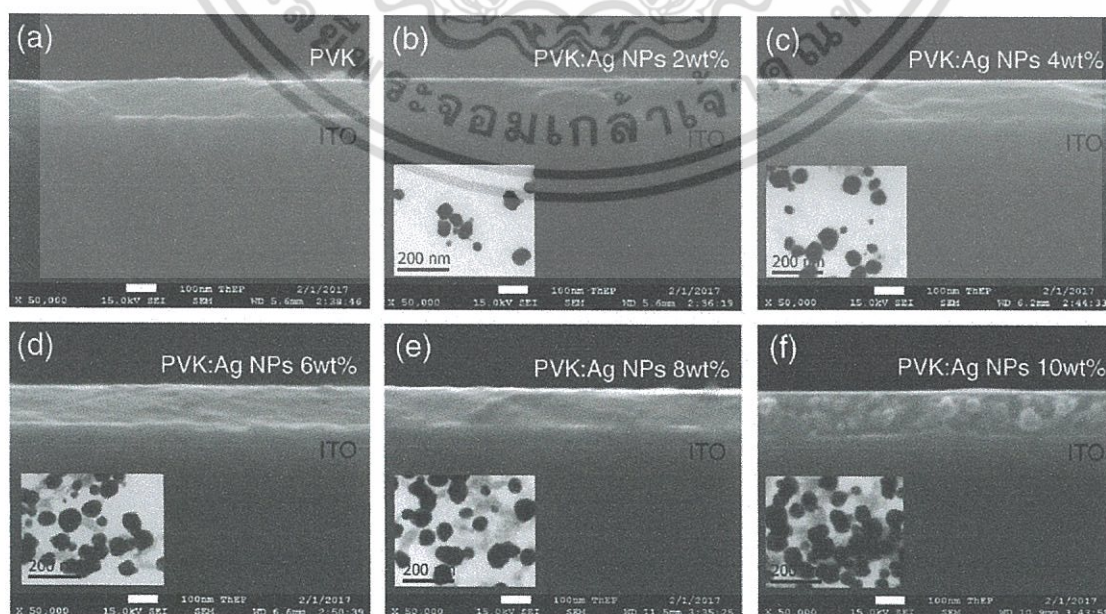


Fig. 2. Cross-sectional FE-SEM images of PVK:Ag NPs thin films and TEM images of Ag NPs dispersed in the PVK solution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในวงจำกัด ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

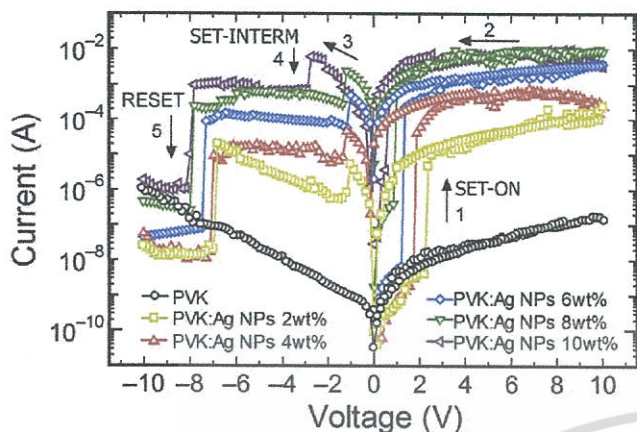


Fig. 3. I-V characteristics of ITO/PVK:Ag NPs/Al memory devices with different Ag NPs concentrations.

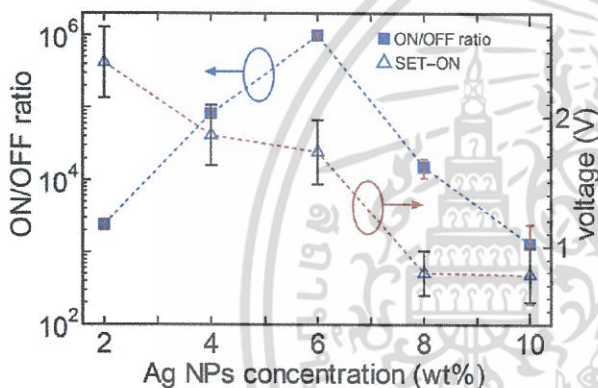


Fig. 4. The influence of Ag NPs concentration on the ON/OFF current ratio and SET-ON voltage.

0 V to +10 V (sweep 1), all devices had a low current level in an initial state defined as OFF-state. However, when the voltage exceeded turn-on voltage during scanning (refer to SET-ON in Fig. 3), the current abruptly increased, with different values of SET-ON voltage and different high current levels emerging. These high current levels correspond to the ON-state of memory devices. After the devices were set to the ON-state, the current levels were able to remain in the ON-state even when the applied voltages swept back

from +10 V to 0 V (sweep 2).

