

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและกลไกการสวิตช์แบบสองสถานะ
ของอุปกรณ์หน่วยความจำจากสารอินทรีย์-อนินทรีย์

STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS AND BISTABLE
SWITCHING MECHANISMS OF ORGANIC-INORGANIC
MEMORY DEVICE



T121445

กรรข อ่อนละอ
KORAKOT ONLAOR

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 121445
วัน, เดือน, ปี 10 ก.ค. 2555

b. 1241204
i.

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-NT-D-001-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS AND BISTABLE
SWITCHING MECHANISMS OF ORGANIC-INORGANIC
MEMORY DEVICE**



**A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2012

KMITL-2012-NT-D-001-001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและกลไกการสวิตช์แบบสองสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำจากสารอินทรีย์-อนินทรีย์

Thesis Title Study of Electrical Characteristics and Bistable Switching Mechanisms of Organic – Inorganic Memory Device

นักศึกษา นายกรกช อ่อนละออ

รหัสประจำตัว 51614251




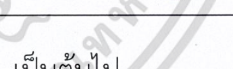
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.เบญจพล ตันฮู้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-NT-D-001-001

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
ดร.เบญจพล	ตันฮู้	
ดร.ปิติพร	ถนอมงาม	
ดร.ทุติยาภรณ์	ทิววงศ์	
น.ต. ดร.ดอน	คล้ายทับทิม	

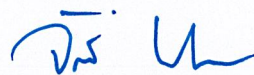
วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 27 เมษายน พ.ศ. 2555 เวลา 13.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิรินธร ชั้น 1 ห้องประชุมนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว)

คณบดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่.....เดือน.....ปี.....พ.ศ.2555 การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและกลไกการสวิตช์แบบสองสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำจากสารอินทรีย์-อนินทรีย์

นักศึกษา

นายกรกช อ่อนละอ

รหัสประจำตัว

51614251

ปริญญา

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2555

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. เบญจพล ต้นอู๋

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่มีโครงสร้างแบบสารอินทรีย์ชั้นเดียว และในโครงสร้างแบบสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์สามชั้นที่มีชั้นอลูมิเนียมเป็นชั้นกลาง โดยโครงสร้างทั้งสองจะถูกเตรียมด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศและทำการตรวจสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์แบบสองสถานะจะแสดงสมบัติการนำทางไฟฟ้าได้เป็นสถานะเปิดกับสถานะปิด ซึ่งมีอัตราส่วนของค่ากระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นอยู่ในช่วง 10^2 - 10^4 สำหรับโครงสร้างแบบสารอินทรีย์ชั้นเดียวสารอินทรีย์ที่ใช้ศึกษาคือ คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ (CuPc) พบว่าที่อัตราการระเหยสารสูงตัวอุปกรณ์จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้อย่างชัดเจนและอัตราส่วนของค่ากระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดของอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการระเหยสารของชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์เพิ่มขึ้น และจากการตรวจสอบความเป็นผลึกของฟิล์มด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากข้อบกพร่องของผลึกในชั้นฟิล์มคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่มีบทบาทสำคัญในการดักจับและปลดปล่อยพาหะในตัวอุปกรณ์ สำหรับโครงสร้างแบบสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์สามชั้นที่มีชั้นอลูมิเนียมเป็นชั้นกลางโดยมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใช้ศึกษาคือ tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq_3) และ ซิงค์ซีลีไนด์ ($ZnSe$) ตามลำดับ พบว่าสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นอลูมิเนียมชั้นกลางซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นกักอิเล็กตรอน โดยบทบาทสำคัญของชั้นซิงค์ซีลีไนด์ คือ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมส่งผ่านไปยังชั้นกักอิเล็กตรอนได้โดยง่ายเนื่องจากแถบพลังงานการนำของสารซิงค์ซีลีไนด์มีค่าใกล้เคียงฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม สำหรับกลไกในการนำทางไฟฟ้าทั้งในสถานะเปิดและสถานะปิดของอุปกรณ์แบบสองสถานะได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้รูปแบบทางทฤษฎีการนำทางไฟฟ้าซึ่งสามารถเสนอได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมไดนามิกส์ชั้น, การนำไฟฟ้าแบบโอห์มมิก และกระบวนการในการดักจับและปลดปล่อย พหุเพราะเนื่องจากความบกพร่องของโครงสร้างในชั้นทำงาน สำหรับโครงสร้างจากสารอินทรีย์- สารอนินทรีย์แบบสามชั้นบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นยังคงแสดงสมบัติ ทางไฟฟ้าแบบสองสถานะ และในการทดสอบประสิทธิภาพของการ โค้งงอ ฐานรองรับได้มีการ โค้งในทิศทางและเว้าโดยมีระยะการ โค้งจากขอบถึงขอบมากที่สุดที่ระยะ 34 มิลลิเมตร นอกจากนี้ อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบสามชั้นจะมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นสารอินทรีย์ซิงค์ซิติไลน์ที่อยู่ด้านบนจะทำหน้าที่เป็นชั้นห่อหุ้มให้กับตัวอุปกรณ์ ยิ่งไปกว่านั้นอุปกรณ์ในโครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ที่เก็บไว้โดยไม่มี การห่อหุ้มเป็นเวลานานกว่าหนึ่งปียังคงแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้ แสดงให้เห็นว่า สารอินทรีย์ซิงค์ซิติไลน์สามารถนำไปใช้เป็นชั้นที่ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์โดยทำหน้าที่ เป็นชั้นปกป้อง

คำสำคัญ: หน่วยความจำจากสารอินทรีย์, อุปกรณ์แบบสองสถานะ, กลไกการสวิตช์



Thesis title	Study of electrical characteristics and bistable switching mechanisms of organic-inorganic memory device
Student	Mr. Korakot Onlaor
Student ID	51614251
Degree	Doctor of Philosophy
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2012
Thesis Advisor	Dr. Benchapol Tunhoo

Abstract

This thesis is a study of the electrical characteristics of bistable memory devices, for organic single layer structure and organic-inorganic trilayer structure. The bistable devices were prepared by thermal evaporation technique and the electrical characteristics of the device were investigated. The electrical properties of the bistable device exhibit two electrical states as low (OFF state) and high (ON state) conductivity with ON/OFF current ratio approximately 10^2 - 10^4 . For the single layer structure, copper phthalocyanine (CuPc) layer was deposited at different deposition rate. Structural parameters such as the crystalline size of CuPc films and dislocation density can be calculated from XRD spectra. The devices at high deposition rate clearly show electrical bistable behavior. The ON/OFF current ratio of the device increases with increasing the deposition rate of CuPc layer. It is found that the defect in the CuPc layer plays a critical role of carrier trapping and de-trapping in the device. In case of the organic-inorganic bistable devices based on tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃) and zinc selenide (ZnSe) with the trilayer structure of Alq₃/aluminum (Al)/ZnSe. The devices showed a current bistability due to the existence of the Al middle layer, indicative of charge storage in the Al layer. In case of the organic-inorganic trilayer structure, the ZnSe layer may be led to improve the lifetime property of the bistable device which acted as a self-encapsulating layer. The conduction mechanism in both ON and OFF states of the bistable device was analyzed by theoretical model, which can be proposed as a possible thermionic emission, ohmic conduction and trap center of the carrier trapping and de-trapping process by structural defects in active layer. For a flexible organic-inorganic bistable device, the device showed bistable switching behavior. To explore the influence of bending on flexible device performance, the substrates were bended during

operation, up to a convex and concave distance of 34 mm. Moreover, the organic-inorganic bistable device was kept at one year in ambient condition without encapsulation. The device still exhibited the electrical bistable behavior.

Keywords: Organic memory, Bistable device, Switching mechanism



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เบญจพล ต้นธุ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จิติ หนูแก้ว, นาวาอากาศตรี ดร. คอน คล้ายทับทิม, ดร. ปิติพร ถนอมงาม และ ดร. ทศยาภรณ์ ทิววงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำชี้แนะและการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ศูนย์วิจัยทางนาโนสเกลฟิสิกส์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้ทุนในการศึกษา รวมถึงทุนในการทำวิจัยขอขอบคุณเพื่อน ๆ และ พี่ ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

ขอขอบคุณ มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์ไทย (Thailand Toray Science Foundation) ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคออร์แกอิลิเคตรอน

ขอขอบคุณ สถาบันนิติวิทยาศาสตร์ สำหรับการวิเคราะห์พันธะของสารประกอบด้วยเทคนิค FT-IR

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพ ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังซึ่งเป็นสถานที่ถ่ายทอดความรู้แก่ข้าพเจ้า

กรกช อ่อนละออ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XII
สารบัญรูป	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	3
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 หน่วยความจำนาโน	5
2.1.1 หน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวน	7
2.1.2 หน่วยความจำจากพอลิเมอร์	9
2.1.3 สิ่งประดิษฐ์เชิงตรรกะนาโน	9
2.2 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ	10
2.3 กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ	13
2.3.1 โครงสร้างแบบชั้นเดียว	14
2.3.2 โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโน	15
2.3.3 โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะเป็นชั้นกลาง	17
2.4 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ของรอยสัมผัส โลหะกับสารกึ่งตัวนำ	19
2.5 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	20
2.5.1 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อน ก่อนการสัมผัส	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อน	
หลังการสัมผัส.....	21
2.5.3 บริเวณปลอดพาหะ.....	22
2.6 การฉีดกระแสในสารกึ่งตัวนำ.....	23
2.7 การเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	26
2.8 การดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	27
2.8.1 Hopping Band Tails.....	27
2.8.2 การเกิดสถานะดักจับ.....	28
2.9 อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อน.....	30
2.9.1 วงจรที่มีตัวต้านทาน (R) เพียงอย่างเดียว.....	31
2.9.2 วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำ (L) เพียงอย่างเดียว.....	32
2.9.3 วงจรที่มีตัวเก็บประจุ (C) เพียงอย่างเดียว.....	32
2.9.4 วงจรที่มีตัวต้านทาน (R) กับ ตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมกัน.....	33
2.9.5 วงจรที่มีตัวต้านทาน (R) กับ ตัวเก็บประจุ (C) ต่ออนุกรมกัน.....	35
2.9.6 วงจรที่มีตัวต้านทาน (R) กับ ตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานกัน.....	37
2.9.7 ลักษณะของวงจรสมมูลในการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์.....	38
2.10 สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation).....	41
2.11 การเกิดฟิล์มบาง (Nucleation and Growth).....	44
2.12 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....	46
2.12.1 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	46
2.12.2 การวิเคราะห์สมบัติทาง โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	49
2.12.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคออร์บิทัลอิเล็กตรอน.....	52
2.12.4 การวิเคราะห์พันธะของสารประกอบด้วยเทคนิค Fourier-Transform Infrared.....	54
2.13 การตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ.....	56
2.13.1 ความเป็นฮิสเทอรีซิส.....	56
2.13.2 กลไกการนำกระแส.....	57

VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13.3 ความสามารถในการทำซ้ำ.....	58
2.13.4 เสถียรภาพ.....	58
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	60
3.1 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	61
3.1.1 ภายในห้องสุญญากาศ.....	62
3.2 กระบวนการกัดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ (ITO).....	66
3.3 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ.....	66
3.3.1 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกเคลือบ ITO.....	66
3.3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์.....	66
3.3.3 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ polyethylene terephthalate (PET).....	67
3.4 การสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	67
3.4.1 การปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์ททาโลไซยาไนน์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	67
3.4.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านบนด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	68
3.5 การสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น.....	69
3.5.1 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านล่างด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	70
3.5.2 การปลูกฟิล์มบาง Alq ₃ ชั้นที่หนึ่งและอลูมิเนียมชั้นกลางด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	71
3.5.3 การปลูกฟิล์มบาง Alq ₃ เป็นชั้นที่สามด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	72
3.5.4 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซิติไนน์เป็นชั้นที่สามด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	72
3.5.5 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านบนด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	73
3.6 การศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านต่าง ๆ.....	74

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะ.....	74
3.6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	75
3.6.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	76
3.6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	76
3.6.5 การวิเคราะห์พันธะของสารประกอบด้วยเทคนิค FT-IR.....	77
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	78
4.1 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	78
4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	79
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์.....	80
4.1.3 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์ฟทาโลไซยา- ไนน์ที่อัตราการระเหยแตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	83
4.1.4 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสอง สถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	85
4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสอง สถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	87
4.1.6 ผลการวิเคราะห์วงจรมูลของอุปกรณ์ที่เตรียมจาก อัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s.....	89
4.1.6.1 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ของอุปกรณ์ ที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s.....	89
4.1.6.2 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ ของอุปกรณ์ที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s.....	89
4.1.7 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s.....	92
4.2 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น Alq ₃ /Al/Alq ₃	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/Alq_3$	94
4.2.2 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/Alq_3$	96
4.2.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/Alq_3$ ที่เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอลูมิเนียม	101
4.2.4 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชั้นอลูมิเนียมที่ความหนาแตกต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	103
4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและพันธะของสารประกอบ	104
4.3 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$..	105
4.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$	106
4.3.2 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$	108
4.3.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	111
4.3.4 ผลการตรวจสอบสมบัติความจุทางไฟฟ้าและแรงดันของอุปกรณ์ หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$	112
4.3.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$	113
4.4 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับ PET ที่สามารถโค้งงอได้	114
4.4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบ สองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับ PET ในลักษณะแบนราบ	115

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หลักการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบ สองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับ PET ในลักษณะแบนราบ.....	116
4.4.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับ PET ภายใต้การโค้งงอ.....	117
4.5 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะของ โครงสร้าง $Alq_3/Al/Alq_3$ กับ $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับกระจก.....	120
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	124
เอกสารอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างและความหมายของเซลล์มาตรฐานสำหรับหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ	5
2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ และความต้องการต่ำสุดของค่าทางกายภาพและไฟฟ้า	6
2.3 สรุปตัวอย่างผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ	11
2.4 ตัวอย่างกระบวนการนำของพาหะ	25
4.1 ตัวแปรทางโครงสร้าง (ขนาดเม็ดผลึก, ความหนาแน่นของอะตอมที่ขาดหายไป และความเครียดแลตติซ) ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ในอัตรากระเหยแตกต่างกัน	81
4.2 เปรียบเทียบขนาดเม็ดผลึกที่ได้จาก XRD และ AFM	84
4.3 ค่าความต้านทานและความจุของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวสำหรับสถานะเปิดและสถานะปิด	91
4.4 ค่าแรงดันขีดเริ่มและอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด ที่ความหนาของชั้น Alq_3 แตกต่างกัน	95
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) จากการฟิตข้อมูลเข้ากับสมการของกระแสและแรงดันในสถานะปิดที่ความหนาของชั้น Alq_3 แตกต่างกัน	99
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) จากการฟิตข้อมูลเข้ากับสมการของกระแสและแรงดันในสถานะเปิดที่ความหนาของชั้น Alq_3 แตกต่างกัน	99
4.7 ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมแตกต่างกันที่แรงดัน +1 โวลต์	102
4.8 ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่ความหนาของชั้นซิงค์ซีลีไนน์แตกต่างกันที่แรงดัน +1 โวลต์	107
4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) จากการฟิตข้อมูลเข้ากับสมการของกระแสและแรงดัน ที่ความหนาของชั้นซิงค์ซีลีไนน์แตกต่างกัน	111
4.10 ขั้นตอนการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกันจากระยะ $d=42$ mm ถึง $d=34$ mm	117

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (ก) เซิงเส้น และ (ข) ลอการิทึม..... 8
2.2	(ก) โครงสร้างที่มีชั้นโลหะกึ่งกลาง และ (ข) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน..... 8
2.3	(ก) โครงสร้างแบบชั้นเดียว, (ข) โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโน และ (ค) โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นฟิล์มโลหะบาง ๆ ถูกแทรกไว้..... 10
2.4	(ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์ หน่วยความจำแบบสองสถานะสำหรับโครงสร้างชั้นเดียว..... 14
2.5	(ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์ สำหรับโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโน..... 16
2.6	(ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์ สำหรับโครงสร้างสามชั้นที่มีชั้นโลหะบาง ๆ แทรก..... 17
2.7	(ก) โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นฟิล์มโลหะแทรก (ข) การเกิดเป็นชั้นของโลหะ ออกไซด์ล้อมรอบอนุภาคโลหะ และ (ค) กลไกการทำงานของอุปกรณ์..... 18
2.8	ระดับพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส..... 20
2.9	ระดับพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำหลังการสัมผัส..... 21
2.10	ระดับพลังงานของ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และของ โลหะกับสาร กึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ภายใต้เงื่อนไขการไบแอสที่แตกต่างกัน (ก) สมดุลความร้อน (ข) ไบแอสตรง และ (ค) ไบแอสย้อนกลับ..... 23
2.11	สี่ขั้นตอนพื้นฐานในการขนส่งพาหะเมื่อมีการไบแอสตรง..... 24
2.12	การกระจายของระดับพลังงาน HOMO และ LUMO ในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์อะมอร์ฟัส..... 26
2.13	(ก) โอกาสที่พาหะจะกระโดดและหลุดไปยังสถานะของพลังงานที่ทำให้เกิดการ เคลื่อนที่ และ (ข) สถานะในการดักจับปกติของสารกึ่งตัวนำและสถานะที่เพิ่มเข้ามา..... 28
2.14	การเกิดคู่ geminate ระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอนของรอยต่อเฮเทอโรโรในสารกึ่งตัวนำ..... 29
2.15	อิมพีแดนซ์ของ R, L และ C แบบเวกเตอร์..... 31
2.16	(ก) วงจร RL อนุกรม (ข) ไดอะแกรมของรูปคลื่น และ (ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรม..... 34
2.17	ที่มาของอิมพีแดนซ์ไดอะแกรม..... 35
2.18	(ก) วงจร RC อนุกรม (ข) ไดอะแกรมของรูปคลื่น และ (ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรม..... 35
2.19	ที่มาของอิมพีแดนซ์ไดอะแกรม..... 37
2.20	(ก) วงจร RC ขนาน (ข) ไดอะแกรมรูปคลื่น และ (ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรม..... 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 (ก) วงจรมีตัวต้านทานอย่างเดียว และ (ข) กราฟ Cole-Cole ที่มีจุดบนแกน x	38
2.22 (ก) วงจรมีตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว (ข) กราฟ Cole-Cole ที่มีจุดบนแกน +y และ (ค) กราฟ Cole-Cole จะมีจุดบนแกน -y	39
2.23 (ก) วงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน (ข) กราฟ Cole-Cole ที่มีจุดบนแกน x สำหรับตัวต้านทาน และมีจุดบนแกน +y สำหรับตัวเก็บประจุ และ (ค) กราฟ Cole-Cole ของวงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน	40
2.24 (ก) วงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่อขนานกัน และ (ข) กราฟ Cole-Cole ของวงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่อขนานกัน	40
2.25 (ก) วงจรมีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (ข) กราฟ Cole-Cole จะมีจุดบนแกน x สำหรับตัวต้านทานและมีจุดในลักษณะเป็นครึ่งวงกลมในระนาบ สำหรับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ และ (ค) กราฟ Cole-Cole ของวงจรมีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ	41
2.26 (ก) สมบัติของกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และ (ข) กราฟอาร์เรเนียส	44
2.27 การเกิดนิวคลีเอชันและการเจริญเติบโตจากการทับถมของอะตอมที่ดี	45
2.28 (ก) การเกิดนิวคลีเอชันของตำแหน่งผลึก (ข) การเจริญเติบโตของผลึกจากการทับถม และ (ค) ผลึกที่ผิดปกติจากการเจริญเติบโตและเกิดเป็นขอบของผลึก	46
2.29 ภาพถ่าย SEM ของคานและปลายเข็มที่ใช้ในการวัด	46
2.30 (ก) ระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน และ (ข) ระบบการวัดของ AFM	47
2.31 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law)	49
2.32 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) แบบเสริมกัน และ (ข) แบบหักล้างกัน	49
2.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	51
2.34 การเกิดออกเจอร์อิเล็กทรอนิกส์	53
2.35 การสั่นแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะทำการตรวจวัด FT-IR	55
2.36 ตัวอย่างสเปกตรัมจาก FT-IR ของชั้นโลหะอลูมิเนียมที่มีอัตราการทับถมต่ำ	55
2.37 การหาค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ	56
2.38 ส่วนหนึ่งของกลไกการนำในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ (ก) สเปนเซอร์จิ้ง (ข) เทอร์โม โอนิกอิมิสชัน (ค) Pool-Frenkel อิมิสชัน และ (ง) การทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordhem	57

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.39 การทดสอบสมบัติการ อ่าน-เขียนซ้ำ (ก) ลักษณะพัลส์ และ (ข) จำนวนครั้ง	58
2.40 การทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ	59
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	60
3.2 ระบบระเหยสารด้วยความร้อน	61
3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารด้วยความร้อน	62
3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์	63
3.5 จานระเหยสารอินทรีย์และโลหะ	63
3.6 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์	63
3.7 อุปกรณ์ส่วนล่างภายในห้องสุญญากาศ	64
3.8 อุปกรณ์ส่วนบนภายในห้องสุญญากาศ	64
3.9 ผลึกควอตซ์สำหรับตรวจวัดความหนา (ก) ด้านหลัง และ (ข) ด้านหน้า	65
3.10 อุปกรณ์แสดงผลความหนาของฟิล์มบาง	65
3.11 แผ่นฐานรองรับ ITO ที่ถูกปิดด้วยหน้ากาก	66
3.12 (ก) ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยสาร CuPc	68
3.13 (ก) ฟิล์มบาง CuPc บนกระจก ITO และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยชั้น Al	68
3.14 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่มีพื้นที่ทำงาน 4 ตารางมิลลิเมตร	69
3.15 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบชั้นเดียว	69
3.16 แผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ถูกปิดด้วยหน้ากาก	70
3.17 (ก) ขั้วไฟฟ้าด้านล่างบนกระจก และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยชั้น Alq ₃ /Al	71
3.18 (ก) ฟิล์มบาง Alq ₃ /Al บนขั้วไฟฟ้า และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยชั้น ZnSe	72
3.19 (ก) ฟิล์มบาง 3 ชั้น บนขั้วไฟฟ้า และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยชั้น Al	73
3.20 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีพื้นที่ทำงาน 9 ตารางมิลลิเมตร	73
3.21 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะแบบสามชั้น (ก) Alq ₃ /Al/Alq ₃ (ข) Alq ₃ /Al/ZnSe และ (ค) Alq ₃ /Al/ZnSe บนฐานรองรับพลาสติก PET	74
3.22 เครื่องมือวัดสมบัติทาง ไฟฟ้า Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter	75
3.23 ชุดทดสอบความสามารถในการ อ่าน-เขียน และเสถียรภาพของอุปกรณ์	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 เครื่อง XRD ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Discover with GADDS	76
3.25 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของบริษัท Seiko รุ่น SPA-400	76
3.26 เครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES) รุ่น PHI 700	77
3.27 เครื่อง FT-IR รุ่น Nicolet NEXUS 670FT-IR	77
4.1 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ และ (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำ ในโครงสร้างแบบชั้นเดียว	79
4.2 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้าง แบบชั้นเดียว ที่อัตราการระเหย (ก) 0.01 nm/s, (ข) 0.1 nm/s, (ค) 0.5 nm/s และ (ง) 1.0 nm/s	80
4.3 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบาง CuPc ที่อัตราการระเหยสารแตกต่างกัน	81
4.4 ภาพจาก AFM ของฟิล์มบาง CuPc ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ในอัตราการระเหยสาร (ก) 0.01 nm/s, (ข) 0.1 nm/s, (ค) 0.5 nm/s และ (ง) 1.0 nm/s	83
4.5 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะของ โครงสร้างแบบชั้นเดียว ที่อัตราการระเหยของชั้น CuPc (ก) 0.1 nm/s, (ข) 0.5 nm/s, และ (ค) 1.0 nm/s ในรูปลอการิทึมสองแกน	85
4.6 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้าง แบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในอัตราการระเหยชั้น CuPc (ก) 0.1 nm/s, (ข) 0.5 nm/s, (ค) 1.0 nm/s และ (ง) กราฟอาร์เรเนียสที่เป็นส่วนกลับของอุณหภูมิใน สถานะปิด ที่แรงดัน +3 โวลต์	88
4.7 ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ไบอัสที่ +3 โวลต์ ในสถานะเปิดและสถานะปิด	89
4.8 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ (กราฟ Cole-Cole) โดยไบอัสที่ แรงดันอ่านค่า +3 โวลต์ ในสถานะเปิดและสถานะปิด	91
4.9 วงจรสมมูลของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียว	91
4.10 (ก) เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน และ (ข) การอ่านข้อมูลแบบต่อเนื่องหลังการเปลี่ยนสถานะ	92
4.11 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ และ (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบสามชั้น	94