When reverse bias voltages were being applied from 0 V to -10 V, the current increased gradually to the ON-state (sweep 3). The ON-state of all devices remained stable until the applied negative voltage reached at SET-INTERM voltage (sweep 4), when the current abruptly dropped, which corresponds to the INTERM-state. When higher reverse bias voltages were applied (sweep 5), current levels rapidly dropped from the INTERM-state to the OFF-state (refer to RESET in Fig. 3). The three different states indicate multilevel memory behavior. These results indicate that the storage abilities of the devices such as SET-ON voltage, SET-INTERM voltage and ON/OFF current ratio are varied by changing the amount of Ag NPs contained in the PVK.

Fig. 4 shows the effects of Ag NPs contained in the PVK layer on memory characteristics, including ON/OFF current ratios read at -0.5 V and SET-ON voltages. All data points with standard deviations of each concentration were measured in 10 selected cells and repeated scan 10 cycles/cell. The ON/OFF current ratio increased when the Ag NPs concentration was increased. However, after the concentration of Ag NPs was increased to 8 wt%, the ON/OFF current ratio swiftly dropped. Because the current level at the OFF-state increased by 3 orders of magnitude (clearly seen in Fig. 3), the high conductivity in the OFF-state might depend on the proportional Ag NPs in the film. Neighboring Ag NPs were separated by PVK matrix, after increasing Ag NPs the distance between neighboring Ag NPs decreased. In addition, some Ag NPs in the films joined with neighboring Ag NPs and allowed effective transport of the charge carrier under low bias. These hypotheses are supported by TEM images, as shown in Fig. 2. Therefore, the Ag NPs concentration of 6 wt% shows optimal memory properties with highest ON/OFF current ratio of multilevel memory device.

To investigate repetition ability of the memory device, Fig. 5(a) shows the I-V characteristics with repeated sweeps of 100 consecutive cycles of the ITO/PVK:Ag NPs 6 wt%/Al structure. In these repeated scans voltages across the device were swept in an anticlockwise loop from 0 V to +10 V to -10 V to 0 V. For the reverse bias, the memory device clearly exhibited SET-INTERM voltages and reset voltages from the INTERM-state to the OFF-state. Thus the results confirm that the memory devices exhibit multilevel memory behaviors. In addition, repeated scans were used to deduce the conduction mechanisms in the next section. Fig. 5(b) shows an example of “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” cycle of the multilevel memory device.

To examine the conduction mechanisms of the memory device, the I-V curves of Fig. 5 were re-plotted into conduction mechanism models. Fig. 6(a) shows a $\ln|I|$ versus $V^{1/2}$ plot of the 10th I-V cycle in

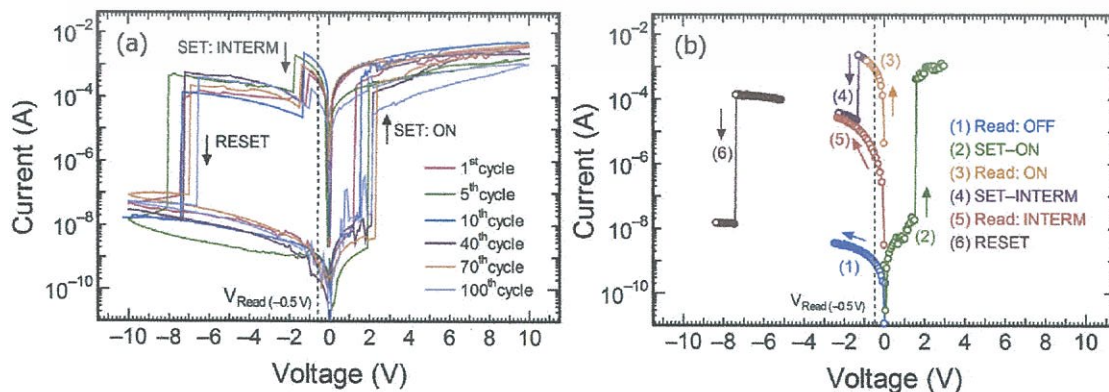


Fig. 5. (a) I-V characteristics for the optimal Ag NPs content (ITO/PVK:Ag NPs 6 wt%/Al) with consecutive repeated scans, dot-lines show reading voltages (V_{Read}) at -0.5 V and (b) the example of “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” cycle of the multilevel memory device.

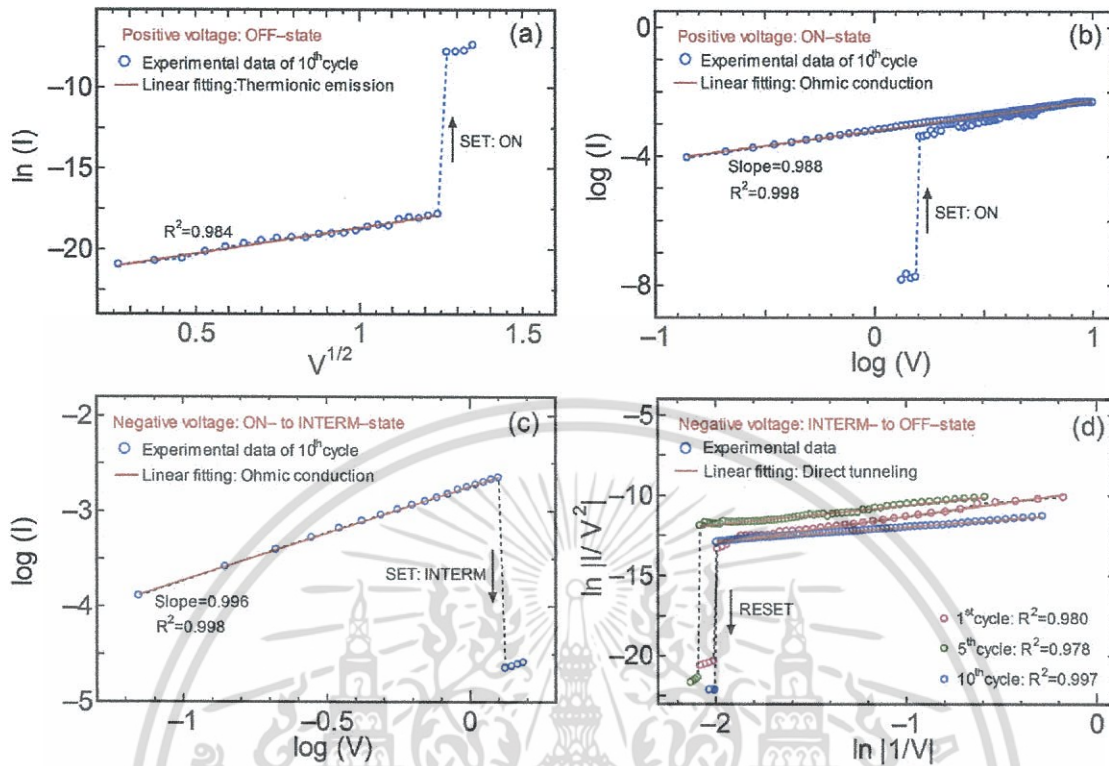


Fig. 6. Experimental data and best-fit line of optimal Ag NPs content (ITO/PVK:Ag NPs 6 wt%/Al), (a) thermionic emission in positive bias voltages (OFF-state), (b) ohmic conduction mechanisms in positive bias voltages (ON-state), (c) ohmic conduction mechanism in reverse bias voltages (ON- to INTERM-state) and (d) direct tunneling model in reverse bias voltages (INTERM- to OFF-state).

forward bias voltages (OFF-state). The data can be well fitted and considered as the thermionic emission process, expressed as [26,27]:

$$I = T^2 \exp\left[\frac{-(\phi_b - q\sqrt{qV/4\pi\epsilon d})}{kT}\right], \quad (1)$$

where T is the absolute temperature, ϕ_b is the barrier height, q is the electron charge, ϵ is the electronic permittivity, d is the film thickness and k is the Boltzmann's constant. In this process, electrons were probably controlled by charge injection from the Al electrode and trapped in the PVK:Ag NPs layer until the voltage swept to the SET-ON voltage. Afterward, the OFF-state changed suddenly to the ON-state. Fig. 6(b) shows a $\log(I)$ versus $\log(V)$ plot in forward bias voltages (ON-state), a linear relationship with slope of 0.988 was observed. Thus the conduction mechanism of the ON-state is believed to exhibit ohmic behavior. The conduction mechanism of the ON-state for reverse bias region should be an ohmic conduction mechanism, as the slope of linear fitting of voltage sweeps from 0 V to SET-INTERM is very close to ideal case for ohmic conduction [26–28], as shown in Fig. 6(c). In case of the OFF-state and ON-states, the conduction mechanisms can be clearly observed. Nevertheless, the INTERM-state on reverse bias voltages was difficult to understand in carrier transport mechanism.