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้างแบบสามชั้น ที่ความหนาของชั้นสาร Alq ₃ แตกต่างกัน	94
4.13 ความหนาของชั้นสารอินทรีย์ Alq ₃ ที่มีผลต่อ (ก) ค่ากระแสที่สถานะเปิด และ (ข) ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ	95
4.14 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ที่ไม่มีชั้นของโลหะอลูมิเนียม	96
4.15 กลไกการเปลี่ยนสถานะ	97
4.16 กลไกการนำที่สอดคล้องกับสมบัติทางไฟฟ้าและความต่างศักย์ (ก) เทอร์โมไอออนิก อิมิสชันที่สถานะปิด และ (ข) การนำกระแสแบบโอห์มมิกที่สถานะเปิด	98
4.17 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้างแบบสามชั้นที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมแตกต่างกัน	101
4.18 ลักษณะพื้นผิวจาก AFM (500×500 nm) และการกระจายของนาโนคลัสเตอร์ ของอลูมิเนียมชั้นกลางที่ความหนา (ก) 5 nm, (ข) 10 nm, (ค) 15 nm และ (ง) 20 nm	103
4.19 สเปกตรัมจาก (ก) FT-IR และ (ข) AES	104
4.20 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ และ (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น	105
4.21 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้างแบบสามชั้น ที่ความหนาของชั้น ZnSe แตกต่างกัน	106
4.22 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะของโครงสร้าง Alq ₃ (100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm)	107
4.23 ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ	108
4.24 กลไกการนำแบบเทอร์โมไอออนิกอิมิสชันที่สถานะปิดของ โครงสร้าง Alq ₃ (100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm)	109
4.25 กลไกการนำแบบโอห์มมิกที่ (ก) สถานะเปิด และ (ข) ฝั่งแรงดันลบ ของ โครงสร้าง Alq ₃ (100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm)	110
4.26 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้าง Alq ₃ (100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ค่าความจุทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในโครงสร้าง $Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/ZnSe(100\text{ nm})$	112
4.28 (ก) เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน และ (ข) การอ่านข้อมูลแบบต่อเนื่องหลังการเปลี่ยนสถานะ	113
4.29 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับพลาสติก PET (ข) ระดับพลังงาน ของอุปกรณ์ และ (ค) ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่สามารถโค้งงอได้	114
4.30 (ก) การทดสอบค่ากระแสและแรงดันในลักษณะแบนราบ. d =ระยะห่างจากขอบถึง ขอบของอุปกรณ์ และ (ข) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำ แบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นบนฐานรองรับ PET	115
4.31 กลไกการนำของโครงสร้าง $Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/ZnSe(100\text{ nm})$ บนฐานรองรับ PET (ก) แบบเทอร์โมไอออไนซ์ชั้นที่สถานะปิด (ข) การนำแบบโอห์มมิก ที่สถานะเปิด และ (ค) การนำแบบโอห์มมิกฝั่งแรงดันลบ	116
4.32 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้าง แบบสามชั้นบนฐานรองรับ PET ทดสอบโดยการงอแบบนูนและเว้า (ก) $d=42\text{ mm}$, (ข) $d=34\text{ mm}$ และ (ค) ค่าอัตราส่วนกระแสที่การ โค้งงอแตกต่างกัน	118
4.33 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้าง แบบสามชั้นบนฐานรองรับ PET (ก) $d=40\text{ mm}$ แบบ โค้ง และ (ข) $d=40\text{ mm}$ แบบเว้า	119
4.34 เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน ภายหลังจากการ โค้งงอ	120
4.35 โครงสร้างของอุปกรณ์แบบสามชั้นบนฐานรองรับกระจก โดย (ก) มี Alq_3 อยู่ด้านบน และ (ข) มี $ZnSe$ อยู่ด้านบน	121
4.36 โครงสร้าง $Alq_3/Al/Alq_3$ (ก) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์เมื่อเก็บ ไว้ที่ อุณหภูมิห้อง และ (ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF	121
4.37 โครงสร้าง $Alq_3/Al/ZnSe$ (ก) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์เมื่อเก็บ ไว้ที่ อุณหภูมิห้อง และ (ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF	122
4.38 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์เมื่อเก็บ ไว้ที่อุณหภูมิห้องนานกว่า 1 ปี	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การย่อขนาดทรานซิสเตอร์นับวันจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเรื่อย ๆ ปัญหาจากการย่อขนาดทรานซิสเตอร์จะส่งผลกระทบต่อถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่อาศัยทรานซิสเตอร์เป็นพื้นฐานในการทำงาน โดยเฉพาะวงจรตรรกะ (logic) สำหรับการตัดสินใจ และหน่วยความจำ (memory) สำหรับการบันทึกข้อมูล [1] ปัญหาหลักของวงจรตรรกะคือ ทำอย่างไรเทคโนโลยี CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) จึงจะสามารถถูกย่อขนาดให้ขนาดทางกายภาพที่เล็กที่สุดในวงจรลดลงต่ำกว่า 45 นาโนเมตรและมีประสิทธิภาพการทำงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ไม่สามารถพึ่งการย่อขนาดทรานซิสเตอร์เพียงอย่างเดียว แต่ต้องอาศัยนวัตกรรมด้านโครงสร้างและวัสดุที่นำมาสร้างทรานซิสเตอร์ด้วย ปัญหาระยะยาวของวงจรตรรกะคือ จีดจำกัดทางธรรมชาติของการย่อขนาด เนื่องจากจะไม่สามารถย่อขนาดทรานซิสเตอร์ให้เล็กไปกว่าอะตอมของซิลิคอน (Si) หนึ่งอะตอมได้ ดังนั้นจึงมีคำถามว่า จะมีเทคโนโลยีใดที่สามารถเข้ามาแทนที่เทคโนโลยีบน Si ได้

สำหรับปัญหาหลักของหน่วยความจำคือ จะทำอย่างไรจึงจะสร้างหน่วยความจำชนิดใหม่ที่ผนวกข้อดีของหน่วยความจำชนิดลบเลือนได้ (volatile) และชนิดลบเลือนไม่ได้ (nonvolatile) เข้าไว้ด้วยกัน ข้อดีของหน่วยความจำชนิดลบเลือนได้คือ มีความจุสูงและสามารถเข้าถึงข้อมูลได้เร็ว แต่ข้อเสียคือต้องอาศัยไฟเลี้ยงตลอดเวลา ในทางตรงกันข้าม หน่วยความจำชนิดลบเลือนไม่ได้ มีข้อดีคือ สามารถเก็บข้อมูลไว้ได้นานแม้ไม่มีไฟเลี้ยง แต่มีข้อเสียคือเข้าถึงข้อมูลได้ช้า ด้วยเหตุนี้การที่หน่วยความจำชนิดใหม่สามารถรวมเอาข้อดีของหน่วยความจำทั้งสองชนิดไว้ด้วยกัน และมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ สอดคล้องกับวงจรตรรกะ จึงเป็น โจทย์ที่ท้าทายสำหรับนักวิจัย โดยหนึ่งในโครงสร้างและวัสดุที่นักวิจัยให้ความสนใจและศึกษากันอย่างกว้างขวางในช่วงหลายปีที่ผ่านมาคือ หน่วยความจำแบบสองสถานะชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวน (insulator resistance change memory) และ หน่วยความจำแบบสองสถานะจากพอลิเมอร์ (polymer memory) หรือ จากสารอินทรีย์ (organic memory) โดยข้อได้เปรียบของหน่วยความจำทั้งสองแบบคือ มีโครงสร้างและวิธีการสร้างที่ง่าย ใช้พลังงานต่ำ และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ซึ่งลักษณะทั่วไปของหน่วยความจำประเภทนี้คือ จะมีสมบัติการนำทางไฟฟ้าได้สองสถานะที่แรงดันไฟฟ้าค่าเดียวกัน โดยพฤติกรรมที่แสดงออกมานี้สามารถพบเจอได้ในหลากหลายโครงสร้าง หลากหลายวัสดุ ทั้งพอลิเมอร์ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ [2-6] สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมา มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยความจำทั้งสองชนิดนี้ โดยในแต่ละงานวิจัยมักจะพุ่งจุดสนใจไปยัง อัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด (ON/OFF ratio) และความมีเสถียรภาพ (long-term stability) โดยทั่วไปมักจะทำการศึกษาในโครงสร้างแบบชั้นเดียวและแบบสามชั้น [6, 7]

สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่มีการศึกษาและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLEDs) [8], เซลล์แสงอาทิตย์สารอินทรีย์ (OPVs) [9] ได้แก่สารในตระกูล พทาโลไซยาไนน์ (Pc) และสาร Tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃) โดยหนึ่งในตระกูล Pc ที่น่าสนใจคือ คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ (CuPc) ซึ่งมีอะตอม Cu²⁺ อยู่ตรงกลาง และมีลักษณะทางกายภาพเป็นสีน้ำเงินเข้ม โดยได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในเรื่องของคุณสมบัติในการตรวจจับก๊าซ [10] และจากหลายๆ งานวิจัยได้บ่งบอกว่า คุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของ CuPc จะขึ้นอยู่กับความเป็นผลึกของโครงสร้าง [11] สำหรับสารอินทรีย์ Alq₃ ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับหน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น โดยมีชั้นโลหะบาง ๆ แทรกอยู่ตรงกลาง [12, 13] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารกึ่งตัวนำอินทรีย์กับอนินทรีย์ สารอินทรีย์จะมีความคล่องตัวของพาหะที่ต่ำกว่าสารอนินทรีย์ และเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับบรรยากาศ ทำให้เกิดการขาดวงจรชนิดพาหะในตัวอุปกรณ์ สำหรับโครงสร้างที่เป็น สารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ จะทำให้เกิดการขนส่งพาหะที่ดีขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ โดยหนึ่งในสารอนินทรีย์ที่น่าสนใจคือ ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe) เนื่องจากมีแถบพลังงานที่กว้าง ได้รับการรู้จักเป็นอย่างดีในด้านอุปกรณ์ทางแสงในย่านความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินถึงแสงสีเขียว อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ใช้สารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์สร้างเป็นชั้นห่อหุ้มอุปกรณ์เพื่อยืดอายุการใช้งาน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการสร้าง ศึกษา และตรวจสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ที่มีโครงสร้างแบบสารอินทรีย์ชั้นเดียว และ โครงสร้างแบบสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์สามชั้นที่มีชั้นอลูมิเนียม (Al) เป็นชั้นกลาง โดยระบบประเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ สำหรับโครงสร้างแบบสารอินทรีย์ชั้นเดียวสารที่ใช้ศึกษาคือ คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ โดยทำการเปลี่ยนอัตราการระเหยสารและทำการตรวจสอบความเป็นผลึกของฟิล์มที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในขณะที่โครงสร้างจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์สามชั้นที่มีชั้นอลูมิเนียมเป็นชั้นกลางจะมีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใช้ศึกษาคือ Alq₃ และ ซิงค์ซีลีไนด์ ตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอลูมิเนียมและทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า สำหรับกลไกการนำกระแสของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบการนำทางทฤษฎี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์โดยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
- 1.2.2 ศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ
 - โครงสร้างแบบชั้นเดียวจากสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์
 - โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์ Alq₃ โดยมีโลหะอลูมิเนียมเป็นชั้นกลาง
 - โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์ Alq₃ และสารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ โดยมีโลหะอลูมิเนียมเป็นชั้นกลาง
- 1.2.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ด้วยระบบวัดค่ากระแสและความต่างศักย์
- 1.2.4 ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลที่เกิดจากชั้นสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ
- 1.3.2 ศึกษาการทำงานของเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างขั้วโลหะของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว และแบบสามชั้น
- 1.3.4 เตรียมฟิล์มบางและขั้วโลหะด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
- 1.3.5 ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวและแบบสามชั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคและวิธีการในการระเหยสารกึ่งตัวนำ จากสารอินทรีย์-อนินทรีย์โดยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
- 1.4.2 สามารถสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียวและแบบสามชั้นได้
- 1.4.3 มีทักษะความรู้ในเครื่องมือวัดและวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง
- 1.4.5 สามารถนำข้อมูลและเงื่อนไขที่ได้ไปสู่การพัฒนาเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่มีประสิทธิภาพสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

เนื้อหาของงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนหลัก ดังนี้

- บทที่ 1: กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย
- บทที่ 2: กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ทฤษฎีการตรวจวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง และทฤษฎีการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งเป็นเป้าหมายที่สำคัญของงานวิจัยนี้
- บทที่ 3: กล่าวถึงวิธีการทดลองของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ และกล่าวถึงกระบวนการประดิษฐ์อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ รวมถึงการตรวจสอบฟิล์มบางด้วยเครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะ
- บทที่ 4: กล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ ผลของการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง และผลของการตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของอุปกรณ์
- บทที่ 5: เป็นการสรุปภาพรวมของงานวิจัยนี้ทั้งหมดทั้งในโครงสร้างแบบชั้นเดียวและแบบสามชั้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 หน่วยความจำนาโน (Nanomemory)

องค์ประกอบพื้นฐานของหน่วยความจำคือ เซลล์มูลฐาน ซึ่งสามารถจำแนกได้หลายประเภทเช่น 1T, 1T1C, 1T1R หรือ 1D1R โดยตัวเลขและตัวอักษรบ่งบอกถึงจำนวนและชนิดขององค์ประกอบย่อยที่ทำหน้าที่เป็นหนึ่งเซลล์ เช่น โหนดหนึ่งของ Dynamic Random Access Memory (DRAM) จะอาศัยการทำงานของทรานซิสเตอร์ (T) หนึ่งตัวในการอ่านและเขียนข้อมูลลงในคาปาซิเตอร์ (C) หนึ่งตัว จึงถูกจัดเป็นเซลล์ชนิด 1T1C หรือ โหนดหนึ่งของ phase change memory ที่อาศัยทรานซิสเตอร์หนึ่งตัวในการอ่านและบันทึกค่าความต้านทาน (R) หนึ่งตัว จะถูกจัดเป็นเซลล์ประเภท 1T1R สำหรับความหมายของตัวย่อและตัวอย่างของหน่วยความจำต่าง ๆ ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวย่อและความหมายของเซลล์มูลฐานสำหรับหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ [14]

Cell Element	Type	Non-volatility	Retention Time
1T1R or 1D1R [A]	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 [A]	DRAM	Volatile	~ seconds
	FeRAM	Non-volatile	> 10 years
1T [A]	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 [A]	SRAM	Volatile	large
	STTM [B]	Volatile	small

[A] 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

[B] STTM-scalable 2-transistor memory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีหน่วยความจำชนิดต่าง ๆ และความต้องการต่ำสุดของค่าทางกายภาพและไฟฟ้า [14]

		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
W/E 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 Voltage (V)	Minimum required	Application dependent	Application dependent	Application dependent	Application dependent
	Best projected	>3 V	<0.9 V	<0.5 V	Not known
	Demonstrated	\pm 6 V	\pm 6 V	0.24 V	~ \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

หน่วยความจำที่ใช้กันมากในปัจจุบันคือ DRAM และ Flash หน่วยความจำทั้งสองถูกนำไปใช้ในลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากมีคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกัน หากความจุเป็นปัจจัยสำคัญ หน่วยความจำชนิด DRAM จะได้รับความนิยมมากกว่าเนื่องจากใช้พื้นที่ต่อการเก็บข้อมูลหนึ่งบิตน้อยกว่า แต่หากความรวดเร็วในการเข้าถึงข้อมูลมีความสำคัญกว่า หน่วยความจำชนิด Flash ก็จะได้รับยอมรับมากกว่าเนื่องจากทำงานได้เร็วกว่า DRAM ในบางระบบจะมีการใช้หน่วยความจำทั้งสองประเภท สำหรับการเก็บข้อมูลชั่วคราวจะใช้ DRAM โดยข้อมูลใน DRAM จะถูกลบเลื่อนไปหากไม่มีไฟเลี้ยง แต่ข้อมูลใน Flash จะยังคงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

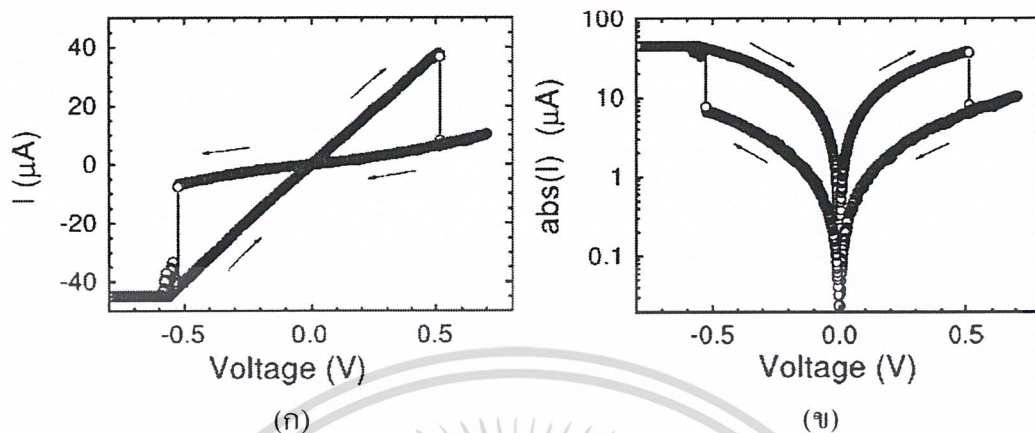
หน่วยความจำที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อเป็นอีกทางเลือกของ DRAM และ Flash ก็พยายามที่จะผนวกข้อดีของเทคโนโลยีทั้งสองไว้ด้วยกัน ตารางที่ 2.2 สรุปให้เห็นถึงสถานะของเทคโนโลยีหน่วยความจำในปัจจุบันที่มีการทำวิจัยอยู่ รวมถึงความต้องการต่ำที่สุดในการทดสอบ เช่น ความสามารถในการอ่าน-เขียน และความสามารถในการเก็บรักษาข้อมูล โดยกลไกการเก็บข้อมูลของเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่แสดงในตารางจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัสดุและโครงสร้างของสถาปัตยกรรมของแต่ละเทคโนโลยี โดยหลักการทางฟิสิกส์ที่ถูกลำมาประยุกต์ใช้ในการเก็บข้อมูลไบนารีคือ จะต้องสามารถสร้างสถานะทางไฟฟ้าหรือทางกายภาพที่เสถียรและแตกต่างกันอย่างน้อยสองสถานะได้ โดยหลักการที่ได้รับการยอมรับในขณะนี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การแยกเดี่ยวประจุโดยบริเวณที่ถูกล้อมรอบด้วยฉนวน การแยกและเก็บประจุด้วยกำแพงศักย์คู-ลอมบ์ การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน และการเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุ

หน่วยความจำเป็นเทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว บางเทคโนโลยี เช่น Floating body DRAM ถูกระบุใน International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2003 ว่าเป็นเทคโนโลยีในอนาคต แต่ปัจจุบันได้ถูกผลิตออกมาเป็นสินค้าต้นแบบแล้ว จึงมิได้ถูกจัดกลุ่มใน ITRS 2005 ว่าเป็นเทคโนโลยีในอนาคตอีกต่อไป ในขณะที่บางเทคโนโลยี เช่น single-electron memory ถูกระบุใน ITRS 2003 ว่าเป็นเทคโนโลยีในอนาคต แต่ก็ได้ถูกกำจัดออกไปจาก ITRS 2005 เนื่องจากมีความเป็นไปได้ยากที่จะนำมาใช้งานได้จริง แต่ส่วนใหญ่ก็ยังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและยังคงถูกระบุใน ITRS 2005-2011 ว่ามีศักยภาพในอนาคต โดยใน ITRS 2005-2011 ได้มีการระบุเทคโนโลยีของหน่วยความจำชนิดใหม่เข้ามาเพิ่มด้วยคือ หน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวน (insulator resistance change memory) และ หน่วยความจำจากพอลิเมอร์ (polymer memory) โดยหลักการทำงานทั่วไปของเทคโนโลยีหน่วยความจำทั้งสองชนิดโดยคร่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

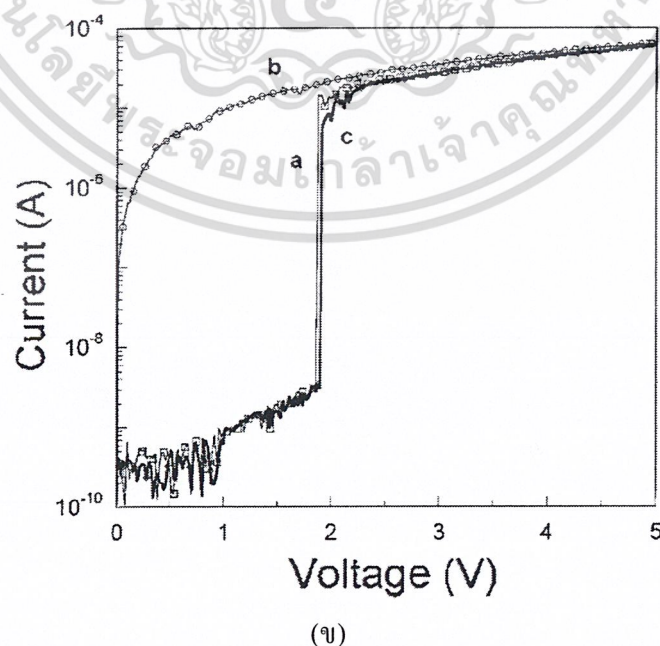
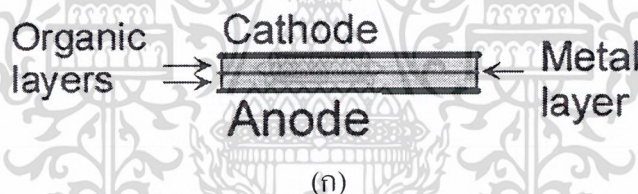
2.1.1 หน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวน

โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยความจำชนิดเปลี่ยนความต้านทานฉนวนคือ โครงสร้างแบบ โลหะ/ฉนวน/โลหะ (metal/insulator/metal: MIM) ซึ่งอาศัยหลักการฉีดกระแสผ่าน โครงสร้างแล้ว วัดกระแสรั่วที่มีลักษณะเป็นฮิสเตอรีซิส ชั้นฉนวนมักถูกสร้างจาก TiO_2 , NiO , Al_2O_3 หรือ $SrZrO_3$ ที่ถูกโคปด้วยโลหะ เช่น Cr การบันทึกข้อมูลสามารถกระทำได้โดยการป้อนค่าความต่างศักย์ให้แก่ โครงสร้าง MIM ซึ่งสามารถทำให้ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานรวมของโครงสร้าง ระหว่างสถานะความต้านทานต่ำและสูงได้ เช่น ผลการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันผ่าน โครงสร้าง $Au/SrZrO_3:Cr/SrRuO_3$ [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดย Au คือชั้นโลหะด้านบน ในขณะที่ $SrRuO_3$ คือชั้นโลหะด้านล่าง และ $SrZrO_3$ คือชั้นฉนวนที่ถูกโคปด้วย Cr สำหรับการอ่านข้อมูล

กระทำได้โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าในระดับที่ต่ำกว่าจุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของโครงสร้างแล้วทำการวัดค่ากระแส



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



รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างที่มีชั้นโลหะกั้นกลาง และ (ข) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หน่วยความจำจากพอลิเมอร์

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

2.1.3 สิ่งประดิษฐ์เชิงตรรกะนาโน

มีการคาดการณ์ว่าการย่อขนาด CMOS จะพบกับจุดที่ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ในอีกไม่กี่ปีหรือจุดที่มีความยาวของแชนแนลเท่ากับ 6 nm จุดจบของการย่อขนาดมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลักคือความคุ้มทุนในการผลิต ชิดจำกัดทางธรรมชาติ และหลักการการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่เปลี่ยนไป โดยเฉพาะปัญหาทางด้านความร้อน

สิ่งประดิษฐ์เชิงตรรกะทุกชนิดที่อาศัยการนำไฟฟ้าซึ่งเกิดจากประจุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในการทำงาน จะมีความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการย่อขนาดให้เล็กลง เนื่องจากการนำไฟฟ้าในบริเวณที่แคบจะมีสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ในอนาคตหากการพัฒนายังคงกระทำในสถาปัตยกรรม CMOS ปัญหาจากความร้อนจะทวีคูณขึ้นตามการย่อขนาด ดังนั้นวิธีหลีกเลี่ยงคือค้นหาเทคโนโลยีชนิดใหม่ที่มีหลักการการทำงานที่แตกต่างออกไปจาก CMOS โดยสิ้นเชิง แต่มีความสามารถที่ดีกว่า CMOS

ดังนั้นแรงผลักดันข้างต้น ได้จุดชนวนให้เกิดการวิจัยและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์เชิงตรรกะมากมายหลายประเภท แต่สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้จะนำมาใช้งานได้จริงก็ต่อเมื่อสามารถต่ออายุเทคโนโลยีการผลิตและการพัฒนาได้ไกลกว่า CMOS และสามารถใช้งานร่วมกับ CMOS ได้ สามารถจัดเก็บข้อมูลได้รวดเร็วกว่าโดยใช้พลังงานที่น้อยกว่า ราคาถูก และสามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องได้ สิ่งประดิษฐ์ต้นแบบหลายชนิดได้ถูกคิดค้นและสร้างขึ้นโดยมีการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำในสภาวะควบคุมในห้องทดลอง แต่มีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คืออุปกรณ์หน่วยความจำจากพอลิเมอร์หรืออุปกรณ์หน่วยความจำจากสารอินทรีย์ จากนี้ไปจะนำเข้าสู่หัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้ ซึ่งก็คืออุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะจากสารอินทรีย์-อินทรีย์

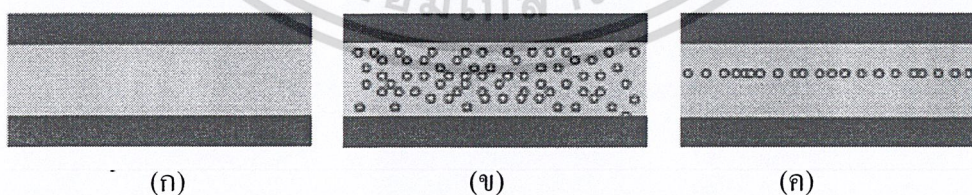
2.2 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

สำหรับโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่เข้ามามีบทบาทในช่วงหลายปีที่ผ่านมา และได้มีการศึกษาพัฒนาเรื่อยมาซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสามรูปแบบที่พบเห็นได้บ่อยในหลาย ๆ งานวิจัย คือ

รูปแบบที่ 1: เป็นรูปแบบที่ใช้คุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำเพียงอย่างเดียว [16] โดยทั่วไปแล้วจะพบในลักษณะที่เป็นโครงสร้างแบบชั้นเดียว (1L) ซึ่งมีทั้งในโครงสร้างที่เป็นพอลิเมอร์ชั้นเดียว สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ชั้นเดียว รวมถึงชั้นของโลหะออกไซด์ ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3 (ก)

รูปแบบที่ 2: เป็นรูปแบบที่ใช้คุณสมบัติของอนุภาคนาโน (nanoparticles) กระจายตัวในชั้นของฟิล์มบาง ซึ่งส่วนมากจะเป็นการกระจายตัวในชั้นของพอลิเมอร์ ซึ่งอนุภาคนาโนที่นำมาใช้มีทั้งอนุภาคของโลหะและอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ เช่น อนุภาคของ ทอง, เงิน, CdSe, ZnS, C60, PCBM และอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์หน่วยความจำที่ใช้ C60 กระจายตัวในพอลิเมอร์ poly 4 vinylphenol (PVP) [17] โดยทั่วไปแล้วจะพบในลักษณะที่เป็นโครงสร้างแบบชั้นเดียว (1L)-blend ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3 (ข)

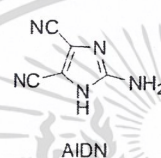
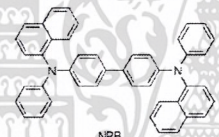
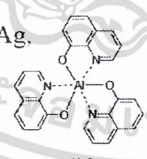
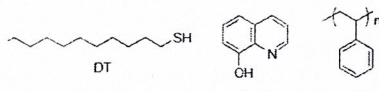
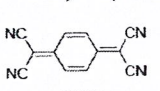
รูปแบบที่ 3: เป็นรูปแบบที่อาศัยสมบัติเฉพาะของชั้นฟิล์มบางโลหะ ที่ถูกแทรกอยู่ภายในจากการระเหยของชั้นโลหะ [12] ซึ่งชั้นโลหะจะทำหน้าที่ในการกักและเก็บประจุ จึงทำให้ตัวอุปกรณ์สามารถเปลี่ยนสถานะในการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะพบในลักษณะที่เป็นโครงสร้างแบบสามชั้น (3L) ลักษณะของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3 (ค)



รูปที่ 2.3 (ก) โครงสร้างแบบชั้นเดียว, (ข) โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน และ (ค) โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นฟิล์มโลหะบาง ๆ ถูกแทรกไว้ [12]

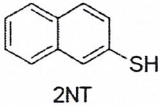
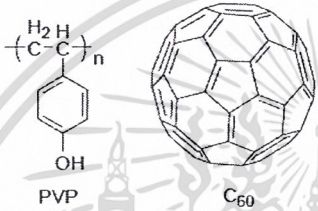
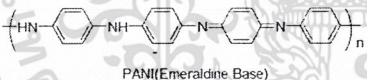
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะมีด้วยกันหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นพอลิเมอร์, สารอินทรีย์, สารอนินทรีย์ รวมถึงชั้นของโลหะออกไซด์ ซึ่งตัวอย่างบางส่วนของสารที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างต่างชนิดกัน ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปตัวอย่างผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

รูปแบบ	โครงสร้าง	กลไกในการเปลี่ยนสถานะ	สมบัติเฉพาะ
3 (3L) [12]	Al/AIDN(50nm)/Al(20nm)/AIDN(50nm)/Al 	Bistable / Electric-field induced polarization	ON/OFF ratio: ca. 10^3 W(3V)-R(1V)-E(-0.5V), Switching time: ca. 10ns
3 (3L) [18]	Al(50nm)/NPB(50nm)/Al(5nm)/NPB(50nm)/Al(50nm) 	Multi-stable, NDR model; charge trapping	ON/OFF ratio: ca. 10^3
3 (3L) [19]	Bottom electrode(50nm)/Alq3(50nm)/embedded metal(5nm)/Alq3(50nm)/Al(50nm) Bottom electrodes: Al, Cr, Cu, ITO, Au, Ni Embedded metals: Mg, Ag, Al, Cr, Au, CuPc 	Multi-stable, NDR model; charge trapping	ON/OFF ratio: $10-10^6$ The materials of bottom electrodes and embedded metals were insensitive to memory performances except for Au embedded layer that was shorted.
2 (1L)-blend [20]	Al/Au-DT+8HQ+PS(50nm)/Al Weight ratio: Au-DT:8HQ:PS=1:1:3 	Bistable / Electric-field induced charge transfer	ON/OFF ratio: up to 10^5 Switching time: 25 ns W(5V)-R(1V)-E(-2.3V)
1 (1L) [21]	ITO(300nm)/Al ₂ O ₃ (20nm)/Cu:TCNQ(1:1,50-300nm)/Al(100nm) 	Bistable/Redox reactions of molecules	ON/OFF ratio: $\sim 10^3$

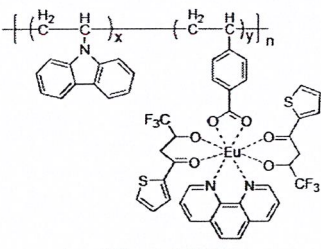
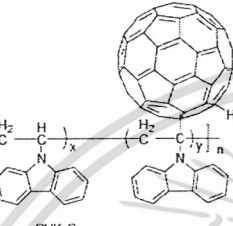

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

2 (1L)-blend [22]	Al/Au-2NT+PS(50nm)/Al Weight ratio: Au-2NT:PS=1:3  2NT	Write-once read many-times (WORM)/ Electric-field induced Charge transfer	ON/OFF ratio: up to 10^3 Write-once-read-many device
2 (1L)-blend [17]	Al/(PVP+C ₆₀ , 30nm)/Al 5 wt.% C ₆₀  PVP C ₆₀	Hysteresis-type / Not addressed	ON/OFF ratio: up to 10 Switching time: ~ 30 ns W(2.5V)-R(1.5V)-E(-3V) State retain time: > 1hr
2 (1L)-blend [23]	Al(80nm)/(PANI-nanofiber+Au-NP+PVA, 70nm)/Al(80nm) Weight ratio: PANI-nanofiber/Au-NP composite:PVA=1:15  PANI(Emeraldine Base)	Bistable, NDR / Electric-field induced Charge transfer	ON/OFF ratio: up to 10^3 Switching time: 25 ns W(4.8V)-R(1.2V)-E(-6V)
2 (1L)-blend [24]	Anode metal/Alq3(100nm)/Al Anode metals: Al, Au, ITO (Au/Alq3/Au device did not show any switching behavior)	Bistable / Charge Induced conformational change	ON/OFF ratio: ~ 10^5
1(1L) [25]	Al/Pentacene(150-1000nm)/Al	Bistable / Nanofilamentary Metallic pathways	ON/OFF ratio: 10^8 - 10^9 Threshold voltages were observed as an linear dependence of pentacene thickness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

1 (1L) [16]	<p>Al/copolymer PKEu(50nm)/ITO</p>  <p>copolymer PKEu: $x/y=0.987:0.013$</p>	Bistable / Charge Transfer (donor-acceptor system)	<p>ON/OFF ratio: up to 10^4</p> <p>Switching time: 20 μs</p> <p>W(-4V)-R(0-4V)-E(4V)</p> <p>Achieved 106 cycles</p> <p>OFF state retain: 3hr</p>
2 (1L)-blend [26]	<p>Al/copolymer PVK-C₆₀(50nm)/ITO</p>  <p>PVK-C₆₀ copolymer: $x/y=0.99:0.011$</p>	Bistable / Charge Transfer (donor-acceptor system)	<p>ON/OFF ratio: up to 10^5</p> <p>Switching time: 20 μs</p> <p>W(-2.8V)-R(-1V)-E(3V)</p>
3 (3L) [25]	<p>Al/Pentacene(50-800nm)/Al(15-20nm)/Pentacene(50-800nm)/Al</p>  <p>Pentacene</p>	Bistable / Nanofilamentary Metallic pathways	<p>ON/OFF ratio: 10^8-10^9</p> <p>Threshold voltages were observed as an linear dependence of pentacene thickness</p>
1+2 (1L) [27]	<p>ITO/fluorescent dye doped NPB(200nm)/Ag Fluorescent dyes: DCJTB, rubrebe, and C545T (each 3% coevaporation with NPB)</p>	Multi-stable, NDR and the doping dyes / Charge trapping	<p>ON/OFF ratio: up to 10^2</p> <p>W(-10V)-R(5V)-E(15V)</p> <p>Achieved 106 cycles In air operation</p>

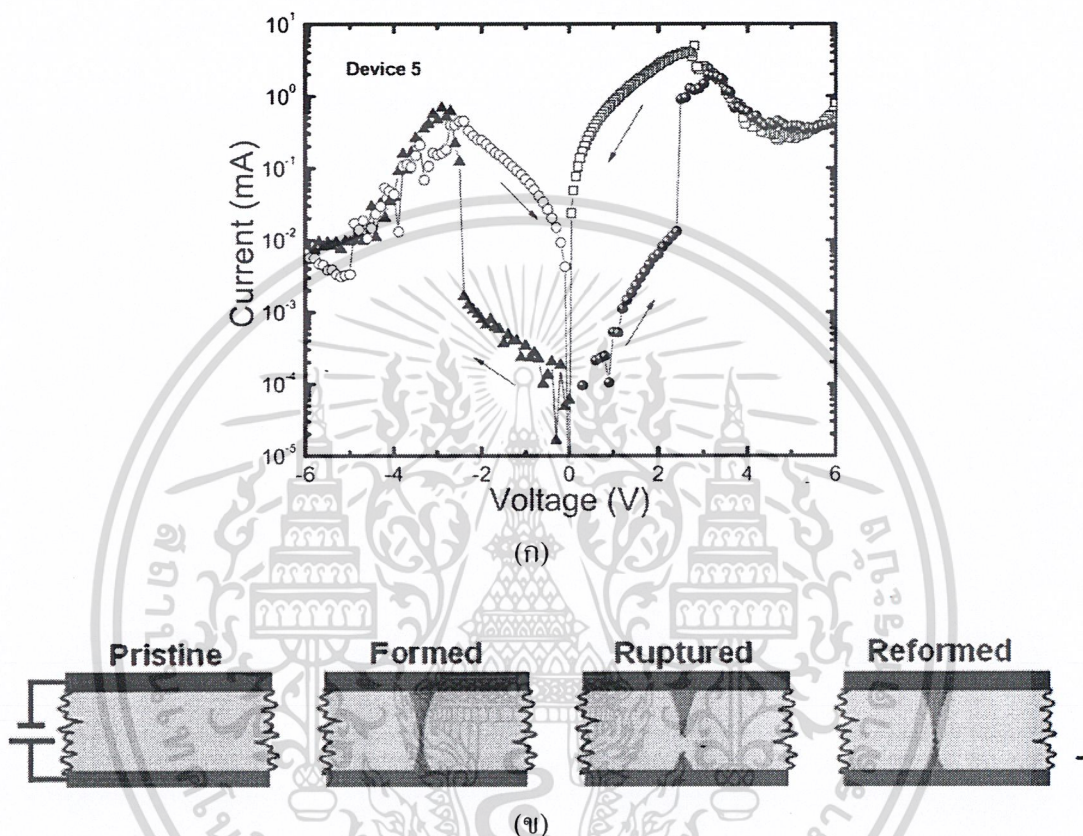
2.3 กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำที่สามารถสร้างจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์, อนินทรีย์, พอลิเมอร์ และโลหะออกไซด์ในโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สำหรับการบันทึกและอ่านข้อมูลสามารถทำได้โดยการให้ความต่างศักย์แก่ตัวอุปกรณ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเกิดขึ้นภายในและส่งผลให้ตัวอุปกรณ์แสดงสมบัติของหน่วยความจำออกมา โดยค่าของกระแสที่สถานะสูงเรียกว่า “สถานะเปิด (ON state)” และที่สถานะต่ำเรียกว่า “สถานะปิด (OFF state)” โดยมีอัตราส่วนของค่ากระแสที่สถานะเปิดกับสถานะปิดขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้และรูปแบบ โครงสร้างของตัวอุปกรณ์ ซึ่งทั้งสาม โครงสร้างคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแบบชั้นเดียว, โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน และ โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะบาง ๆ เป็นชั้นกลาง ซึ่งจะมีกลไกในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยในหัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายถึงกลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ดังนี้

2.3.1 โครงสร้างแบบชั้นเดียว



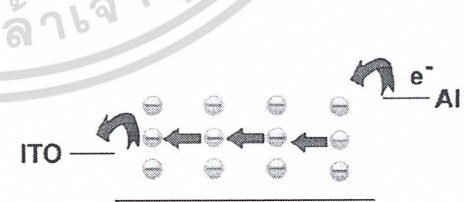
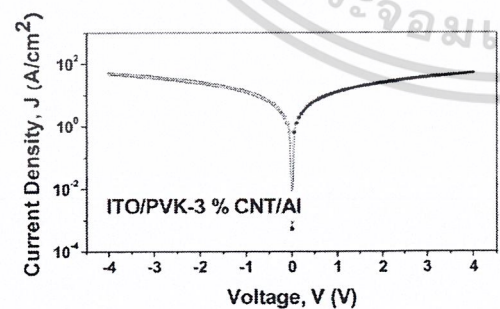
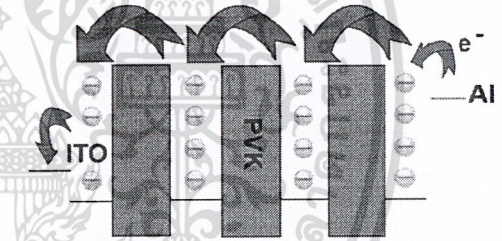
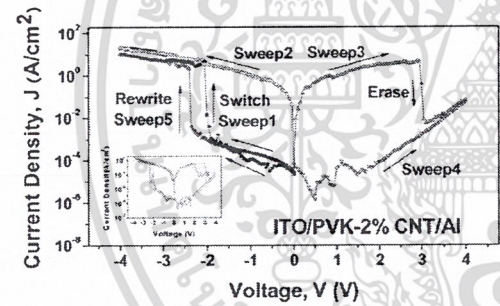
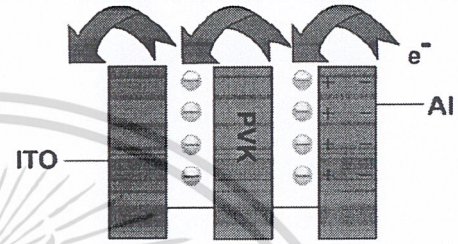
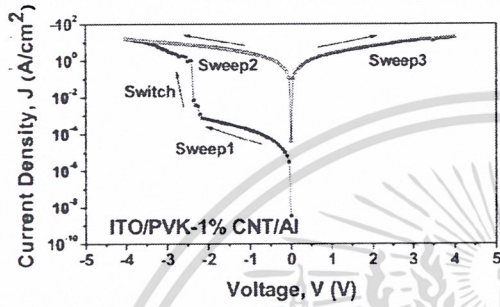
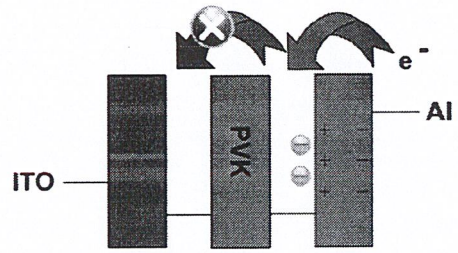
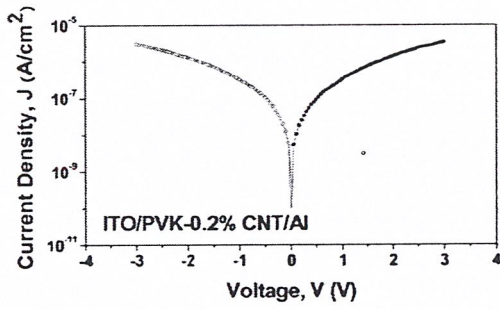
รูปที่ 2.4 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะสำหรับโครงสร้างชั้นเดียว [28, 29]

โดยทั่วไปอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะโครงสร้างแบบชั้นเดียวจะเป็นโครงสร้างแบบ MIM ซึ่งอาศัยหลักการฉีดกระแสผ่าน โครงสร้างของตัวอุปกรณ์แล้ววัดกระแสรั่ว สำหรับกลไกการทำงานของโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ได้รับการยอมรับและพูดถึงมากที่สุด คือ กลไกที่เกิดจากเส้นใยโลหะ (metallic filaments) โดยตัวอย่างที่ยกมานี้เป็น โครงสร้างของ ITO/pentacene/Al จากรูปที่ 2.4 [28, 29] เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง รูป (ก) และ (ข) ในช่วงเริ่มต้น (pristine) ที่แรงดันไฟฟ้า 0 ถึง +2 โวลต์การนำจะมีค่าต่ำ หลังจากนั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า +2 โวลต์ภายในชั้นสารกึ่งตัวนำจะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะเป็นเส้นทางเฉพาะขนาดเล็ก (formed) ทำให้การไหลของกระแสเป็นไปได้ง่าย จึงเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปิดไปสู่สถานะเปิด หลังจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ +4 โวลต์ กระแสจะเริ่มลดลงเนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะเป็นเส้นทางเฉพาะขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานที่มากเกินไปจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะ และเมื่ออุณหภูมิภายในเส้นทางกับบริเวณข้างเคียงมีความแตกต่างกันก็จะทำให้เส้นทางเหล่านี้เกิดการแตกออก (rupture) จึงทำให้ความสามารถในการนำกระแสลดลง และในชั้นของสารกึ่งตัวนำสามารถสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะขึ้นมาได้ใหม่เมื่ออุณหภูมิลดลง (reformed)

2.3.2 โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโน

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโนจะมีลักษณะและวิธีในการสร้างคล้ายกับโครงสร้างแบบชั้นเดียว เพียงแต่สารที่นำมาใช้เป็นชั้นทำงาน (active layer) ส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอร์เนื่องจากต้องมีการผสมอนุภาคขนาดนาโนลงไป และมีความจำเป็นที่จะต้องทำให้อนุภาคเหล่านั้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เช่น โครงสร้างที่เป็นท่อคาร์บอนขนาดนาโน (CNT) ผสมลงไปใน poly-(N-vinylcarbazole) (PVK) [30] ดังนั้นการเตรียมฟิล์มในโครงสร้างนี้ส่วนใหญ่จึงใช้วิธีการสปิน สำหรับกลไกการทำงานของโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคขนาดนาโน คือ กลไกที่เกิดจากการดักจับและปลดปล่อยพาหะ และจากรูปที่ 2.5 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง รูป (ก) และ (ข) ที่ความเข้มข้นของ CNT 0.2% จะไม่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะเนื่องจากอนุภาคขนาดนาโนในชั้นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเล็ก 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



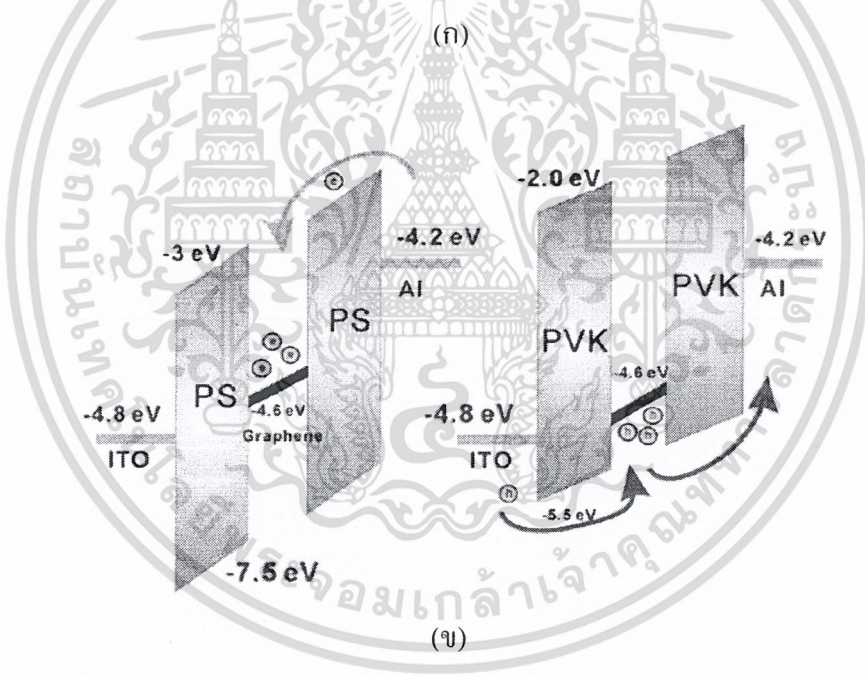
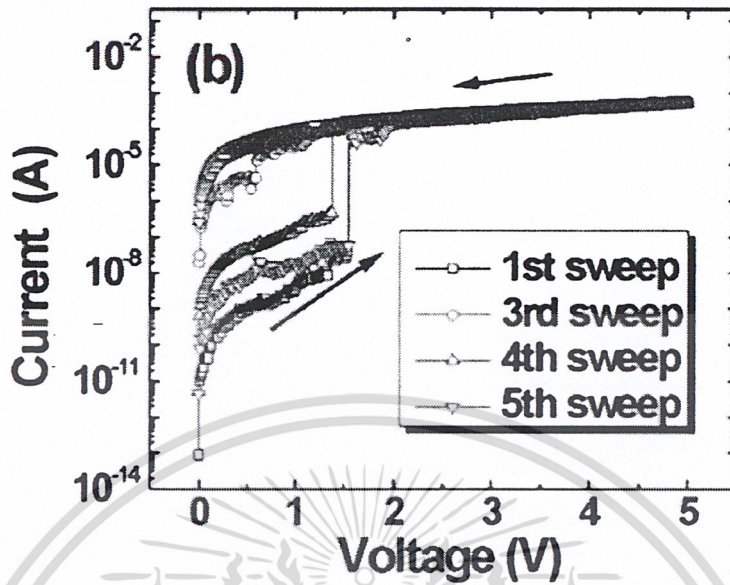
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.5 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์สำหรับ โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