Typically, the conduction mechanism and electron injection at metal/insulator contact can be found in many different processes. However, the device usually shows one dominant mechanism in each applied bias voltage [27–33]. Therefore the 1st, 5th and 10th cycles of the voltage sweeps in Fig. 5 were fitted to prove the conduction process in the INTERM-state. Fig. 6(d) shows linear relationships for $\ln(I/V^2)$ versus $\ln|1/V|$, meaning electron transport

in the INTERM-state region can be explained as direct tunneling, expressed as [29,30]:

$$I = V \exp\left(-\frac{2d\sqrt{2m^* \phi_b}}{\hbar}\right), \quad (2)$$

where m^* is the effective mass and \hbar is the reduced Planck's constant. The different slope observations in Fig. 6(d) might depend on the amount of electrons tunneling through the device under applied voltage.

Furthermore, to propose the conduction mechanisms of the multilevel memory devices based on the ITO/PVK:Ag NPs/Al structure, energy band diagrams are shown in Fig. 7. Work function of ITO and Al electrodes are accepted as approximately -4.6 eV and -4.2 eV, respectively, the work function of Ag NPs is about -4.27 eV [34], while the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) and the highest occupied molecular orbital (HOMO) of the PVK layer are approximately -2.0 and -5.5 eV, respectively, as reported in the literature [1,8]. Therefore, we expect the PVK matrix acts as an electron tunneling and blocking layer in the present multilevel memory devices. Starting with the pristine state, the band diagram is shown in Fig. 7(a). As voltages are applied across the device in forward direction, the injected electrons into the PVK:Ag NPs layer increases as the voltage increases. Simultaneously, electrons inside the layer are gradually captured in the Ag NPs trapping-states. These processes can be explained by thermionic emission process for the OFF-state, electrons can overcome the potential barrier between the insulator/metal contact [26,27], as shown in Fig. 7(b). In the case of higher applied bias voltages, the bending of energy bands is easier for electron injection from the Al electrode into the Ag NPs trapping-states. Then, electrons are

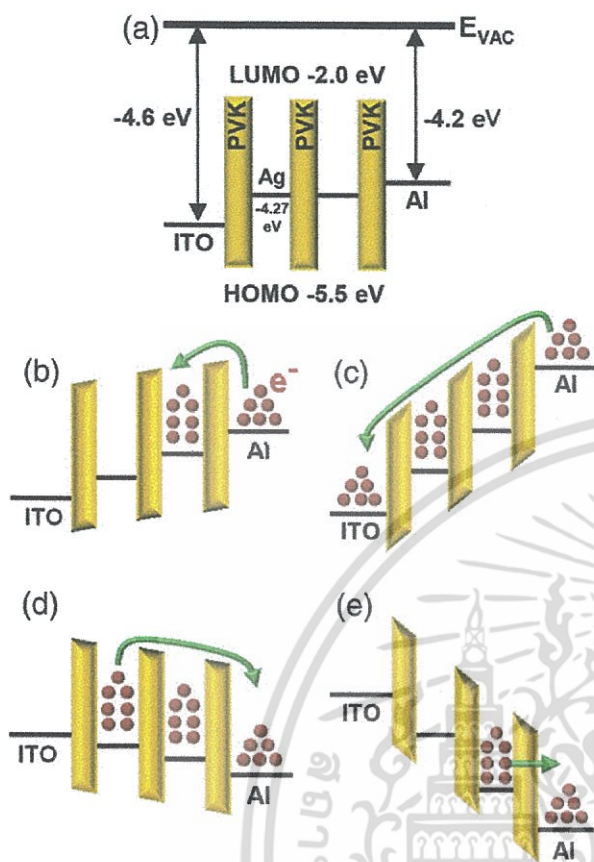


Fig. 7. Schematic illustrations of band diagrams at different stages: (a) pristine state, (b) the OFF-state in the positive voltage region, (c) the ON-state in the positive voltage region, (d) the ON-state to the INTERM-state in the negative voltage region and (e) the INTERM-state to the OFF-state in the negative voltage region.

gradually filled into the trapping-states until the applied voltage reaches SET-ON voltage. As a result, the injection of electrons from the Al electrode is free from the trapping-states and makes the conductivity state of the device rapidly change to the ON-state, as shown in Fig. 7(c). After the device changes to the ON-state the device still exhibits the ON-state when the applied voltage turns back to the lower voltage, because the traps are still fully occupied by electrons, which correspond in ohmic conduction in the ON-state. Thus the device can remain in the ON-state even when the applied voltage is swept to 0 V; this maintaining of the ON-state shows that the device has a type of non-volatile memory. The non-volatile properties might result from the trapping-states having enough electrons, and the prevention of electron movement out of the trapping-states.