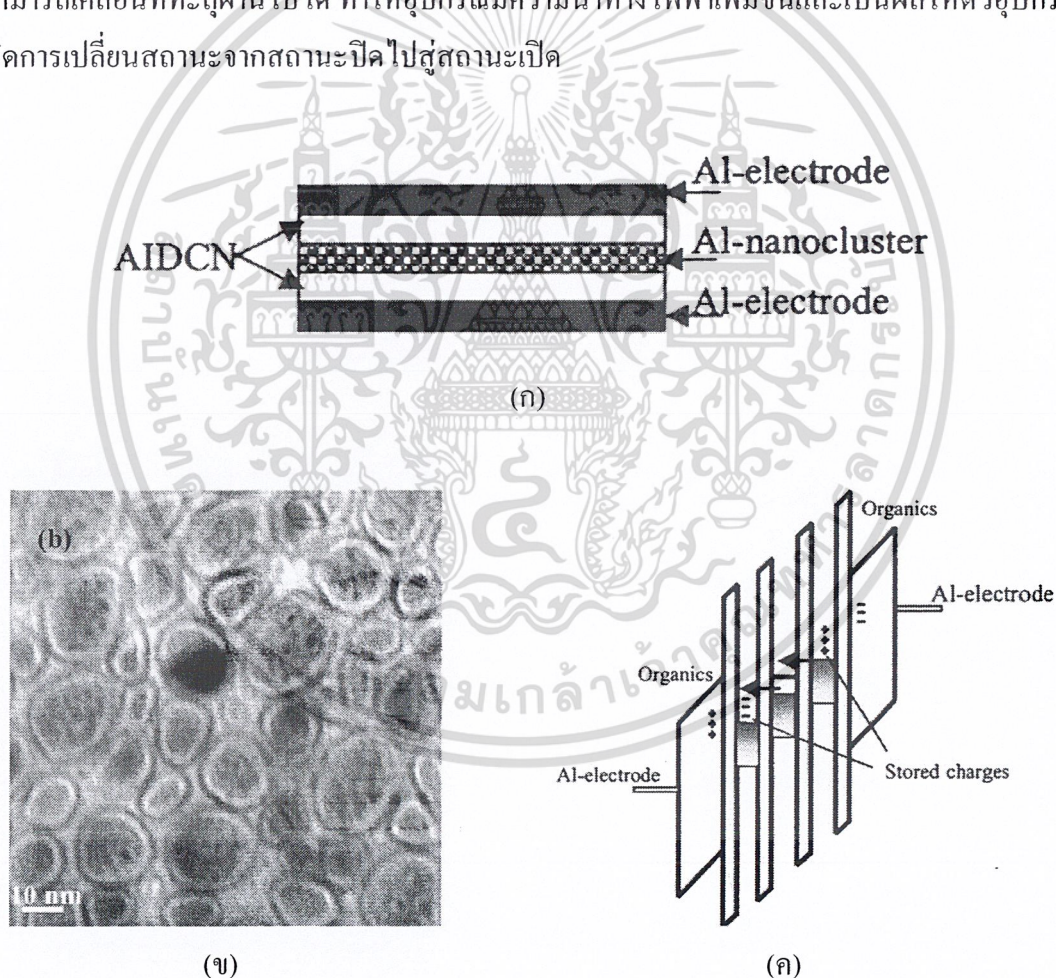
2.3.3 โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะเป็นชั้นกลาง



รูปที่ 2.6 (ก) ลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน และ (ข) กลไกการทำงานของอุปกรณ์สำหรับโครงสร้างสามชั้นที่มีชั้นโลหะบาง ๆ แทรก [31]

สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นของโลหะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีทั้งลักษณะของขั้วไฟฟ้าแบบสมมาตร (ขั้วชนิดเดียวกัน) และไม่สมมาตร (ขั้วต่างชนิดกัน) ในโครงสร้างสามชั้นนี้กลไกที่ทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะจะเกิดจากการดักจับและปลดปล่อยพาหะซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ผสมอนุภาคนาโน แต่สิ่งที่ต่างกันคือตำแหน่งในการดักจับพาหะ สำหรับในโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง 121445

แบบสามชั้นจะใช้คุณสมบัติของความเป็นผลึกขนาดนาโนแทนคุณสมบัติของอนุภาคขนาดนาโนที่ผสมในพอลิเมอร์ จากรูปที่ 2.6 ชั้นของพอลิเมอร์จะเป็นชั้นที่ทำหน้าที่กักพาหะให้อยู่ในชั้นของกราฟีน (graphene) [31] ซึ่งสามารถจับได้ทั้งโฮลและอิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำและขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าที่นำมาใช้ และในรูปที่ 2.7 คืออีกกลไกหนึ่งที่ได้รับการกล่าวถึงในหลาย ๆ งานวิจัยคือ ผลที่เกิดจากการระเหยของชั้นโลหะที่อัตราการระเหยต่ำ ทำให้อนุภาคของโลหะที่ระเหยขึ้นไปเกิดการออกซิไดซ์ เกิดเป็นชั้นของโลหะออกไซด์บาง ๆ หุ้มอนุภาคโลหะเอาไว้ก่อนที่จะเกิดการทับถมดังรูปที่ 2.7(ข) [13, 32] โดยชั้นที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกักพาหะให้อยู่ภายในอนุภาคของโลหะก็คือ ชั้นของออกไซด์ที่อยู่ล้อมรอบอนุภาคโลหะนั้นเอง ซึ่งเขียนเป็นแผนภาพพลังงานได้ดังรูปที่ 2.7(ค) โดยเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ตัวอุปกรณ์จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการทะลุผ่านชั้นออกไซด์เข้าไปยังบริเวณกักพาหะและเมื่อสถานะในการกักเต็ม อิเล็กตรอนก็จะสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านไปได้ ทำให้อุปกรณ์มีความนำทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเป็นผลให้อุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะปิดไปสู่สถานะเปิด



รูปที่ 2.7 (ก) โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นฟิล์มโลหะแทรก (ข) การเกิดเป็นชั้นของโลหะออกไซด์ล้อมรอบอนุภาคโลหะ และ (ค) กลไกการทำงานของอุปกรณ์ [13, 32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ของรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะพบว่า การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ จะทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะเฉพาะจากความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ (I-V) เป็นส่วนใหญ่ โดยลักษณะกราฟ I-V เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อที่จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของอุปกรณ์และรูปแบบพฤติกรรมในวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้ ลักษณะเฉพาะทาง I-V ที่เกิดจากชั้นทำงานที่อยู่ระหว่างสองขั้วไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุเช่นการนำทางไฟฟ้า, การเคลื่อนที่ของพาหะและประสิทธิภาพของการฉีดพาหะ [33] โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการศึกษาจากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทาง I-V ไม่ได้ถูกจำกัดอยู่กับวัสดุอินทรีย์เท่านั้น แต่รวมถึงวัสดุอินทรีย์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์หลายประเภทด้วย เช่น ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ [8], ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าสารอินทรีย์ (OFETs) [34], เซลล์แสงอาทิตย์สารอินทรีย์ [9] และอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีข้อได้เปรียบในแง่ของต้นทุนการผลิต มีความยืดหยุ่นในแง่ของวิธีการสร้าง วัสดุที่หลากหลายและมีความยืดหยุ่นทางกลสูง ดังนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารอินทรีย์และสารอินทรีย์จึงได้รับการศึกษาและการพัฒนาโดยใช้ลักษณะเฉพาะทาง I-V และแบบจำลองทางทฤษฎีของพฤติกรรมกรนำไฟฟ้า และเพื่อที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงลักษณะเฉพาะทาง I-V ที่ได้รับจากโครงสร้างของอุปกรณ์ รวมถึงกลไกการนำกระแสและผลกระทบที่เกิดจากรอยต่อระหว่างวัสดุกับขั้วโลหะ

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

- การฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าเข้าไปยังชั้นของสารกึ่งตัวนำ
- การเคลื่อนที่ของพาหะในชั้นของสารกึ่งตัวนำ

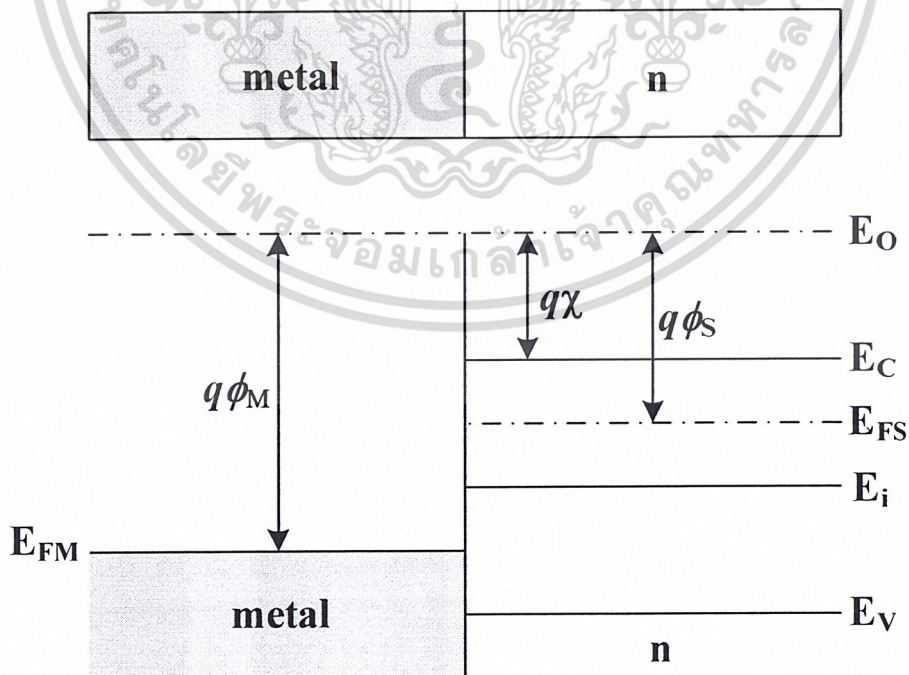
โดยปกติค่ากระแสจะถูกกำหนดโดยขีดจำกัดของการฉีดพาหะหรือขีดจำกัดของการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากความไม่ตรงกันของระดับพลังงานระหว่างฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าและระดับพลังงานการเคลื่อนที่ของพาหะของสารกึ่งตัวนำ รวมถึงความคล่องตัวของพาหะและการดักจับพาหะในชั้นของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นเงื่อนไขในการควบคุมสถานะที่พื้นผิว (ในอุดมคติจะพิจารณาว่ารอยสัมผัสเรียบ ไม่มีผลกระทบจากรอยสัมผัส) ที่บริเวณรอยต่อ โลหะกับสารกึ่งตัวนำ จึงเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่จำเป็นในการทำความเข้าใจถึงกลไกและลักษณะการนำของอุปกรณ์

2.5 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำจะให้ลักษณะสมบัติแรงดันไฟฟ้าที่แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ รอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) และรอยสัมผัสช็อตตี้ (schottky contact) โดยปกติการใช้งานเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกจะเป็นลักษณะของรอยสัมผัสโอห์มมิก ซึ่งจะไม่มีผลเกี่ยวกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแสสามารถไหลได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง

2.5.1 รอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนก่อนการสัมผัส

พิจารณาที่แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นก่อนการสัมผัส ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้สำหรับการศึกษาทั่วไป แสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีระดับพลังงานที่เรียกว่า ระดับสูญญากาศ (vacuum level : E_0) หมายถึงระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกเนื้อสาร ในด้านโลหะจะมีระดับเฟอร์มิของโลหะ (E_{FM}) อยู่สูงกว่าค่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_c) ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสูญญากาศ เรียกว่า ฟังก์ชันงานของโลหะ ดังสมการที่ (2.1) ซึ่งหมายถึง ค่าพลังงานน้อยสุดที่อิเล็กตรอนต้องการเพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะ



รูปที่ 2.8 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัส [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับ โลหะมีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (contact potential : V_{bi}) หรือกำแพงศักย์ภายใน (potential barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (2.3)

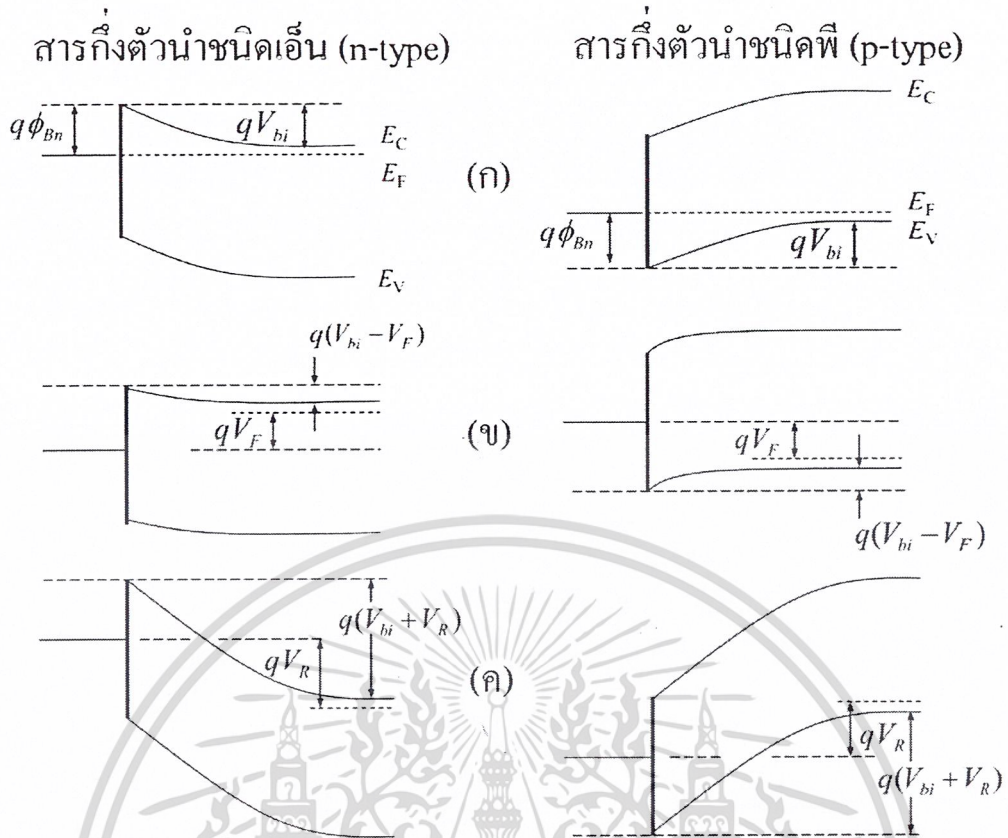
$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.3)$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้าน โลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ชอตตี้ (Schottky barrier: ϕ_{bn}) มีค่าดังสมการที่ (2.4)

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

2.5.3 บริเวณปลอดพาหะ

ชั้นปลอดพาหะ [36] หรือบางครั้งเรียกว่าบริเวณปลอดพาหะ (depletion layer) คือบริเวณที่เป็นฉนวนภายในชั้นของสารกึ่งตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือในบริเวณที่พาหะถูกพาไปแล้ว เกิดการรวมตัว เมื่อโลหะถูกนำเข้ามาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ แถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำจะถูกชักนำให้เข้าสู่สถานะความสัมพันธ์ของรอยต่อที่ระดับเฟอร์มิคิงที่กล่าวข้างต้น และทำหน้าที่เป็นเงื่อนไขขอบเขตเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาของสมการปัวซองในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะมีวิธีคิดและดำเนินการเช่นเดียวกันกับรอยต่อ p-n [36] รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพีภายใต้เงื่อนไขการไบอัสที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 2.10(ก) รอยต่ออยู่ในสถานะสมดุลความร้อนไม่มีการไบอัส และเมื่อมีการป้อนแรงดันไบอัสตรงให้กับรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.10(ข) และสำหรับการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อแสดงในรูปที่ 2.10(ค) ในขณะที่ไบอัสตรงให้กับรอยต่อสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [รูปที่ 2.10(ข)] ระดับเฟอร์มิคิงด้านโลหะจะลดต่ำกว่าด้านสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้ศักย์ทางด้านของสารกึ่งตัวนำลดลงทำให้ความเหมาะสมของการแพร่พาหะมีการเปลี่ยนแปลงโดยอิเล็กตรอนจะแพร่จากฝั่งสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะมากกว่าที่แพร่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำและนำไปสู่กระแสบวกที่ไหลผ่านรอยต่อโดยเทียบกับศักย์ที่พื้นผิว (V_{bi}) แต่ในขณะที่ไบอัสย้อนกลับให้กับรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น [รูปที่ 2.10(ค)] ระดับเฟอร์มิคิงด้านโลหะจะถูกยกสูงขึ้นกว่าด้านสารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้ศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้นและบริเวณปลอดพาหะกับสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อกว้างขึ้น

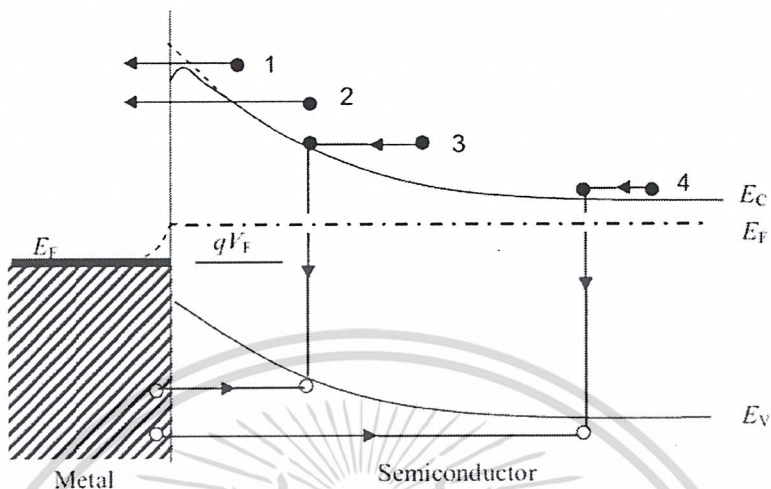


รูปที่ 2.10 ระดับพลังงานของ โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ภายใต้เงื่อนไขการไบอัสที่แตกต่างกัน (ก) สมดุลความร้อน (ข) ไบอัสตรง และ (ค) ไบอัสย้อนกลับ

2.6 การฉีดกระแสในสารกึ่งตัวนำ

ภายหลังการสัมผัสกันระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ สิ่งก็ตามมานั้นก็คือกระบวนการในการฉีดกระแส เมื่อให้แรงดัน ไบอัสแก่รอยสัมผัสโดยให้ด้าน โลหะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.11 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลง และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้าน โลหะ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้าน โลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนบางตัวจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงข้อต่อก็เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำโดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงข้อต่อที่มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะจึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นถึง 4 ขั้นตอนพื้นฐาน

ในการขนส่งพาหะเมื่อมีการไบอัสตรง (กระบวนการไบอัสย้อนกลับจะเกิดขึ้นตรงข้ามกัน) [33] ทั้งสี่กระบวนการที่สำคัญของการขนส่งพาหะ คือ



รูปที่ 2.11 สี่ขั้นตอนพื้นฐานในการขนส่งพาหะเมื่อมีการไบอัสตรง

- (1) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเนื้อกำแพงศักย์ไปยังโลหะในสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือปานกลาง (อาทิเช่น Si ที่มีการเจือ $N_D < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญของซ็อกเก็ตไดโอด [37]
- (2) กลไกการทะลุผ่านแบบควอนตัม (quantum-mechanical tunneling) ของอิเล็กตรอนผ่านกำแพงศักย์ จะมีความสำคัญมากสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสูง และทำให้เกิดเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก
- (3) เกิดการรวมกัน (recombination) ระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอนในบริเวณปลอดพาหะ
- (4) การฉีดโฮลจากขั้วโลหะเข้าไปยังชั้นของสารกึ่งตัวนำแล้วเกิดการรวมกันระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอน

นอกจากนี้อาจมีกระแสรั่วเกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นจากบริเวณรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเกิดการจับประจุ (trap) กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อจะเกิดจากผลของพาหะข้างมาก โดยกลไกที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ การแพร่กระจายของพาหะระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะ (diffusion), เทอร์โมอิเล็กทริก (thermionic emission) และ การทะลุผ่านแบบควอนตัมผ่านกำแพงศักย์ โดยทฤษฎีของการแพร่สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากพาหะถูกผลักดันให้แพร่กระจายได้มากกว่าความยาวของบริเวณปลอดพาหะ สำหรับการนำกระแสแบบเทอร์โมอิเล็ก-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมิสชัน สมมติให้เฉพาะพาหะเท่านั้นที่มีพลังงาน ซึ่งพาหะเหล่านั้นถ้ามีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าระดับพลังงานของแถบนำที่บริเวณรอยต่อของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ พาหะเหล่านั้นก็จะสามารถข้ามผ่านไปได้นำไปสู่การไหลของกระแส สำหรับการทะลุผ่านแบบควอนตัมผ่านกำแพงศักย์ เราลองนึกถึงธรรมชาติของคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งสามารถช่วยทำให้อิเล็กตรอนเกิดการทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่มีความหนาไม่มากนักได้ โดยปกติแล้วในหนึ่งรอยต่ออาจจะมีการขนส่งพาหะเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งกลไก แต่จะมีเพียงหนึ่งกลไกเท่านั้นที่เด่นที่สุดในการขนส่งพาหะในแต่ละรอยต่อ

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างกระบวนการนำของพาหะ [28]

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	$J = \frac{V}{d} \exp\left(\frac{-\Delta E_{ae}}{kT}\right)$	$\ln(J) \sim \frac{1}{T}$	$J \sim V$

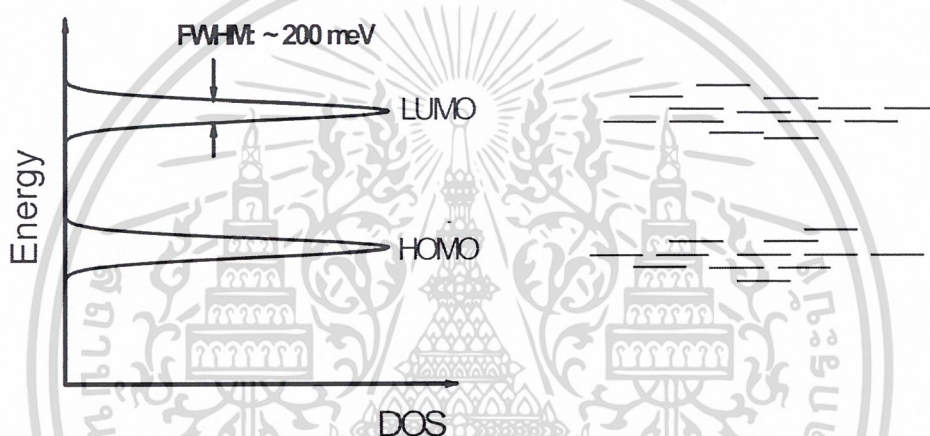
A^* =effective Richardson constant, ϕ_B = barrier height, ϵ_i = insulator dynamic permittivity, k = Boltzmann's constant, m^* = effective, d = insulator thickness, μ = charge carrier mobility, ΔE_{ae} = activation energy of electron, and ΔE_{ai} activation energy of ions

ตารางที่ 2.4 แสดงกระบวนการนำพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ โดยกระบวนการนำแบบช็อตกกีและเทอร์โมอิมิสชันจะมีกระบวนการเหมือนกับที่อธิบายไปแล้ว เมื่อเกิดกระบวนการเทอร์โมอิมิสชันที่บริเวณรอยต่อ การพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(J/T^2)$ กับ $1/T$ โดย J คือความหนาแน่นกระแสและ T คืออุณหภูมิ ทำให้ค่าความชันจากเส้นกราฟที่ได้คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี (ϵ) ของสาร ในส่วนของ Poole-Frenkel อิมิสชัน จะเกิดจากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ในแถบนำ โดยสถานะที่ถูกจับจะมีพลังงานคูลอมบ์เกิดขึ้นและจะแสดงพฤติกรรมการนำออกมาเหมือนกับการนำแบบช็อคกี ในกระบวนการทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordheim จะเกิดที่ขอบเขตของศักย์ไฟฟ้าที่สูงส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ และใน ส่วนของการนำแบบสเปซชาร์จจะเป็นผลมาจากการที่พาหะถูกฉีดเข้าไปยังชั้นของสารกึ่งตัวนำทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้จะไม่อยู่ภายใต้ความสมดุลทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic equilibrium) แต่อยู่ภายใต้ความสมดุลในการเคลื่อนที่ของพาหะ (dynamic charge equilibrium) และเมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้ขบวนการเกิดประจุ ประจุจะพยายามทำให้มีความเป็นกลางเกิดขึ้นในชั้นฟิล์ม

2.7 การเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์



รูปที่ 2.12 การกระจายของระดับพลังงาน HOMO และ LUMO ในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์อะมอร์ฟัส

กระบวนการนำที่บริเวณรอยต่อของโลหะกับสารอินทรีย์พาหะจะต้องเอาชนะกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อที่เกิดจากโลหะและสารอินทรีย์ให้ได้ เพื่อที่จะสามารถฉีดเข้าไปยังชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ในกรณีนี้หากกำแพงศักย์มีขนาดต่ำหรือที่อุณหภูมิสูง พาหะจำนวนมากจะมีพลังงานมากพอที่จะข้ามผ่านกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อไปได้ ซึ่งก็คือการเคลื่อนที่จากกระบวนการเทอร์โมไอออไนซิสมิสมัน [36] แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงหรือกำแพงศักย์มีความสูงมาก การฉีดพาหะจะสามารถเกิดขึ้นได้โดยวิธีการทางกลศาสตร์ควอนตัมคือกระบวนการในการทะลุผ่านกำแพงศักย์โดยตรงโดยพาหะที่ทะลุผ่านจะเข้าไปยังที่ว่างของสถานะซึ่งเป็นไปได้ 2 กรณีคือ เข้าไปยังระดับพลังงาน lowest occupied molecular orbital (LUMO) หรือระดับพลังงาน highest occupied molecular orbital (HOMO) ในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ แต่หากในกรณีที่สารอินทรีย์มีความไม่บริสุทธิ์สูงก็จะสามารถเกิดการขนส่งพาหะขึ้นใหม่ได้ระหว่างระดับพลังงาน LUMO และ HOMO ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เอง [36]

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นของฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งความหนาแน่นของสถานะ (density of state) จะสามารถอธิบายได้ง่ายหากพิจารณาจากการกระจายแบบ Gaussian ของออร์บิทัลโมเลกุลในระดับ localized แสดงในรูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของพาหะในชั้นของอะมอร์ฟัสส่วนใหญ่จะเกิดจากกระบวนการกระโดดของพาหะ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของพาหะในวัสดุอินทรีย์ที่มีความเป็นอะมอร์ฟัสจะเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.8 การดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของการดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นหนึ่งในปัญหาที่สำคัญสำหรับการทำความเข้าใจและการควบคุมสำหรับกระบวนการนำกระแส ในส่วนนี้จะทำการทบทวนที่มาของสถานะดักจับในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอิทธิพลของสถานะดักจับที่มีผลกับการเคลื่อนที่ของพาหะ

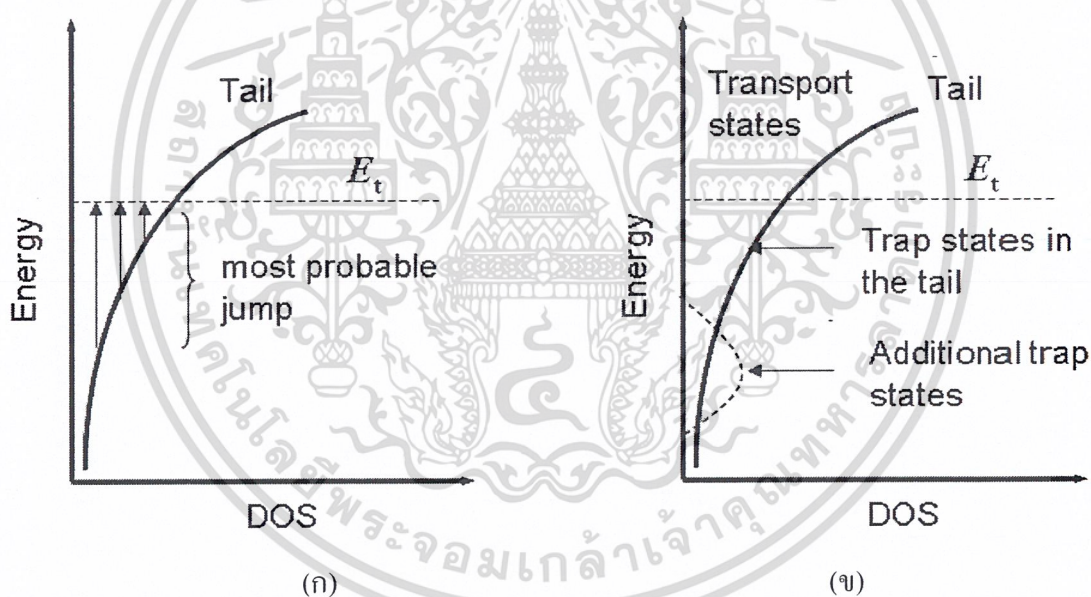
ในการไหลของกระแสจะมีอิทธิพลมาจากการดักจับพาหะในสถานะ localized เสมอ โดยพาหะที่ถูกจับนั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาหลังจากระยะเวลาผ่านไป หรือเกิดการรวมตัวใหม่เมื่อเจอประจุพาหะตรงข้าม โดยสถานะดักจับอาจทำหน้าที่เป็นทั้งสถานะดักจับหรือสถานะที่ทำให้เกิดการรวมตัว โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วนของปริมาณพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย ผลกระทบที่เห็นได้ชัดจากการดักจับพาหะในสารกึ่งตัวนำคือ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของพาหะ เพราะพาหะจะถูกกักและไม่สามารถมีส่วนร่วมในการไหลของกระแส แต่อย่างไรก็ตามพาหะที่ถูกจับจะมีผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้าในชั้นของสารกึ่งตัวนำ และหากสถานะดักจับมีการปลดปล่อยพาหะในปริมาณที่ต่ำพอที่จะทำให้เข้าถึงสถานะสมดุลการเคลื่อนที่ และหากการปลดปล่อยพาหะเป็นไปอย่างช้า ๆ โดยสามารถทำให้มีการหน่วงได้ ก็จะส่งผลให้เกิดคุณสมบัติแบบฮิสเทอรีซิสขึ้น ด้วยเหตุผลนี้เองจึงเป็นสมมติฐานที่สำคัญที่จะทำความเข้าใจถึงพื้นฐานและนำไปสู่การประยุกต์ใช้ความรู้จากสถานะในการดักจับพาหะเพื่อที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำต่อไป

2.8.1 Hopping Band Tails

สถานะดักจับที่สมควรจะอยู่ในช่องว่างของระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ สำหรับฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำดั้งเดิมที่ใช้อธิบายสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ สถานะ localized ที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานการนำสามารถที่จะดักจับอิเล็กตรอนได้ โดยที่อิเล็กตรอนที่ถูกจับในสถานะ localized แต่ละสถานะจะอยู่เหนือแถบเวเลนซ์ที่สามารถดักจับโฮลได้ แต่ในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ความกว้างของระดับพลังงานมีความกว้างไม่มากนัก ทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะในชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาจากกระบวนการที่เกิดจากการกระโดดระหว่างสถานะ localized ดังนั้นความแตกต่างระหว่างสถานะในการดักจับและการเคลื่อนที่แบบปกติของพาหะจึงเป็นเรื่องที่ยังไม่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นัก สำหรับปัญหานี้ได้รับแนวคิดจากการขนส่งพลังงานที่แนะนำเสนอโดย Monro [38] สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์อะมอร์ฟัส และในภายหลังได้ขยายมาสู่สารกึ่งตัวนำอินทรีย์อะมอร์ฟัส [39] แนวคิดนี้จะขึ้นอยู่กับกฎทางสถิติ คือ พาหะที่อยู่ในหางของแถบพลังงาน (band tail) ด้านบนมีโอกาสที่จะกระโดดและหลุดไปยังระดับพลังงาน E , ดังรูปที่ 2.13(ก) โดย E , จะถูกเรียกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ (energy transport) หรือพลังงานที่ทำให้เกิดการหลบหนี (escape energy) เนื่องจากจะใช้อธิบายถึงระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการจับพาหะไปจนถึงระดับพลังงานที่พาหะถูกปลดปล่อยออกมามากที่สุด ในความเป็นจริงแล้วพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นเพียงความหมายทางสถิติเท่านั้น แต่บทบาทของมันจะคล้ายกับขอบของระดับพลังงานเช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สถานะด้านล่างที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงาน E , คือสถานะดักจับ ในขณะที่สถานะที่อยู่เหนือระดับพลังงาน E , เป็นสถานะการเคลื่อนที่ของพาหะปกติในสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.13(ข) แต่อย่างไรก็ตามพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ก็ยังคงเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 2.13 (ก) โอกาสที่พาหะจะกระโดดและหลุดไปยังสถานะของพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และ (ข) สถานะในการดักจับปกติของสารกึ่งตัวนำและสถานะที่เพิ่มเข้ามาจากรอยสัมผัส

2.8.2 การเกิดสถานะดักจับ

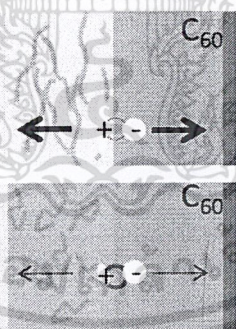
แหล่งที่มาของสถานะดักจับในสารกึ่งตัวนำคือ:

- (1) ความบริสุทธิ์ (impurities) [40]: เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุลในสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปจะมีความบกพร่องมากกว่าเมื่อเทียบกับปฏิสัมพันธ์จากแรงภายในโมเลกุลเอง เมื่อสารกึ่งตัวนำไม่มีความบริสุทธิ์ (มีโมเลกุลมากกว่าหนึ่งชนิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานจะเกิดการซ้อนทับกัน ทำให้ในช่องว่างของระดับพลังงานเกิดเป็นสถานะดักจับขึ้น

- (2) ข้อบกพร่องของผลึก (structural defects) [41]: ถึงแม้ว่าสารกึ่งตัวนำจะมีความบริสุทธิ์ โดยมีโมเลกุลเพียงชนิดเดียวก็ตาม แต่ในความเป็นจริงระดับพลังงานที่แน่นอนของสารกึ่งตัวนำไม่สามารถกำหนดได้จากโครงสร้างทางเคมีเพียงอย่างเดียว อย่างเช่นในกรณีของพอลิเมอร์การเชื่อมต่อกันของสายโซ่จะมีผลกระทบต่อระดับพลังงาน HOMO และ LUMO จึงกล่าวได้ว่าความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานได้ โดยในกรณีของพอลิเมอร์ก็คือความยาวของสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันนั่นเอง สำหรับในผลึกข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจะมาจากบริเวณขอบของผลึก (grain boundaries) โดยข้อบกพร่องของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อสถานะดักจับที่เพิ่มขึ้น
- (3) การจับคู่ของพาหะ (geminate pairs) [40]: เนื่องจากสารกึ่งตัวนำมีความเป็นฉนวนที่ต่ำ จึงมีพลังงานคูลอมบ์ที่แข็งแรง โดยโฮลและอิเล็กตรอนจะมีความสำคัญต่อการเกิดพลังงานคูลอมบ์เป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีหลายโมเลกุลที่ถูกแยกออกจากโฮลและอิเล็กตรอนก็ตาม โดยคู่ของพาหะที่เกิดพลังงานคูลอมบ์จะเรียกว่า คู่ geminate แสดงในรูปที่ 2.14 [42] ทำให้พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 2.14 การเกิดคู่ geminate ระหว่างโฮลกับอิเล็กตรอนของรอยต่อเฮเทอโรในสารกึ่งตัวนำ [42]

- (4) การดักจับด้วยตัวเอง (self-trapping) [43]: ประจุพาหะส่วนเกินมักจะนำไปสู่การเสียรูปของโมเลกุล โดยจะทำให้เกิดการลดลงของพลังงาน ซึ่งพาหะดังกล่าวเมื่อรวมกับการเปลี่ยนรูปของโมเลกุลแล้วกลายเป็นลักษณะกึ่งอนุภาคจะถูกเรียกว่า โพลารอน (polaron) และถ้าหากประจุพาหะ 2 ประจุเกิดการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันจะเรียกว่า ไบโพลารอน (bipolaron) โดยในความเป็นจริงแล้วโพลารอนและไบโพลารอนไม่ใช่สถานะดักจับเนื่องจากมันสามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้ แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่

ของโพลารอนและไบโพลารอนจะมีความคล่องตัวต่ำกว่าของประจุพาหะก่อนข้างมาก จึงเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของพาหะ โดยปกติพลังงานส่วนเกินจะมีค่าลดลงไม่มากไปกว่าสปีแมกอะอิลีคตรอน โวลต์จึงไม่พิจารณาว่าเป็นสถานะดักจับ แต่สำหรับในพอลิเมอร์บางชนิด เช่น polythiophene หรือ polyacetylene การเกิดโพลารอนและไบโพลารอนจะเกิดจากการลดลงของพลังงานในระดับหลายร้อยแมกอะอิลีคตรอน โวลต์ [40] ในกรณีนี้ประจุพาหะจะถูกจับด้วยสายโซ่ของตัวพอลิเมอร์เอง โดยกลไกดังกล่าวจะเรียกว่าการดักจับด้วยตัวเอง

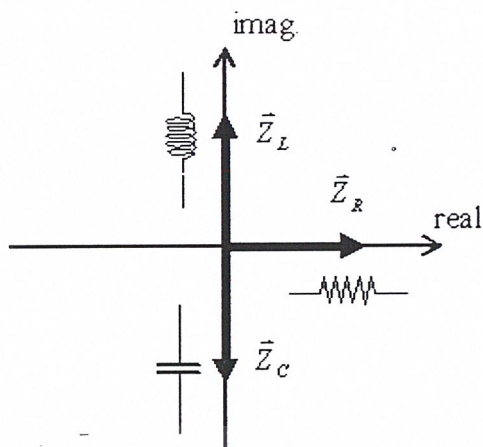
2.9 อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อน

อิมพีแดนซ์ (impedance) ในวงจรหมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงดันต่อกระแส ซึ่งใช้ตัว Z เป็นสัญลักษณ์เขียนแทน และมีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω) [44, 45] ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (2.5)

$$Z = E/I \quad \text{หรือ} \quad E = IZ \quad (2.5)$$

เนื่องจากมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนแปลงกับตัวต้านทาน (R), ตัวเหนี่ยวนำ (L) และ ตัวเก็บประจุ (C) จึงจำเป็นต้องมีวิธีเขียนสมบัติของ R , L และ C ในลักษณะเดียวกันเพื่อจะสามารถเขียนสมการรูปทั่วไปได้ ดังนั้น อิมพีแดนซ์หรือความต้านทานเชิงซ้อน จะเป็นวิธีที่รวมค่าความต้านทาน R และความต้านทานจินตภาพหรือรีแอกแตนซ์ (reactance) X ในรูปตัวแปรเดียว เรียกว่าอิมพีแดนซ์ Z โดยตัวต้านทานจะมีแรงดันและกระแสเฟสตรงกัน ในตัวเก็บประจุเฟสของกระแสจะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา และในตัวเหนี่ยวนำเฟสของแรงดันจะนำหน้าของกระแสอยู่ 90 องศา เนื่องจากความต้านทานและรีแอกแตนซ์เป็นปริมาณสเกลาร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลเฟสเพิ่มเติมจึงต้องเปลี่ยนไปพิจารณาอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์

เวกเตอร์เป็นปริมาณที่มีทั้งขนาดและทิศทาง จากรูปที่ 2.15 จะแสดงอิมพีแดนซ์ของ R , L และ C เป็นแบบเวกเตอร์ เพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างความต้านทานและรีแอกแตนซ์ ซึ่งเขียนบนแกนต่างกัน โดยเขียนความต้านทานในแนวแกน x หรือแกนจริง (real axis) และรีแอกแตนซ์ในแนวแกน y หรือแกนจินตภาพ (imaginary axis) ความต้านทานเป็นบวกเสมอ แต่จากรูปที่ 2.15 นี้ อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำเป็นบวกและอิมพีแดนซ์ของความจุไฟฟ้าเป็นลบ การคำนวณทางคณิตศาสตร์ เราสามารถเขียนอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อน (complex number) ซึ่งเป็นตัวเลขที่มีสองส่วน คือ ส่วนจริง (real) และส่วนจินตภาพ (imaginary) ตัวเลขปริมาณเชิงซ้อนเขียนได้ดังสมการที่ (2.6)



รูปที่ 2.15 อิมพีแดนซ์ของ R, L และ C แบบเวกเตอร์ [44,45]

$$\bar{Z} = x + jy, j = \sqrt{-1} \quad (2.6)$$

โดยที่ x เป็นส่วนจริงและ y เป็นส่วนจินตภาพ ถ้าเขียนอิมพีแดนซ์ในลักษณะนี้แล้ว ความต้านทานจะเป็นส่วนจริง และรีแอคแทนซ์จะเป็นส่วนจินตภาพ ขนาดของอิมพีแดนซ์คำนวณจากขนาดหรือมอดูลัส (modulus) ของปริมาณเชิงซ้อน ดังสมการที่ (2.7)

$$Z = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.7)$$

โดยการใช้ระบบดังกล่าวเราสามารถรวมอิมพีแดนซ์ได้เมื่อเราเขียนทั้ง R, L และ C ในรูปแบบเดียวกัน ดังสมการที่ (2.8) สำหรับตัวต้านทาน สมการที่ (2.9) สำหรับตัวเหนี่ยวนำ และสมการที่ (2.10) สำหรับตัวเก็บประจุ

$$\bar{Z}_R = R \quad (2.8)$$

$$\bar{Z}_L = j\omega L \quad (2.9)$$

$$\bar{Z}_C = \frac{-j}{\omega C} \quad (2.10)$$

2.9.1 วงจรมีตัวต้านทาน (R) เพียงอย่างเดียว

จากวงจรไฟฟ้าสลับที่ประกอบด้วย R เพียงอย่างเดียว เมื่ออาศัยกฎของโอห์มก็จะได้

$$E = V = IR \quad \text{หรือ} \quad I = EG = VG \quad (2.11)$$

ลักษณะสมบัติของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วย R เพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระแสกับแรงดันจะเกิดอินเฟสกัน ซึ่งจะทำให้มุมเฟสของวงจรที่ได้มีค่าเป็นศูนย์ ($\phi=0$)
2. ค่าอิมพีแดนซ์จะเท่ากับค่าความต้านทาน ($Z = R$)
3. ค่าแอดมิตแตนซ์จะเท่ากับค่าความนำ ($Y = G$)
4. กำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร ถือว่าเป็นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ($P = VI = I^2R = V^2/R$)

2.9.2 วงจรที่มีตัวเหนี่ยวนำ (L) เพียงอย่างเดียว

จากวงจรไฟฟ้าสลับที่ประกอบด้วย L เพียงอย่างเดียว เมื่ออาศัยกฎของโอห์มจะได้

$$I = \frac{E}{X_L} \quad \text{หรือ} \quad \frac{I}{E} = \frac{1}{X_L} \quad (2.12)$$

และ
$$V = E = IX_L \quad (2.13)$$

แต่อัตราส่วนของ I/E ก็คือค่าแอดมิตแตนซ์นั่นเอง ดังนั้นในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วย L เพียงอย่างเดียวค่าแอดมิตแตนซ์ก็คือค่าอินดักติฟซ์เซพแตนซ์ B_L ดังนั้นจะได้

$$B_L = \frac{1}{X_L} \quad (2.14)$$

ส่วนอัตราส่วนของ E/I ก็คือค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้นในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วย L เพียงอย่างเดียวค่าอิมพีแดนซ์ก็คือค่า อินดักติฟรีแอกแตนซ์ ซึ่งจะได้

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (2.15)$$

ลักษณะสมบัติของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วย L เพียงอย่างเดียว

1. กระแสกับแรงดันจะมีเฟสต่างกัน 90° หรือ $\pi/2$ rad โดยแรงดันที่เกิดขึ้นในวงจรจะนำหน้ากระแสไปเป็นมุม 90° หรือจะกล่าวในอีกทางหนึ่งก็คือ กระแสจะล่าหลังแรงดันอยู่เป็นมุม 90°
2. มุมเฟสของวงจร (มุมเฟสของกระแสเมื่อเทียบกับแรงดัน) มีค่าเท่ากับ -90°
3. ค่าแอดมิตแตนซ์จะเท่ากับค่าอินดักติฟซ์เซพแตนซ์ ($Y = B_L = 1/X_L$ ซีเมนส์)
4. ค่าอิมพีแดนซ์จะเท่ากับค่าอินดักติฟรีแอกแตนซ์ ($Z = X_L = \omega L = 2\pi fL$ โอห์ม)
5. จะไม่มีกำลังไฟฟ้า (กำลังเฉลี่ย) เกิดขึ้นในวงจร ($P = 0$)

2.9.3 วงจรที่มีตัวเก็บประจุ (C) เพียงอย่างเดียว

จากวงจรไฟฟ้าสลับที่ประกอบด้วย C เพียงอย่างเดียวเมื่ออาศัยกฎของโอห์มจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{E}{X_C} \quad \text{หรือ} \quad \frac{I}{E} = \frac{1}{X_C} \quad (2.16)$$

และ $V = E = IX_C \quad (2.17)$

แต่อัตราส่วนของ I/E ก็คือค่าแอดมิตแตนซ์ ดังนั้นในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วย C เพียงอย่างเดียว ค่าแอดมิตแตนซ์ก็คือค่า คาปาซิทีฟซซเซพแตนซ์ B_C ดังนั้น จะได้

$$B_C = \frac{1}{X_C} \quad (2.18)$$

ลักษณะสมบัติของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่ประกอบด้วย C เพียงอย่างเดียว

1. กระแสกับแรงดันจะมีเฟสต่างกัน 90° หรือ $\pi/2$ rad โดยกระแสจะนำหน้าแรงดันไปเป็นมุม 90°
2. มุมเฟสของวงจร (มุมเฟสของกระแสเมื่อเทียบกับแรงดัน) มีค่าเท่ากับ $+90^\circ$
3. ค่าแอดมิตแตนซ์จะเท่ากับค่าคาปาซิทีฟ ซซเซพแตนซ์ ($Y = B_C = 1/X_C$ ซีเมนส์)
4. ค่าอิมพีแดนซ์จะเท่ากับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ ($Z = X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC$ โอห์ม)
5. จะไม่มีกำลังไฟฟ้า (กำลังเฉลี่ย) เกิดขึ้นในวงจร ($P = 0$)

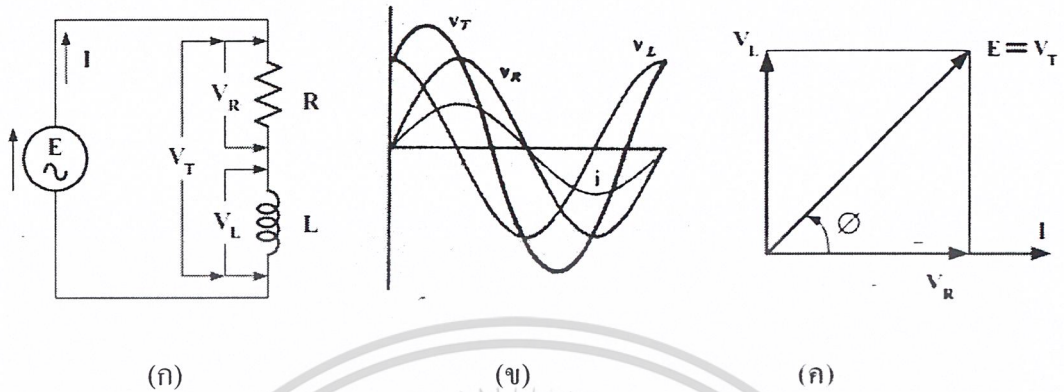
2.9.4 วงจรที่มีตัวต้านทาน (R) กับ ตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่ออนุกรมกัน

เมื่อนำ R และ L มาต่อกันแบบอนุกรม และต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า E ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ก) จะเห็นว่า จะทำให้เกิดกระแส I ไหลในวงจร และกระแส I ดังกล่าวนี้อาจเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขึ้นที่ R และ L คือ $V_R (IR)$ และ $V_L (IX_L)$ ตามลำดับ โดยกระแส I ที่ไหลในวงจรจะอินเฟสกับแรงดัน V_R แต่ล่าหลังแรงดัน V_L อยู่เป็นมุม 90°