Subsequently, voltages are applied in reverse direction as shown in Fig. 7(d). In this state, the device exhibits the ON-state due to the Ag NPs trapping-states still having sufficient electrons to consent the electron directly flow and transport to the Al electrode again via ohmic conduction.

To understand the conduction mechanism at the INTERM-state, the different energy levels in Fig. 7(a) are re-clarified. The pristine state shows that the energy difference between the work function of the Al and the LUMO level of PVK is 2.2 eV. On one hand, the energy difference between the work function of the ITO and the LUMO level of PVK is 2.6 eV, whereas the trap depth caused by PVK/Ag NPs interface is constant at 2.27 eV (between the work function of Ag NPs and the LUMO level of PVK). When considering the

energy level difference between the ITO and Al, the small barrier height of carrier injection in the forward direction favors electron injection more than in the reverse direction. Although the device still exhibits the ON-state in reverse direction at low negative voltage region, the released electrons and re-trapped electrons do not balance due to the barrier height of carrier injection from the ITO electrode being higher than the trap depth. Therefore, when the applied voltage is increased in negative voltage and reached to the SET-INTERM, the device switches to the INTERM-state. The proposed model for this is also shown in Fig. 7(d). When the reset voltage is applied to the device, device shows switching from the INTERM-state to the OFF-state because the electrons are completely released from the trapping-states and do not re-trap again [5,35–39]. For the proposed mechanism, electrons are released by direct tunneling process, as shown in Fig. 7(e). Then the device retraces to the pristine state again. The INTERM-state region implies that electrons in the trapping-states can be retained by balancing electrons between releasing and electrons trapped in the layer, whereby the amount of electrons in the trapping-states is higher than the OFF-state but lower than the ON-state.

In a cycle test, “Read-Set-Read-Set-Read-Reset” cycles were used to investigate the non-volatile rewritable switching characteristics of the multilevel memory device, with the voltage pulse of reading (–0.5 V), setting ON-state (+3 V), setting INTERM-state (–2 V) and erasing (–8 V) as shown in Fig. 8(a). The device clearly showed three different states of conductivity for the OFF-state, ON-state and INTERM-state. In addition, Fig. 8(b) shows the current distribution of the three states within 500 switching cycles extracted at a reading voltage of –0.5 V. The current values show little degradation during the 500 repeated switching cycles. However, fluctuations of current appeared throughout the test which may be due to the instability of the material and the electron trapping-detrapping process.

To confirm the stability of the memory device, retention time characteristics were investigated to ascertain their electrical properties; the measurement process is shown in Fig. 8(c). Reliability of the stored data was evaluated by continuous readout for almost 4 h in each state. The initial OFF-state was recorded at the reading voltage. After the setting voltage pulse had been applied to the device, the reading voltage was applied again to record the data of the ON-state. After that, the SET-INTERM voltage was applied at –2 V and the INTERM-state appeared. Following the same process, longer retention characteristics testing is shown in Fig. 8(d). The multilevel memory device stored the current values of OFF-state, ON-state and INTERM-state stably for up to 10 h at a reading voltage of –0.5 V. In addition, the retention time measurement for 10 h was extrapolated to 10 years (shown in the Supporting Information) to analyze and explain the failure mechanism. From the 10 h retention time results, the average conductivity ratios of ON/OFF, ON/INTERM and INTERM/OFF were 1.7×10^6 , 3.5×10^2 and 5.0×10^3 , respectively. These measurement results indicated that the ITO/PVK:Ag NPs 6 wt%/Al structure devices were reversible and reproducible for non-volatile rewritable switching applications.

4. Conclusions

In summary, multilevel ITO/PVK:Ag NPs/Al memory devices were fabricated and investigated. The effects of the Ag NPs in the film on the memory properties were also examined. The conduction mechanisms of the multilevel memory devices in each state with optimal Ag NPs concentration (6 wt%) were described in relation to different theoretical models of the *I-V* results. Charge transport mechanisms of the OFF-state, ON-state and INTERM-state could be explained by thermionic emission model, ohmic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