การเขียนไดอะแกรมของรูปคลื่น และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RL อนุกรมดังในรูปที่ 2.16(ก) เราจะใช้กระแส I เป็นตัวอ้างอิงในการเขียนเสมอ ดังในรูปที่ 2.16(ข) จะเห็นว่า ไดอะแกรมของรูปคลื่นของกระแส I จะเริ่มต้นที่จุด 0° ส่วนในรูปที่ 2.16(ค) จะเห็นว่า เฟสเซอร์ของกระแส I จะเขียนในแนวแกน x หรือ แกน 0° ไดอะแกรมของรูปคลื่นของวงจร RL อนุกรมจะแสดงดังในรูปที่ 2.16(ข) จะพิจารณาเห็นว่ารูปคลื่นของกระแส I จะอินเฟสกับรูปคลื่นของแรงดัน V_R แต่จะล่าหลังรูปคลื่นของแรงดัน V_L อยู่เป็นมุม 90° และจะนำหน้าแรงดัน V_R ไปเป็นมุม 90° เช่นเดียวกัน ส่วนรูปคลื่นของแรงดัน V_T ได้มาจากค่าทุก ๆ ขณะเวลาของรูปคลื่นของแรงดัน V_R กับ V_L รวมกัน

อย่างไรก็ตาม การเขียนรูปคลื่นแทนปริมาณของแรงดันและกระแสที่แสดงให้เห็นตามในรูปที่ 2.16(ข) ที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์วงจร โดยเฉพาะวงจรที่มีลักษณะยุ่งยากและซับซ้อนมาก ๆ

แล้ว จะทำให้การพิจารณาหรือการวิเคราะห์วงจรยิ่งยากมาก ดังนั้นจึงต้องใช้เฟสเซอร์เขียนแทน ซึ่ง จะแสดงดังรูปที่ 2.16(ค)



รูปที่ 2.16 (ก) วงจร RL อนุกรม (ข) โดอะแกรมของรูปคลื่น และ (ค) เฟสเซอร์โดอะแกรม [44,45]

เฟสเซอร์โดอะแกรมดังรูปที่ 2.16(ค) จะเห็นได้ว่า เฟสเซอร์ของแรงดัน V_R กับเฟสเซอร์ของกระแส I จะอินเฟสกัน และมีทิศทางชี้ไปทางขวา (0°) และเฟสเซอร์ของแรงดัน V_L จะชี้ไปในแกนตั้ง (90°) เพราะนำหน้าแรงดัน V_R และกระแส I ไปเป็นมุม 90° ส่วนเฟสเซอร์ของแรงดัน V_T ได้มาจากเฟสเซอร์ของแรงดัน V_L บวกกับเฟสเซอร์ของแรงดัน V_R ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เฟสเซอร์ของแรงดันดังนี้คือ

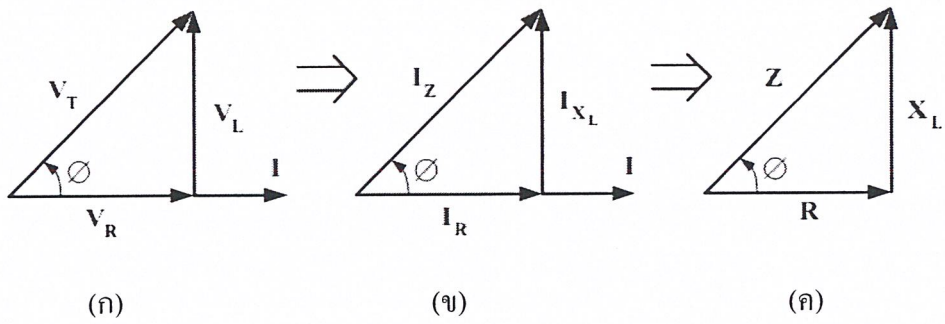
$$V_T^2 = V_R^2 + V_L^2 \quad \text{หรือ} \quad V_T = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \quad (2.19)$$

การหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RL อนุกรม สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันในสมการที่ (2.19) เมื่อนำกฎของโอห์มมาใช้ในการพิจารณา ซึ่งจะได้ดังนี้คือ จากสมการที่ (2.19) เมื่อแทนค่า $V_T = IZ$, $V_R = IR$ และ $V_L = IX_L$ จะได้

$$(IZ)^2 = (IR)^2 + (IX_L)^2$$

เมื่อใช้กระแส I^2 หารสมการข้างบนตลอด จะได้

$$Z^2 = R^2 + X_L^2 \quad \text{หรือ} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2.20)$$

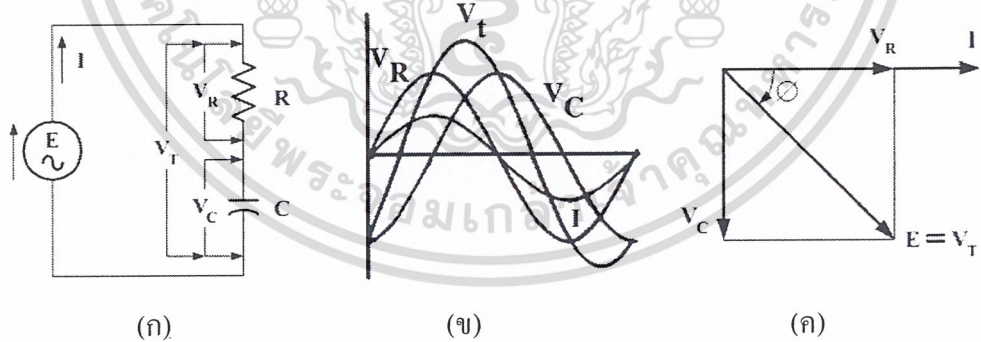


รูปที่ 2.17 ที่มาของอิมพีแดนซ์ไคอะแกรม [44,45]

เฟสเซอร์ไคอะแกรมในรูปที่ 2.17(ก) จะเปลี่ยนเป็นเฟสเซอร์ไคอะแกรมในรูปที่ 2.17(ค) เมื่ออาศัยกฎของโอห์มโดยการแทนที่ $V_T = IZ$, $V_L = IX_L$ และ $V_R = IR$ ก็จะได้เฟสเซอร์ไคอะแกรมจากรูปที่ 2.17(ก) เป็นรูปที่ 2.17(ข) เมื่อตัดตัวประกอบกระแส I ออกไป จะทำให้ได้อิมพีแดนซ์ไคอะแกรม ดังในรูปที่ 2.17(ค)

2.9.5 วงจรมีตัวต้านทาน (R) กับ ตัวเก็บประจุ (C) ต่ออนุกรมกัน

เมื่อนำ R และ C มาต่อแบบอนุกรม และต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า E ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ก) จะเห็นว่า จะทำให้เกิดกระแส I ไหลในวงจร และกระแส I ดังกล่าวนี จะเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ R และ C คือ $V_R (I_R)$ และ $V_C (IX_C)$ ตามลำดับ โดยกระแส I ที่ไหลในวงจรจะอินเฟสกับแรงดัน V_R และจะนำหน้าแรงดัน V_C ไปเป็นมุม 90°



รูปที่ 2.18 (ก) วงจร RC อนุกรม (ข) ไคอะแกรมของรูปคลื่น และ (ค) เฟสเซอร์ไคอะแกรม [44,45]

การเขียนไคอะแกรมของรูปคลื่นและเฟสเซอร์ไคอะแกรมของวงจร RC อนุกรมดังในรูปที่ 2.18(ก) นี้เราจะใช้กระแส I เป็นตัวอ้างอิง ดังในรูปที่ 2.18(ข) จะเห็นได้ว่าไคอะแกรมของรูปคลื่นของกระแสจะเริ่มที่จุด 0° ส่วนในรูปที่ 2.18(ค) จะเห็นว่า เฟสเซอร์ของกระแส I จะเขียนในแนวแกน x หรือแกน 0°

ไดอะแกรมของรูปคลื่นของวงจร RC อนุกรม ดังในรูปที่ 2.18(ข) จะเห็นว่า รูปคลื่นของกระแส I จะอินเฟสกับรูปคลื่นของแรงดัน V_R และจะนำหน้ารูปคลื่นของแรงดัน V_C ไปเป็นมุม 90° หรือ $\pi/2$ rad นั่นคือ แรงดัน V_C จะล่าหลังกระแส I อยู่เป็นมุม 90° และจะล่าหลังแรงดัน V_R อยู่เป็นมุม 90° เช่นเดียวกัน ส่วนรูปคลื่นของแรงดัน V_T ได้มาจากค่าทุก ๆ ระยะเวลาของรูปคลื่นของแรงดัน V_R กับ V_C ร่วมกัน

ส่วนเฟสเซอร์ไดอะแกรมดังในรูปที่ 2.18(ค) จะเห็นว่า เฟสเซอร์ของแรงดัน V_R จะอินเฟสกับกระแส I และมีทิศทางชี้ไปทางขวา (0°) และเฟสเซอร์ของแรงดัน V_C จะชี้ลงเป็นมุม 90° ส่วนเฟสเซอร์ของแรงดัน V_T ได้มาจากผลรวมทางเฟสเซอร์ระหว่างแรงดัน V_R กับ V_C ซึ่งจะได้ส่วนสัมพันธ์ของเฟสเซอร์ของแรงดันดังนี้

$$V_T^2 = V_R^2 + V_C^2 \quad \text{หรือ} \quad V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad (2.21)$$

การหาค่าอิมพีแดนซ์ RC อนุกรม สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของแรงดันในสมการที่ 2.21 เมื่อนำกฎของโอห์มมาใช้ในการพิจารณา ซึ่งจะหาได้ดังนี้คือ จากสมการที่ (2.21) เมื่อแทนค่า $V_T = IZ$, $V_R = IR$ และ $V_C = IX_C$ จะได้

$$(IZ)^2 = (IR)^2 + (IX_C)^2$$

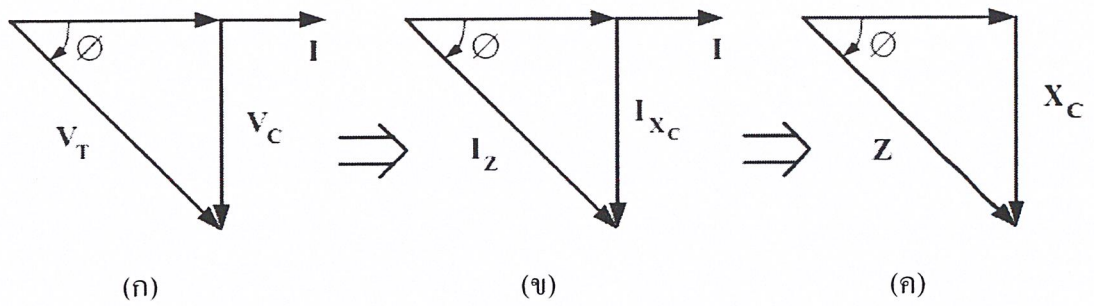
เมื่อใช้กระแส I หารตลอด จะได้

$$Z^2 = R^2 + X_C^2 \quad \text{หรือ} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2.22)$$

เฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.19(ก) เมื่ออาศัยกฎของโอห์มจะได้เฟสเซอร์ไดอะแกรมเป็นรูปที่ 2.19(ข) และเมื่อตัดตัวประกอบรวมกระแส I ออกไป จะทำให้ได้อิมพีแดนซ์ไดอะแกรมดังในรูปที่ 2.19(ค)

จากเฟสเซอร์และอิมพีแดนซ์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.19(ก) และ (ค) จะได้

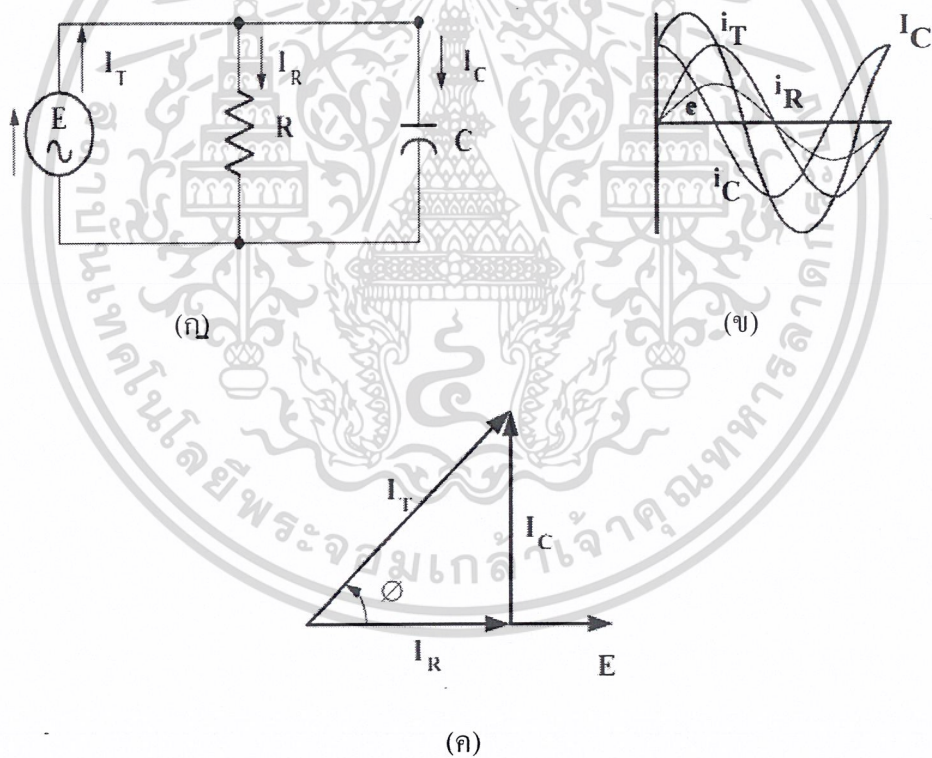
$$\cos \phi = \frac{V_R}{V_T} = \frac{R}{Z} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.19 ที่มาของอิมพีแดนซ์ไดอะแกรม [44,45]

ดังนั้นจะได้เฟเซอร์แฟกเตอร์ของวงจร RC อนุกรมเท่ากับ $\cos\phi$ หรือเท่ากับ R/Z หรือเท่ากับ V_R/V_T

2.9.6 วงจรที่มีตัวต้านทาน (R) กับ ตัวเก็บประจุ (C) ต่อขนานกัน



รูปที่ 2.20 (ก) วงจร RC ขนาน (ข) ไดอะแกรมรูปคลื่น และ (ค) เฟสเซอร์ไดอะแกรม [44,45]

เมื่อนำ R และ C มาต่อกันแบบขนาน และต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า E ดังรูปที่ 2.20(ก) จะเห็นว่า จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่าน R และ C มีค่าเท่ากับ I_R และ I_C ตามลำดับ ส่วนกระแสทั้งหมดของวงจรคือ I_T มีค่าเท่ากับกระแส I_R บวกกับกระแส I_C ทางเฟสเซอร์ โดยกระแส I_R จะอิน-เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

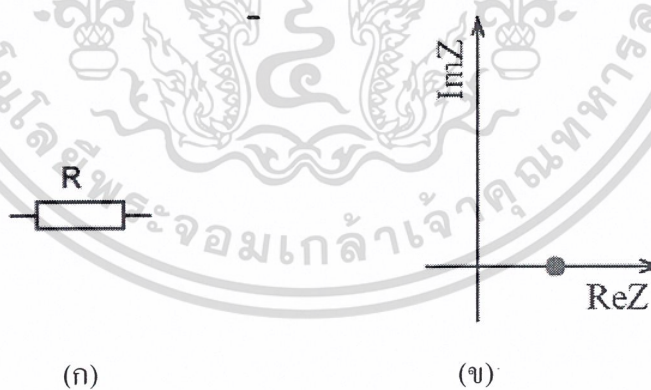
เฟสกับแรงดัน E แต่กระแส I_C จะนำหน้าแรงดัน E ไปเป็นมุม 90° การเขียนไดอะแกรมของรูปคลื่น และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของวงจร RC ขนานดังในรูปที่ 2.20(ก) เราจะใช้แรงดัน E เป็นตัวอ้างอิง ในการเขียนเสมอ ดังเช่นในรูปที่ 2.20(ข) จะเห็นว่า ไดอะแกรมของรูปคลื่นของแรงดัน E จะเริ่มต้น ที่จุด 0° ส่วนในรูปที่ 2.20(ค) จะเห็นว่าเฟสเซอร์ ของแรงดัน E จะเขียนในแนวแกน X หรือแกน 0° เช่นกัน

ไดอะแกรมของรูปคลื่นของวงจร RC ขนาน ดังในรูปที่ 2.20(ข) จะเห็นว่า รูปคลื่นของแรงดัน E จะอินเฟสกับรูปคลื่นของกระแส I_R และจะล่าหลังรูปคลื่นของกระแส I_C อยู่เป็นมุม 90° หรือ $\pi/2$ rad นั่นคือกระแส I_C จะนำหน้ากระแส I_R ไปเป็นมุม 90° และจะนำหน้าแรงดัน E ไปเป็นมุม 90° เช่นเดียวกัน ส่วนรูปคลื่นของกระแส I_T ได้มาจากค่าทุก ๆ ขณะเวลาของรูปคลื่นของกระแส I_R กับ I_C ร่วมกัน

ส่วนเฟสเซอร์ไดอะแกรมในรูปที่ 2.20(ค) จะเห็นว่าเฟสเซอร์ของกระแส I_R จะอินเฟสกับของแรงดัน E และมีทิศทางชี้ไปทางขวา (0°) และเฟสเซอร์ของกระแส I_C มีทิศทางชี้ขึ้นในแกนตั้ง ทำมุม 90° กับแรงดัน E ส่วนเฟสเซอร์ของกระแส I_T ได้มาจากผลรวมทางเฟสเซอร์ระหว่างกระแส I_R กับ I_C ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของกระแสดังนี้คือ

$$I_T^2 = I_R^2 + I_C^2 \quad \text{หรือ} \quad I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (2.24)$$

2.9.7 ลักษณะของวงจรสมมูลในการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์



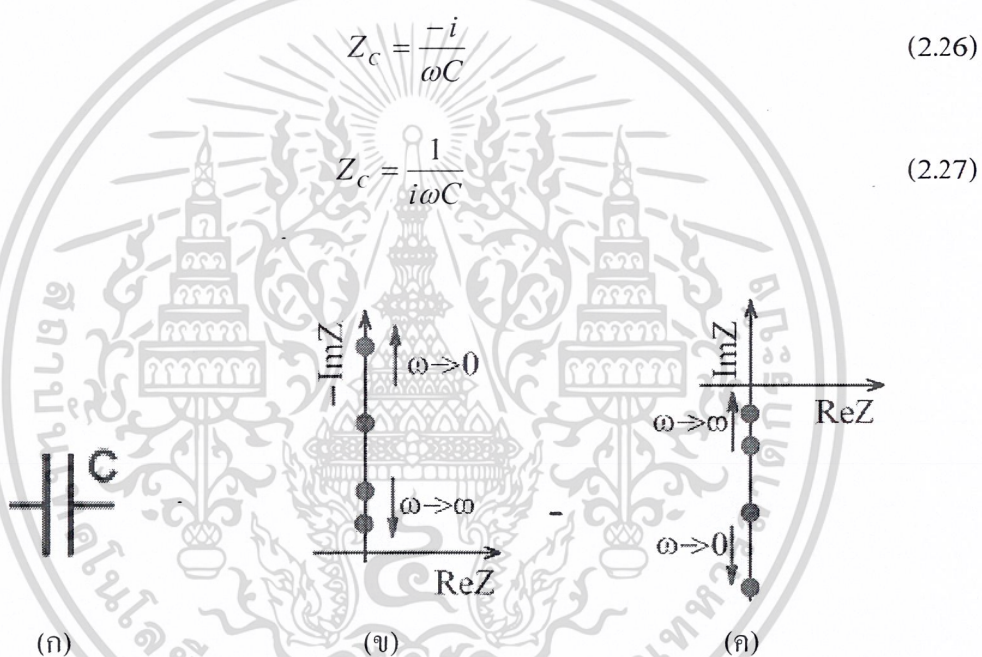
รูปที่ 2.21 (ก) วงจรมีตัวต้านทานอย่างเดียว และ (ข) กราฟ Cole-Cole ที่มีจุดบนแกน x [44,45]

การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจริง (real 'Z') ในแนวแกน x กับค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจินตภาพ (imaginary 'Z') ในแนวแกน y ซึ่งเรียกว่า กราฟ Cole-Cole โดยความถี่จะขึ้นอยู่กับค่าของอิมพีแดนซ์และเฟสของอิมพีแดนซ์ของแต่ละวงจร ถ้าวงจรมีเพียงตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว

ดังรูปที่ 2.21(ก) จะมีจุดหรือเส้นบนแกน x ในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.21(ข) โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์แล้ว จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.25)

$$Z_R = R \quad (2.25)$$

ถ้าวงจรมีเพียงตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.22(ก) จะมีจุดหรือเส้นบนแกน y ฝั่งบนในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.22(ข) โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.26) ถ้ามีจุดหรือเส้นบนแกน y ฝั่งล่างในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.22(ค) โดยวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.27) โดยความถี่ต่ำจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง และความถี่สูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

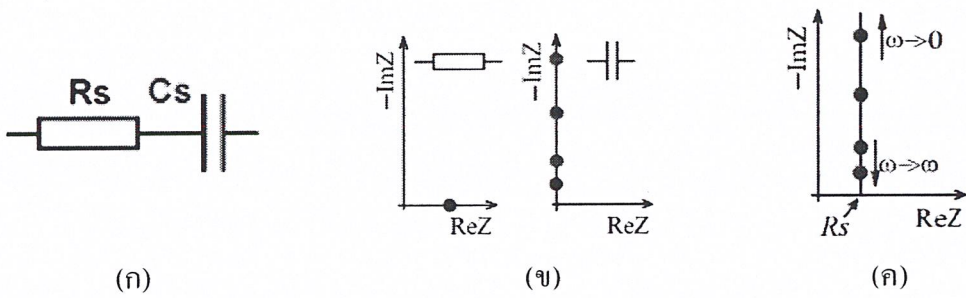


รูปที่ 2.22 (ก) วงจรมีตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว (ข) กราฟ Cole-Cole จะมีจุดบนแกน +y และ (ค) กราฟ Cole-Cole จะมีจุดบนแกน -y [44,45]

ถ้าวงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.23(ก) จะมีจุดบนแกน X สำหรับตัวต้านทานและจะมีจุดบนแกน y สำหรับตัวเก็บประจุ ในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.23(ข) เมื่อมาต่ออนุกรมกัน จะมีอิมพีแดนซ์ในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.23(ค) โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.28)

$$Z_c = R_s - \frac{i}{\omega C_s} \quad (2.28)$$

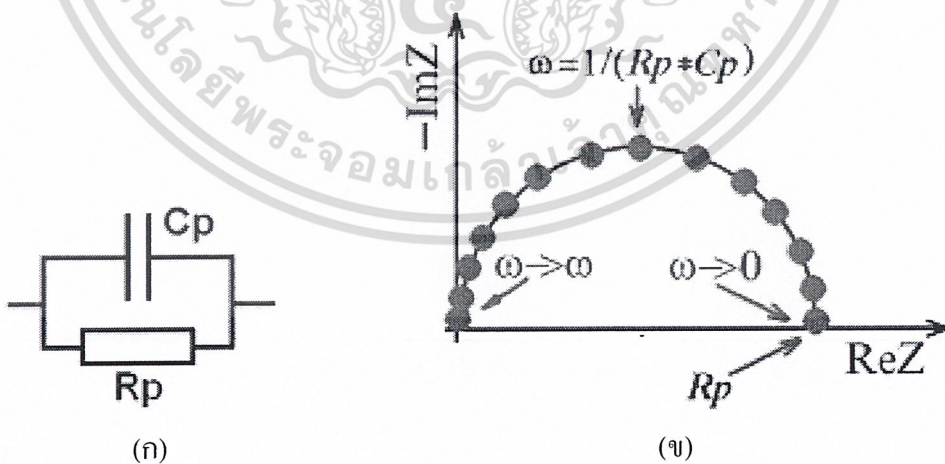
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 (ก) วงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน (ข) กราฟ Cole-Cole ที่มีจุดบนแกน x สำหรับตัวต้านทาน และมีจุดบนแกน +y สำหรับตัวเก็บประจุ และ (ค) กราฟ Cole-Cole ของวงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน [44,45]