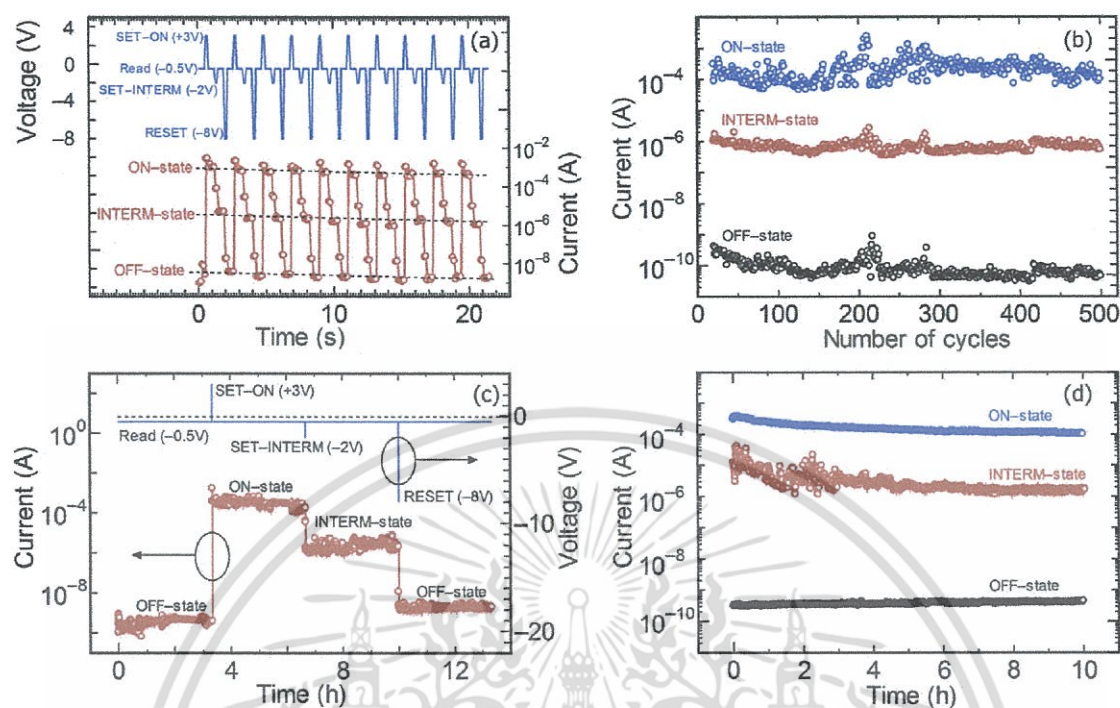


Fig. 8. (a) Multilevel "Read-Set-Read-Set-Read-Reset" cycles of the memory device corresponding to non-volatile rewritable memory properties. (b) Endurance properties of read pulse cycles of the device at the OFF-state, ON-state and INTERM-state for 500 cycles. (c) Measurement stability process and (d) Retention time characteristics under the three different states for 10 h. All results were tested from the multilevel ITO/PVK:Ag NPs 6 wt%/Al memory device.

conduction model and direct tunneling model, respectively. Based on the experimental results, the device exhibited a type of non-volatile rewritable memory: data could be retrieved even after the applied voltage was turned off and back on again. Moreover, the retention time test showed that the fabricated multilevel memory device could retain conductivity in the OFF-state, ON-state and INTERM-state without much deterioration.

Acknowledgments

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (grant number: A118-0260-080).

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.197>.

References

- [1] C. Wu, F. Li, T. Guo, T.W. Kim, Controlling memory effects of three-layer structured hybrid bistable devices based on graphene sheets sandwiched between two laminated polymer layers, *Org. Electron.* 13 (2012) 178.
- [2] Y. Sun, J. Lu, C. Ai, et al., Multilevel resistive switching and nonvolatile memory effects in epoxy methacrylate resin and carbon nanotube composite films, *Org. Electron.* 32 (2016) 7.
- [3] S.S. Kim, W.J. Cho, C.G. Ahn, et al., Fabrication of fin field-effect transistor silicon nanocrystal floating gate memory using photochemical vapor deposition, *Appl. Phys. Lett.* 88 (2006) 223502.
- [4] C.H.V.V. Ramana, M.K. Moodley, V. Kannan, et al., Solution based-spin cast processed organic bistable memory device, *Solid State Electron.* 81 (2013) 45.
- [5] Z. Ma, C. Wu, D.U. Lee, et al., Carrier transport and memory mechanisms of multilevel resistive memory devices with an intermediate state based on double-stacked organic/inorganic nanocomposites, *Org. Electron.* 28 (2016) 20.
- [6] K. Onlaor, T. Thiawong, B. Tunhoo, Bi-stable switching behaviors of ITO/EVA: ZnO NPs/ITO transparent memory devices fabricated using a thermal roll lamination technique, *Org. Electron.* 31 (2016) 19.
- [7] Z.L. Tseng, P.C. Kao, M.F. Shih, et al., Electrical bistability in hybrid ZnO nanorod/polymethylmethacrylate heterostructures, *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 212103.
- [8] Gang Liu, Qi-Dan Ling, Eric Yeow Hwee Teo, et al., Electrical conductance tuning and bistable switching in poly(Nvinylcarbazole)-carbon nanotube composite films, *ACS Nano* 3 (2009) 1929.
- [9] Z.X. Lima, K.Y. Cheong, Effects of drying temperature and ethanol concentration on bipolar switching characteristics of natural aloe vera-based memory devices, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 00 (2015) 1.
- [10] Y.C. Chen, H.C. Yu, C.Y. Huang, et al., Nonvolatile bio-memristor fabricated with egg albumen film, *Sci. Rep.* 5 (2015) 10022.
- [11] C. Ye, Q. Peng, M. Li, et al., Multilevel conductance switching of memory device through photoelectric effect, *J. Am. Chem. Soc.* 134 (2012) 20053.
- [12] H. Li, Q. Xu, N. Li, et al., A small-molecule-based ternary data-storage device, *J. Am. Chem. Soc.* 132 (2010) 5542.
- [13] J.S. Lee, Y.M. Kim, J.H. Kwon, et al., Multilevel data storage memory devices based on the controlled capacitive coupling of trapped electrons, *Adv. Mater.* 23 (2011) 2064.
- [14] W. Hu, L. Zou, C. Gao, et al., High speed and multi-level resistive switching capability of Ta₂O₅ thin films for nonvolatile memory application, *J. Alloy. Comp.* 676 (2016) 356.
- [15] C. Simao, M. Mas-Torrent, J. Casado-Montenegro, et al., A three-state surface-confined molecular switch with multiple channel outputs, *J. Am. Chem. Soc.* 133 (2011) 13256.
- [16] C.M. Tran, H. Sakai, Y. Kawashima, et al., Multi-level non-volatile organic transistor-based memory using lithium-ion-encapsulated fullerene as a charge trapping layer, *Org. Electron.* 45 (2017) 234.
- [17] D.Y. Yun, T.W. Kim, Nonvolatile memory devices based on Au/graphene oxide nanocomposites with bilateral multilevel characteristics, *Carbon* 88 (2015) 26.
- [18] J.C. Wang, K.P. Chang, C.H. Liao, et al., Low-damage NH₃ plasma treatment on SiO₂ tunneling oxide of chemically-synthesized gold nanoparticle nonvolatile memory, *Curr. Appl. Phys.* 16 (2016) 605.
- [19] P.C. Ooi, K.C. Aw, W. Gao, et al., An optically transparent and flexible memory with embedded gold nanoparticles in a polymethylsilsequioxane dielectric, *Thin Solid Films* 544 (2013) 597.
- [20] A.I. Ayesh, S. Qadri, V.J. Baboo, et al., Nano-floating gate organic memory devices utilizing Ag–Cu nanoparticles embedded in PVA-PAA-glycerol polymer, *Synthetic Met.* 183 (2013) 24.
- [21] Krishna Rajan, Sergio Bocchini, Annalisa Chiappone, et al., Spin-coated silver nanocomposite resistive switching devices, *Microelectron. Eng.* 168 (2017) 27.
- [22] S. Gao, F. Zeng, C. Chen, et al., Conductance quantization in a Ag filament-based polymer resistive memory, *Nanotechnology* 24 (2013) 335201.
- [23] P.Y. Lai, J.S. Chen, Electrical bistability and charge transport behavior in Au nanoparticle/poly (N-vinylcarbazole) hybrid memory devices, *Appl. Phys. Lett.*