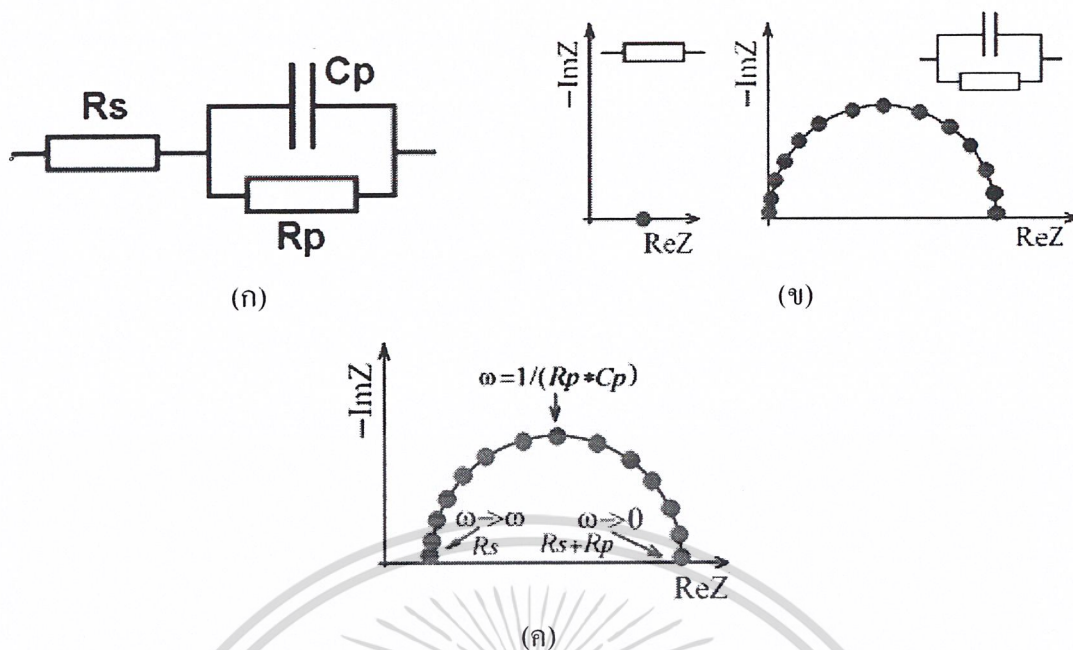
ถ้าวงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่อขนานกัน ดังรูปที่ 2.24(ก) จะมีอิมพีแดนซ์ในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.24(ข) โดยมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมในระนาบเมื่อมาต่อขนานกัน แสดงว่าเป็นวงจรสมมูลของวงจรขนาน RC โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.29)

$$Z_c = \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} - i \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \tag{2.29}$$



รูปที่ 2.24 (ก) วงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่อขนานกัน และ (ข) กราฟ Cole-Cole ของวงจรมีตัวต้านทานกับตัวเก็บประจุต่อขนานกัน [44,45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 (ก) วงจรที่มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ (ข) กราฟ Cole-Cole จะมีจุดบนแกน x สำหรับตัวต้านทานและจะมีจุดในลักษณะเป็นครึ่งวงกลมในระนาบ สำหรับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ และ (ค) กราฟ Cole-Cole ของวงจรที่มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ [44.45]

ถ้าวงจรมีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.25(ก) จะมีจุดบนแกน x สำหรับตัวต้านทานและจะมีจุดในลักษณะเป็นครึ่งวงกลมในระนาบ สำหรับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.25(ข) เมื่อนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับตัวต้านทานที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ จะมีอิมพีแดนซ์ในกราฟ Cole-Cole ดังรูปที่ 2.25(ค) โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ จะมีค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (2.30)

$$Z_C = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} - i \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \tag{2.30}$$

2.10 สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation)

เป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิต่ำกับค่าคงที่สมดุล ดังสมการที่ (2.31)

$$\frac{d \ln K}{d \frac{1}{T}} = \frac{-H}{R} \tag{2.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K คือ ค่าคงที่สมดุล
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
 H คือ ความร้อนของปฏิกิริยา
 T คือ อุณหภูมิ

โดยค่าคงที่สมดุลของ K คือ K_1/K_2 โดยที่ K_1 และ K_2 คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับตามลำดับ เมื่อแทนความสัมพันธ์ในสมการ 2.31 และทำการจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ (2.32)

$$\frac{d \ln K_1}{d \frac{1}{T}} - \frac{d \ln K_2}{d \frac{1}{T}} = \frac{-H}{R} \quad (2.32)$$

โดยอาร์เรเนียส (S. Arrhenius) [46] ได้ตระหนักว่าสมการที่ (2.32) สามารถแบ่งออกได้ อย่างง่ายเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนจะอยู่ในรูปแบบของ

$$\frac{d \ln K}{d \frac{1}{T}} = \frac{-E}{R} \quad (2.33)$$

โดยพจน์ E อาร์เรเนียสได้นิยามว่า เป็นตัวแทนของความแตกต่างของพลังงานระหว่างตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นพจน์ E จึงถูกเรียกว่า พลังงานก่อกัมมันต์ หรือ พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของปฏิกิริยา โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะขอใช้คำว่าพลังงานกระตุ้น และจากสมการที่ (2.33) เมื่อทำการอินทิเกรตเทียบกับอุณหภูมิ จะได้ดังสมการที่ (2.34)

$$\ln K = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (2.34)$$

โดยที่พจน์ A เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต โดยในสมการที่ (2.34) สามารถเปลี่ยนรูปเป็น

$$K = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2.35)$$

ซึ่งสมการที่ (2.35) จะเป็นรูปแบบที่พบเห็นได้บ่อยของสมการอาร์เรเนียส โดยค่า A คือค่าคงที่ ในกรณีของแก๊สอาจจะเกี่ยวข้องกับความเร็วในการชนกันของโมเลกุลและความไม่เป็นระเบียบของสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานกระตุ้น คือ ระดับพลังงานที่ตัวทำปฏิกิริยาหรือสารตั้งต้นจะต้องเอาชนะเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น ดังนั้นพลังงานกระตุ้นจึงถูกมองว่าเป็นระดับพลังงานที่มีผลต่อการทำให้เกิดปฏิกิริยาของสถานะนั่นเอง .

ตัวอย่างของการนำสมการอาร์เรเนียสไปใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ในกรณีนี้คือระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการจับประจุพาหะที่สถานะปิดของตัวอุปกรณ์ในโครงสร้างแบบชั้นเดียว Au/AIDCN/Au [47] โดยสมการอาร์เรเนียสที่นำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการวิเคราะห์ คือ

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{KT}\right) \quad (2.36)$$

เมื่อ E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น
 σ คือ ค่าความนำทางไฟฟ้า
 σ_0 คือ ค่าความนำทางไฟฟ้าที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์
 K คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann
 T คือ อุณหภูมิ

เมื่อจัดรูปใหม่ให้เข้ากับความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้

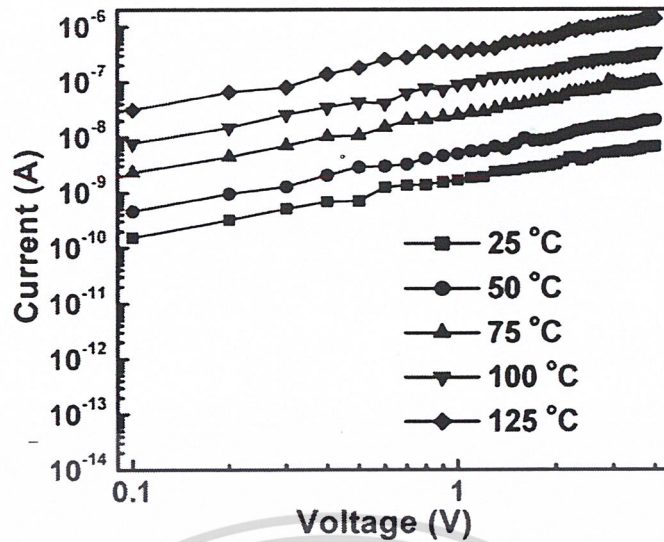
$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{-E_a}{K}\right) \frac{1}{T} \quad (2.37)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรง $y=mx+c$ จะได้

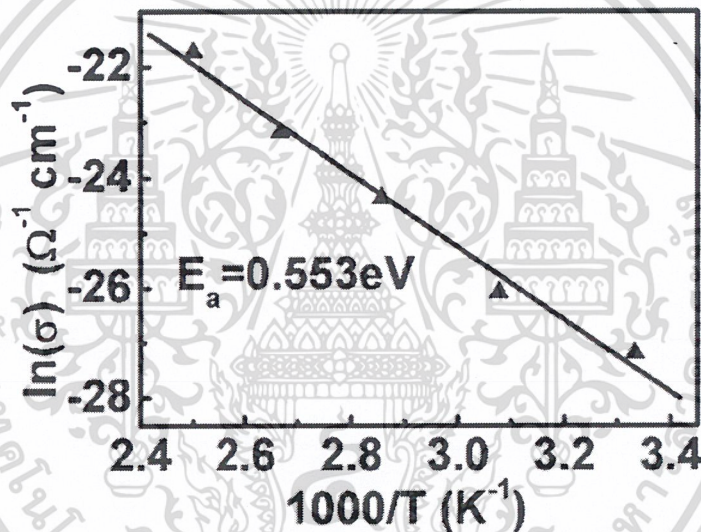
$$\text{Slope (m)} = \left(\frac{-E_a}{K}\right) \quad (2.38)$$

จากตัวอย่างการทดลอง ในการวัดค่ากระแสและแรงดันของอุปกรณ์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.26(ก) หลังจากนั้นทำการพล็อตระหว่างส่วนกลับของอุณหภูมิที่แรงดัน +1 โวลต์ กับค่ากระแสที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.26(ข)

และจากค่าความชันที่ได้ จากสมการที่ (2.38) เมื่อนำค่าคงที่ของ Boltzmann คูณเข้ากับค่าความชันที่ได้จากกราฟก็จะได้เป็นค่าพลังงานกระตุ้นของอุปกรณ์ที่แรงดัน +1 โวลต์ที่สถานะปิดของตัวอุปกรณ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.26 (ก) สมบัติของกระแสและแรงดันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และ (ข) กราฟอาร์เรเนียส [47]

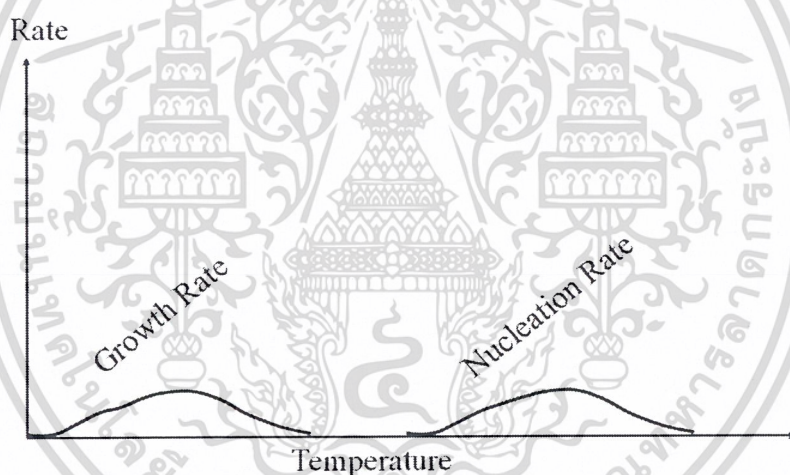
2.11 การเกิดฟิล์มบาง (Nucleation and Growth)

เมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (bulk) สารที่มีลักษณะเป็นของแข็งนั้นจะมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกับการจัดเรียงตัวของอนุภาคหรืออะตอมที่ทำให้เกิดฟิล์มบาง โดยฟิล์มบางบนฐานรองรับเดียวกันก็อาจมีความแตกต่างกันได้ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของการจัดเรียงตัวของอะตอม โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะขึ้นอยู่กับการเกิดโครงสร้างและสภาพของพื้นผิวเริ่มต้นเมื่อมีการจัดเรียงตัว ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะต่าง ๆ เช่น ขนาดของเม็ดผลึก รูปร่างและทิศทางของผลึกจะถูกกำหนดโดยช่วงเริ่มต้นของการเกิดผลึกซึ่งเป็นช่วงที่สำคัญที่สุด และส่งผลถึงการทับถมของอะตอมจนเกิดเป็นผลึกที่สมบูรณ์หรือไม่สมบูรณ์ในภายหลัง ดังนั้นความรู้รายละเอียดของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตฟิล์มบางเพื่อการใช้งานจริง ดังนั้นการเริ่มต้นทับถมของอะตอมเพื่อเกิดเป็นฟิล์มบางควรจะเกิดบนฐานรองรับที่สะอาดไม่มีอะตอมชนิดอื่นมาเจือปน เมื่ออนุภาคหรืออะตอมแรกเข้ามาสัมผัสกับฐานรองรับแล้วเกิดการยึดเกาะกับฐานรองรับจะเรียกว่า ปฏิกริยานิวเคลียส (nucleation) หรือการเกิดนิวเคลียส

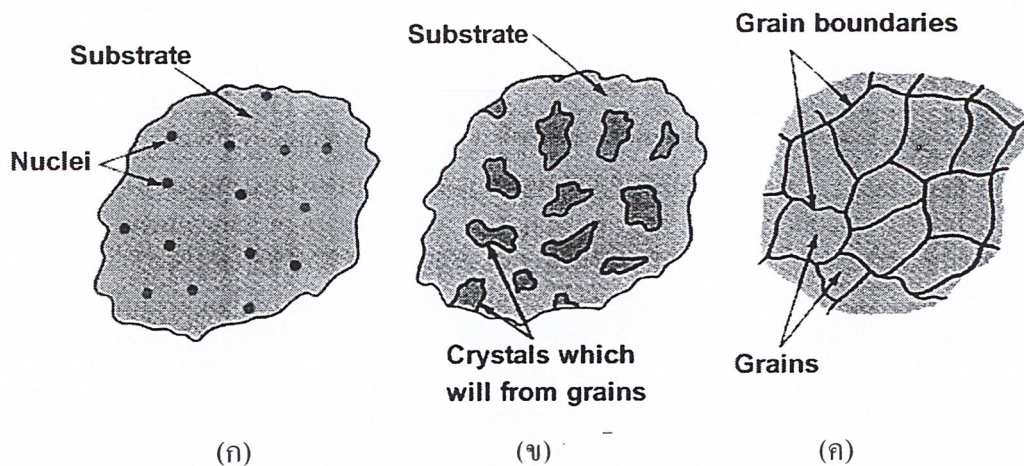
นิวเคลียส คือ กระบวนการเริ่มต้นที่เกิดขึ้นในการก่อตัวของผลึกจากส่วนหนึ่งของไอออน อะตอม หรือโมเลกุลที่เกิดการจัดเรียงตัวในลักษณะรูปแบบของผลึกของแข็งที่เกิดจากสารละลายหรือไอและส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโต (growth) เป็นผลึกต่อไปเมื่อมีการทับถมที่เพิ่มขึ้น

การเกิดผลึกที่ดีของฟิล์มบางจะพิจารณาจากขนาดของเม็ดผลึก (grain size) ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการเกิดผลึกจะต้องอาศัยอัตราการเกิดนิวเคลียสและการเจริญเติบโตจากการทับถมที่เหมาะสม [48] แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การเกิดนิวเคลียสและการเจริญเติบโตจากการทับถมของอะตอมที่ดี [48]

ขนาดของเม็ดผลึกที่ต่างกันเป็นผลมาจากอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเจริญเติบโตของผลึกที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น หากเกิดนิวเคลียสมากก็จะทำให้อะตอมตัวต่อไปที่จะเกิดการทับถมมีตำแหน่งที่จะเข้าไปรวมตัวหลายตำแหน่งดังรูปที่ 2.28(ก) ส่งผลให้เกิดผลึกขึ้นหลาย ๆ ผลึกพร้อมกันดังรูปที่ 2.28(ข) และเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้ ดังนั้นเมื่อผลึกขยายตัวจนชนกับผลึกข้างเคียงก็จะเกิดเป็นขอบของผลึกขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.28(ค) ดังนั้นหากมีตำแหน่งเริ่มต้นของผลึกที่เกิดจากนิวเคลียสมากก็จะทำให้มีความหนาแน่นของผลึกสูงและเม็ดผลึกมีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีขอบพร่องของผลึกที่เพิ่มขึ้น

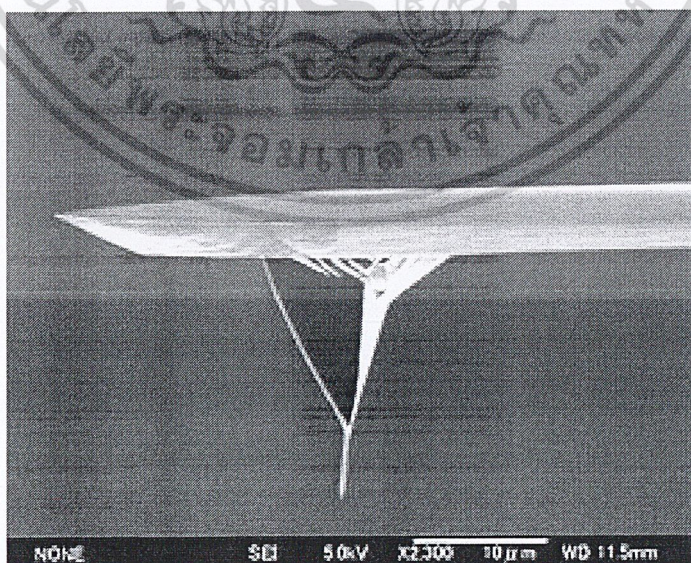


รูปที่ 2.28 (ก) การเกิดนิวเคลียสของตำแหน่งผลึก (ข) การเจริญเติบโตของผลึกจากการทับถม และ (ค) ผลึกที่ผิครูปร่างจากการเจริญเติบโตและเกิดเป็นขอบของผลึก [49]

2.12 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

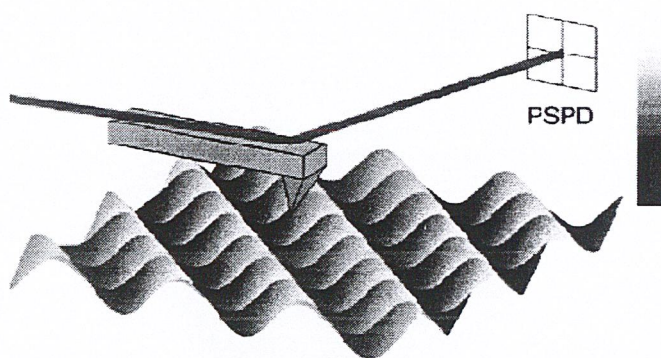
2.12.1 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโพรบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวหน้าของ ชิ้นงาน โดยที่โพรบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆ ที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (cantilever) และสามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน โดยภาพถ่ายจาก Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงดังรูปที่ 2.29

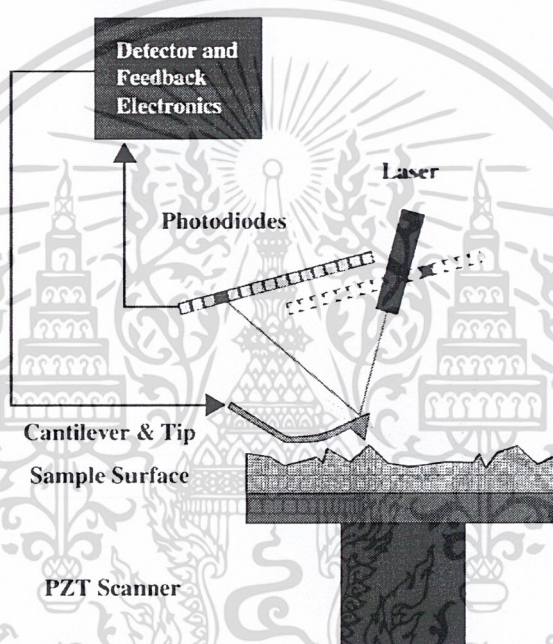


รูปที่ 2.29 ภาพถ่าย SEM ของคานและปลายเข็มที่ใช้ในการวัด [50]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.30 (ก) ระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน และ (ข) ระบบการวัดของ AFM [51]

ในช่วงเริ่มแรกกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานดังรูปที่ 2.30(ก) แสดงให้เห็นการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยคานสามารถโค้งงอได้ ซึ่งแสงเลเซอร์จะเดินทางตกกระทบบนคานแล้วสะท้อนออกมาตกกระทบบนตัวตรวจจับทางแสง จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสง

การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิกเปียโซอิเล็กทริกเป็นส่วนของการเคลื่อนที่ของฐานคู่ได้จากรูปที่ 2.30(ข) โดยการเคลื่อนที่ของวัสดุเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปียโซอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงก็เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่เข้าไปกระตุ้น ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอมในแนวแกน x, y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถทำงานได้ในสองโหมดหลัก คือการทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับและการทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ โดยการทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นจะกำหนดให้เปียโซเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน (หรือ เข็ม) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้ โดยรักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานให้มีค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่าโหมดแรงคงที่ ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่น่าเชื่อถือได้

ส่วนการทำงานแบบที่สองไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็นโหมดที่ควบคุมให้การเคลื่อนที่ในตำแหน่งแนวแกน z คงที่ ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบมากที่ความละเอียดสูง การวัดเพื่อให้ได้ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยการใช้อันตรกิริยาที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงาน ซึ่งวิธีที่ใช้วัดหลัก ๆ มีอยู่ด้วยกันสามวิธี คือ โหมดสัมผัส (contact mode), โหมดสัมผัสแบบตื้น (tapping mode) และ โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)

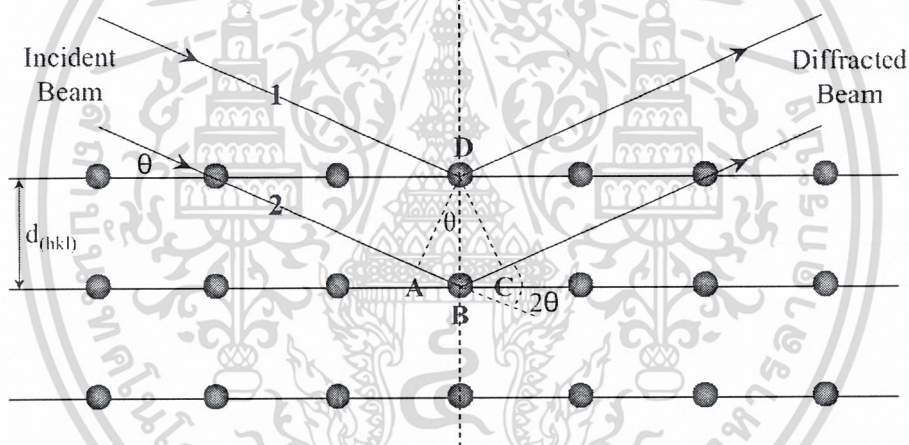
โหมดสัมผัส เป็นวิธีการวัดพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่ง เข็มและชิ้นงานมีระยะใกล้กันมากขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน โดยการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นใกล้กันในระดับที่มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น ปัญหาที่สำคัญของโหมดสัมผัส คือมีแรงซึ่งมีค่ามากเกิดในแนวตามพื้นผิวขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน

โหมดสัมผัสแบบตื้นเป็นโหมดการทำงานพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมทั่วไป ขณะทำงานคานจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่เหมาะสมและมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน ด้วยการสัมผัสพื้นผิวแบบตื้นนี้ทำให้แรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นยังอยู่ในช่วงที่เกิดการผลักเหมือนเดิม เนื่องจากว่าการสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงตามแนวพื้นผิวลดลงขณะที่เข็มลากผ่านพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความอ่อนมากการวัดด้วยโหมดสัมผัสแบบตื้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการวัดด้วยโหมดสัมผัส

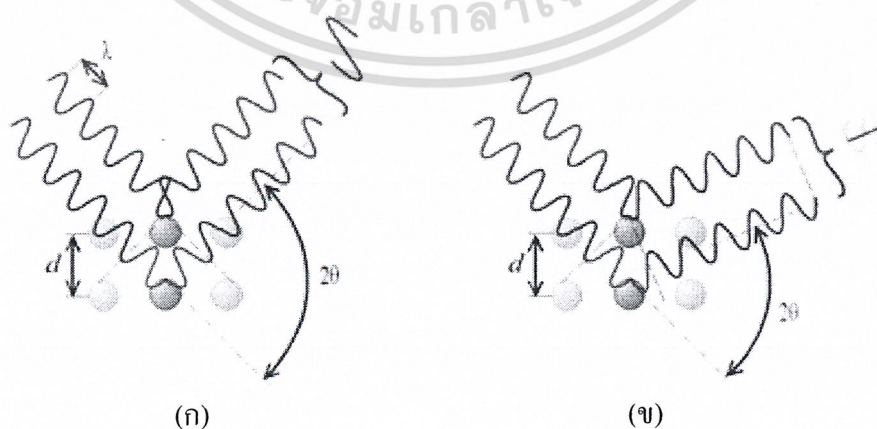
โหมดไม่สัมผัส เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมได้ ซึ่งคานต้องอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานต้องไม่ห่างเกินกว่าขอบเขตของแรงผลักระหว่างโมเลกุล โหมดการทำงานนี้สร้างขึ้นได้ยากภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถใช้วัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนพื้นผิวได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้า