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 93 (2008) 153305.
- [24] B. Cho, T.W. Kim, M. Choe, et al., Unipolar nonvolatile memory devices with composites of poly(9-vinylcarbazole) and titanium dioxide nanoparticles, *Org. Electron.* 10 (2009) 473.
- [25] Q. Zhang, J. Pan, X. Yi, L. Li, S. Shang, Nonvolatile memory devices based on electrical conductance tuning in poly(N-vinylcarbazole)-graphene composites, *Org. Electron.* 13 (2012) 1289.
- [26] F.C. Chiu, A review on conduction mechanisms in dielectric films, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014 (2014), 578168.
- [27] Q.D. Ling, D.J. Liaw, C. Zhu, D.S.H. Chan, E.T. Kang, K.G. Neoh, Polymer electronic memories: materials, devices and mechanisms, *Progr. Polym. Sci.* 33 (2008) 917.
- [28] Z. Ji, Q. Mao, W. Ke, Effects of oxygen partial pressure on resistive switching characteristics of ZnO thin films by DC reactive magnetron sputtering, *Solid State Commun.* 150 (2010) 1919–1922.
- [29] J.M. Beebe, B.S. Kim, J.W. Gadzuk, C.D. Frisbie, J.G. Kushmerick, Transition from direct tunneling to field emission in metal-molecule-metal junctions, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 026801.
- [30] B.K. Sarker, S.I. Khondaker, Thermionic emission and tunneling at carbon nanotube/organic semiconductor interface, *ACS Nano* 6 (2012) 4993.
- [31] K. Onlaor, T. Thiwawong, B. Tunhoo, Electrical switching and conduction mechanisms of nonvolatile write-once-read-many-times memory devices with ZnO nanoparticles embedded in polyvinylpyrrolidone, *Org. Electron.* 15 (2014) 1254.
- [32] M. Houshmand, H. Esmaili, M. Hossein Zandi, Nima E. Gorji, Degradation and device physics modeling of TiO₂/CZTS ultrathin film photovoltaics, *Mater. Lett.* 157 (2015) 123.
- [33] M.K. Hota, M.K. Bera, B. Kundu, S.C. Kundu, C.K. Maiti, A natural silk fibroin protein-based transparent bio-memristor, *Adv. Funct. Mater.* 22 (2012) 4493.
- [34] L. Zhou, M.R. Zachariah, Size resolved particle work function measurement of free nanoparticles: aggregates vs. spheres, *Chem. Phys. Lett.* 525–526 (2012) 77.
- [35] J. Jang, V. Subramanian, Effect of electrode material on resistive switching memory behavior of solution-processed resistive switches: realization of robust multi-level cells, *Thin Solid Films* 625 (2017) 87.
- [36] J.C. Ribierre, T. Aoyama, T. Muto, P. André, Hybrid organic–inorganic liquid bistable memory devices, *Org. Electron.* 12 (2011) 1800.
- [37] K. Nagashima, H. Koga, U. Celano, et al., Cellulose nanofiber paper as an ultra flexible nonvolatile memory, *Sci. Rep.* 4 (2014) 5532.
- [38] C.H.V.V. Ramana, M.K. Moodelya, V. Kannan, et al., Fabrication of stable low voltage organic bistable memory device, *Sens. Actuators B* 161 (2012) 684.
- [39] Y. Xia, W. He, L. Chen, et al., Field-induced resistive switching based on space-charge-limited current, *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 022907.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล นายกรกช อ่อนละออ
ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2554
วิทยาศาสตรบัณฑิต	สาขาฟิสิกส์ประยุกต์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2550

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ Thin film technology and nanomaterials
Nanoelectronic devices
Memory devices

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับนานาชาติ)

Document title	Authors	Year Source
Multilevel conductance switching and carrier transport mechanisms of memory devices based on an ITO/PVK:Ag nanoparticles/Al structure	Onlaor, K., Thiwawong, T., Tunhoo, B.	2018 Journal of Alloys and Compounds 732, pp. 880
The influence of annealing temperature on structural properties of zinc oxide nanoparticles synthesized by precipitation method	Chaithanatkun, N., Onlaor, K., Tunhoo, B.	2017 Key Engineering Materials 728, pp. 215
Humidity sensor based on graphene oxide film prepared by simple drop-casting process	Songkeaw, P., Onlaor, K., Tunhoo, B.	2017 Key Engineering Materials 728, pp. 199-203
Modification of structural and vibrational properties of ZnO nanoparticles prepared by simple chemical precipitation method	Chaithanatkun, N., Onlaor, K., Thiwawong, T., Tunhoo, B.	2016 Key Engineering Materials 675-676, pp. 138-141
Supercapacitive properties of cobalt oxide thin films prepared by electrostatic spray deposition technique at different substrate temperature	Chansaengsri, K., Onlaor, K., Thiwawong, T., Tunhoo, B.	2016 Key Engineering Materials 675-676, pp. 261-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Document title	Authors	Year Source
Electrical mechanisms of bi-stable memory devices based on an Al/PVK:ZnO NPs/ITO structure with different ZnO NPs annealing temperatures	Onlaor, K., Chaithanatkun, N., Tunhoo, B.	2016 Current Applied Physics 16(10), pp. 1418
Bi-stable switching behaviors of ITO/EVA:ZnO NPs/ITO transparent memory devices fabricated using a thermal roll lamination technique	Onlaor, K., Thiwawong, T., Tunhoo, B.	2016 Organic Electronics 31, pp. 19
Electrical switching and conduction mechanisms of nonvolatile write-once-read-many-times memory devices with ZnO nanoparticles embedded in polyvinylpyrrolidone	Onlaor, K., Thiwawong, T., Tunhoo, B.	2014 Organic Electronics 15(6), pp. 1254-1262
Electrical bistable properties of copper phthalocyanine at different deposition rates	Onlaor, K., Tunhoo, B., Keeratithiwakorn, P., Thiwawong, T., Nukeaw, J.	2012 Solid-State Electronics 72, pp. 60-66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้