2.12.2 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์ม ทำให้เราทราบว่าฟิล์มนั้นมีค่าคงที่แลตติซ (lattice constant) เท่าใด และมีขนาดอะไรบ้างในฟิล์ม โดยรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.5-2.5 Å รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงมากวิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก เช่น ทองแดง ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous X-ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-Ray) รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงคลื่น คือ เกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก และหลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน ถ้าหากพิจารณาเฉพาะบริเวณที่รังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอม รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาค คือ กระจิงออกทุกทิศทางเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับอะตอมซึ่งเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงสร้างผลึกอะตอมนี้จะทำหน้าที่กระจิงรังสีเอกซ์ ทำให้มีสภาพเหมือนกับว่ารังสีเอกซ์ที่ตกกระทบลงมามีการสะท้อน



รูปที่ 2.31 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึกตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) [52]



รูปที่ 2.32 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ก) แบบเสริมกัน และ (ข) แบบหักล้างกัน [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 2.31 เมื่อมีรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึก โดยระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d จากรูป รังสีเอกซ์ตกกระทบที่จุด D และ B ทำมุม θ กับระนาบ แล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม θ ผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากับ $AB + BC$ ซึ่งเท่ากับ $2d\sin\theta$ โดยการแทรกสอดแบบเสริมของรังสีจะเกิดขึ้นได้เมื่อผลต่างทางเดินรังสีจะต้องมีค่าเท่ากับ $n\lambda$ โดย n เป็นจำนวนเต็ม และ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ แสดงได้ดังสมการที่ (2.39)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.39)$$

เมื่อ n คือลำดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

สมการที่ (2.39) เรียกว่า กฎของแบรกก์ ในทางผลึกวิทยาสามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่าง ๆ โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ $(h k l)$ ซึ่งค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0, 1, 2,... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ และค่าคงที่ของโครงผลึก ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกจะมีต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่าง ๆ

ในกรณีอย่างง่าย เมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (cubic) ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกดังนี้ $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.40)$$

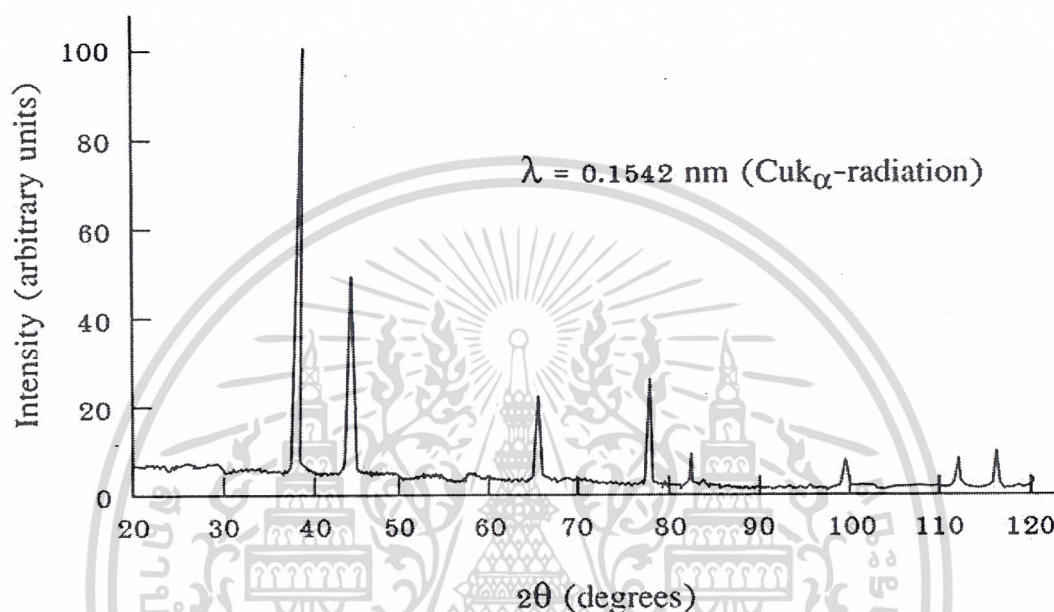
จากสมการ (2.39) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการ (2.40) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.41)$$

- เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ
 λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

ระนาบต่าง ๆ ในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์จะเรียกว่าระนาบแบรกก์ มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมการเลี้ยวเบนซึ่งจะมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อน และเมื่อนำฟิล์มบางไปตรวจวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer

(XRD) ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่าง ๆ จะถูกตรวจหา โดยค่าทั้งสองจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า แบบอย่างการเลี้ยวเบน และจะมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน เมื่อได้ข้อมูลที่กล่าวมาแล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากสมการของ Sherrer สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้ [54]

$$D = \frac{K\lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.42)$$

- เมื่อ D คือ ขนาดของเม็ดผลึก
 K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ($0.89 \leq K \leq 0.94$)
 θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ความกว้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางของยอดการเลี้ยวเบน (Full Width at Half-Maximum of the diffraction peak: FWHM)
 λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคออเจอร์อิเล็กตรอน

การศึกษาองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคออเจอร์อิเล็กตรอน (Auger Electron Spectroscopy: AES) [55] เป็นเทคนิคหนึ่งในอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นเทคนิคที่ศึกษาถึงการกระจายของพลังงานอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวัสดุแล้วให้พลังงานกับผิววัสดุ โดยให้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดเพื่อไปกระตุ้นให้เกิดการไอออไนเซชัน (ไอออไนเซชันเป็นขบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมและไอออนบวกในสถานะแก๊ส) โดยออเจอร์อิเล็กตรอนเกิดจากรังสีเอกซ์เฉพาะตัว โดยที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรวงนอก เช่น วงโคจร L หรือ M เป็นต้น ออเจอร์อิเล็กตรอนมีระดับพลังงานในช่วง 0.05 ถึง 2 keV ใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุได้เช่นเดียวกับรังสีเอกซ์

การเกิดออเจอร์อิเล็กตรอนแบ่งเป็นสองขั้นตอน ขั้นแรก ใช้ลำรังสีเอกซ์ หรือ ลำอิเล็กตรอนชนธาตุ A ทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดและเกิดไอออนที่สถานะกระตุ้น A^+

เมื่อใช้รังสีเอกซ์ชน ปฏิริยาที่สถานะกระตุ้นคือ



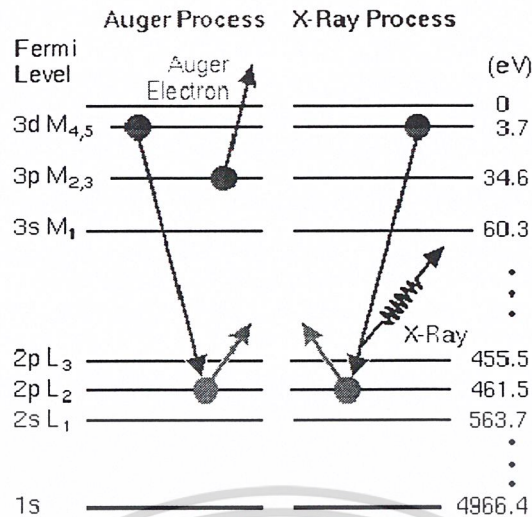
ในกรณีที่ใช้ลำอิเล็กตรอนชน ปฏิริยาที่สถานะกระตุ้นคือ



e_i^- แทนลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดที่วิ่งชนธาตุ A และ e_i^- ด้านขวาแทนอิเล็กตรอนตัวเดิมหลังจากเกิดอันตรกิริยากับธาตุ A และสูญเสียพลังงานบางส่วน e_A^- แทนอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงในสุดของธาตุ A ซึ่งไอออนของธาตุ A ในสถานะกระตุ้นจะเกิดการผ่อนคลายพลังงานได้สองทางคือ



e_A^- แทนออเจอร์อิเล็กตรอน ส่วน $h\nu_f$ แทนรังสีฟลูออเรสเซนซ์



รูปที่ 2.34 การเกิดออเจอร์อิเล็กตรอน [56]

กระบวนการผ่อนคลาย (relaxation) อธิบายได้จากสมการ (2.47) โดยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ $h\nu_f$ จะไม่ขึ้นกับพลังงานที่ใช้กระตุ้น ซึ่งการกระตุ้นจะใช้รังสีที่มีหลายความยาวคลื่น โดยสมการที่ (2.45) จะเป็นการเปล่งออเจอร์อิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของอิเล็กตรอน โดยมีพลังงานจลน์ E_k และพลังงานของออเจอร์จะไม่ขึ้นกับพลังงานโฟตอนหรืออิเล็กตรอนที่เข้าชนธาตุนั้น แต่พลังงานลำอิเล็กตรอนที่ชนจะต้องชนะพลังงานยึดเหนี่ยว E_b ของอิเล็กตรอนวงในสุดให้ได้

พลังงานจลน์ของออเจอร์อิเล็กตรอนคือผลต่างระหว่างพลังงานที่ปล่อยออกมาจากการผ่อนคลายของไอออนในสถานะกระตุ้น ($E_b - E'_b$) กับพลังงานที่ต้องใช้เพื่อเอาอิเล็กตรอนตัวที่สองออกจากวงโคจร สมการนี้เขียนได้เป็น E'_b

$$E_k = (E_b - E'_b) - E'_b = E_b - 2E'_b \quad (2.47)$$

การเปล่งออเจอร์อิเล็กตรอน เป็นการอธิบายรูปแบบของอิเล็กตรอนวงในที่เกิดการทรานซิชั่น เช่น การทรานซิชั่นออเจอร์ KLL จะเริ่มจากดึงอิเล็กตรอนหนึ่งตัวจากวง K ออก อิเล็กตรอนหนึ่งตัวจากวง L เกิดการทรานซิชั่นไปยังวง K ที่ว่างอยู่พร้อมกับปล่อยอิเล็กตรอนตัวที่สองจากวง L ออกมา การทรานซิชั่นออเจอร์ LMM และ MNN ก็สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกัน

สเปกตรัมออเจอร์จะให้พีคเฉพาะเพียงไม่กี่พีคและอยู่ในช่วง 20 ถึง 1000 อิเล็กตรอน โวลต์ โดยการวัดออเจอร์แกน y จะแทนอนุพันธ์อัตรานับกับฟังก์ชันพลังงานจลน์ 20 ถึง 1000 อิเล็กตรอน โวลต์ของอิเล็กตรอนบนแกนราบ

การเปล่งอิเล็กตรอนออเจอร์ เป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ในธาตุหนัก (เลขอะตอมมาก) มักจะเกิดฟลูออเรสเซนส์ ในขณะที่ธาตุเบา (เลขอะตอมน้อย) มักจะเกิดออเจอร์อิเล็กตรอน ดังนั้นในการวิเคราะห์สารบางชนิดเท่านั้นจึงเหมาะกับเทคนิคออเจอร์ โดยถ้าเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมน้อย ๆ เทคนิคออเจอร์จะสามารถวิเคราะห์ได้ดี

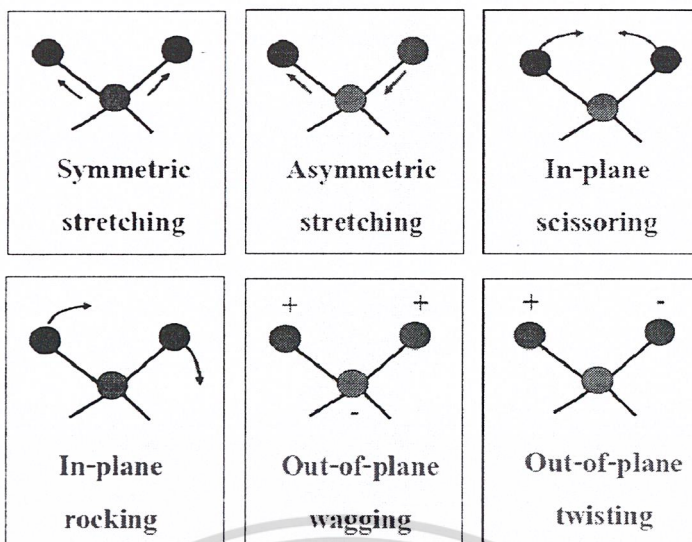
สเปกตรัมออเจอร์ ได้จากการใช้ลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนระดมยิง (จุดเล็ก ๆ) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ถึง 500 ไมครอน มีพลังงานจลน์ในช่วง 20-1000 eV ซึ่งพลังงานไม่สูงมากนัก จึงทะลุชั้นผิวเข้าไปเพียง 2 ถึง 3 ชั้นจากด้านบน (เข้าไปลึก 3 ถึง 20 อังสตรอม) เทคนิคนี้จึงแทนองค์ประกอบที่แท้จริงของผิวของแข็ง ถ้าใช้ลำอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูงจะเหมาะกับการวิเคราะห์องค์ประกอบชั้นผิวที่ลึกลงไป (ชั้นที่ 4 หรือ 5)

การหาองค์ประกอบของธาตุที่ลึกลงไปที่มีความลึกต่าง ๆ (depth profiling of surface) ทำได้โดยการกัดผิวด้วยลำไอออนอาร์กอนแล้วใช้เทคนิคออเจอร์อิเล็กตรอนวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ โดยออเจอร์ไมโครโพรบจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำไอออนประมาณ 5 ไมโครเมตร โฟกัสลงบนผิว ซึ่งไมโครโพรบและลำที่ใช้กัด (etching beam) จะทำงานพร้อมกัน โดยการวัดความเข้มของฟลักออเจอร์เทียบกับอัตราที่กัดสัมพันธ์กับเวลา จึงได้องค์ประกอบของธาตุที่มีความลึกต่าง ๆ เปลี่ยนไป ข้อมูลนี้สามารถใช้ศึกษาการกัดกร่อนเชิงเคมี และสมบัติของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำได้

2.12.4 การวิเคราะห์พันธะของสารประกอบด้วยเทคนิค Fourier-Transform Infrared

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโตรสโกปีชนิดหนึ่ง ที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสสารในย่านความถี่ของแสง โดยการวิเคราะห์พันธะของสารจะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุลซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน โดยช่วงเลขคลื่น $4000 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ จะเป็นช่วงที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล เช่น C=O, N-H, CH₃ เป็นต้น โดยเทคนิคนี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวัสดุศาสตร์ เช่น พอลิเมอร์ โดยช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ เมื่อสารดูดกลืนแสงในย่าน IR จะทำให้อะตอมที่ยึดกันด้วยพันธะเคมีเกิดการสั่นได้ 2 แบบ คือ

- Stretching คือการสั่นแบบยืด เป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่เกิดพันธะกัน ซึ่งมีทั้ง symmetric stretching และ asymmetric stretching
- Bending คือการสั่นแบบงอ เป็นการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่าง 2 พันธะ ซึ่งจะมีด้วยกัน 4 รูปแบบ คือ in-plane scissoring, in-plane rocking, out-of-plane wagging และ out-of-plane twisting โดยตัวอย่างของการสั่นแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.35



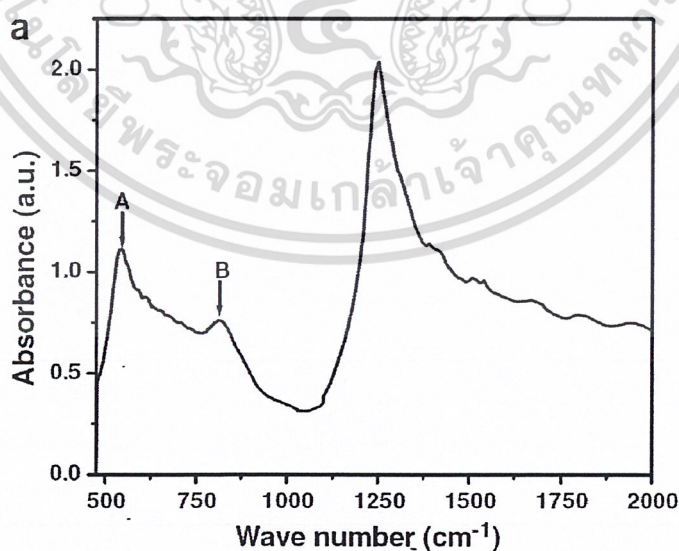
รูปที่ 2.35 การสั่นแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขณะทำการตรวจวัด FT-IR [57]

โดยในการวิเคราะห์จะนำเอาหลักการของไมเคลสันอินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์มาใช้แทนอุปกรณ์กระจายแสง (slit) แล้ววัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เทียบกับเวลา ตัวอย่างการนำไปใช้งานเพื่อหาพันธะของสารประกอบ จะหาได้จากตำแหน่งของพีคและกระบวนการสั่น เช่น

C-H สั่นแบบยืด มีตำแหน่งพีค $\sim 3,000-2840 \text{ cm}^{-1}$

C=C สั่นแบบยืด มีตำแหน่งพีค 1600 cm^{-1} และ 1475 cm^{-1}

C-H สั่นแบบงอ มีตำแหน่งพีค $\sim 900-675 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 2.36 ตัวอย่างสเปกตรัมจาก FT-IR ของชั้น โลหะออกไซด์ที่มีอัตราคาร์บอนต่ำ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

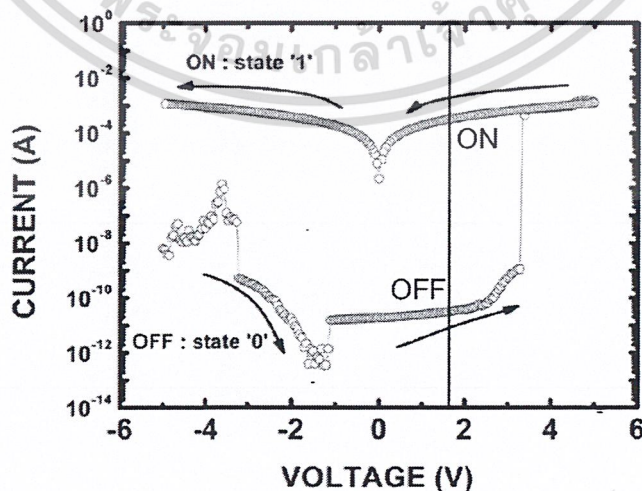
นอกจากนี้ได้มีบางงานวิจัยที่ได้ใช้เทคนิค FT-IR ในการตรวจสอบความเป็นโลหะและโลหะออกไซด์สำหรับโครงสร้างแบบสามชั้นที่เกิดจากการทับถมต่ำ [3] โดยทำการระเหยชั้นโลหะอลูมิเนียมบนฐานรองรับกระจกด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับตัวอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดที่มีความหนา 10 นาโนเมตรแล้วทำการวิเคราะห์ จะพบว่ามีพีกเด่นที่เห็นได้ชัดคือที่ 538 cm^{-1} (ตำแหน่ง A) เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Al-O แบบออกตะฮีดรัล ในขณะที่พีกรองอยู่ที่ประมาณ 812 cm^{-1} (ตำแหน่ง B) จะเกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Al-O แบบเตตระฮีดรัล แสดงดังรูปที่ 2.36

-2.13 การตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

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

2.13.1 ความเป็นฮิสเทอรีซิส

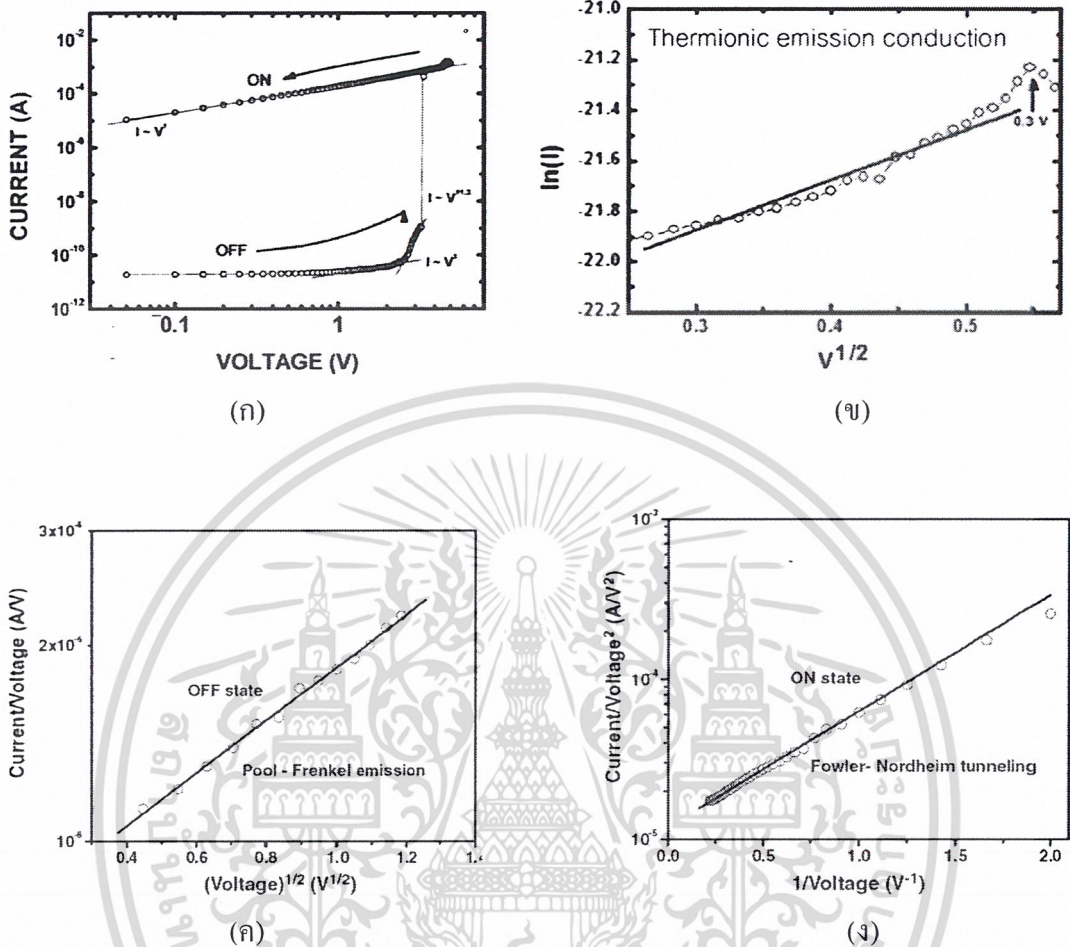
ฮิสเทอรีซิส คือ ผลต่างสูงสุดของค่ากระแสที่อ่านได้จากอุปกรณ์ โดยทำการวัดที่ค่าแรงดันไบอัสเดียวกัน สำหรับในอุปกรณ์หน่วยความจำก็คือค่าที่แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างสถานะทั้งสองสถานะนั่นเอง โดยค่าที่วัดได้นี้จะเรียกว่าค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด แสดงดังรูปที่ 2.37 ในโครงสร้างของ PET/ITO/PMMA/graphene/PMMA/Al ซึ่งสามารถให้ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดได้สูงถึง 10^7 [58]



รูปที่ 2.37 การหาค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

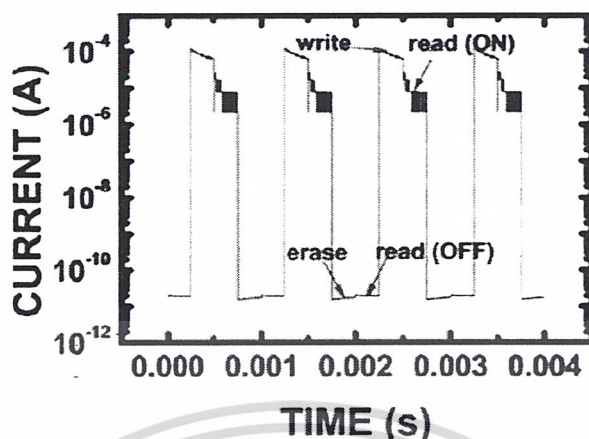
2.13.2 กลไกการนำกระแส



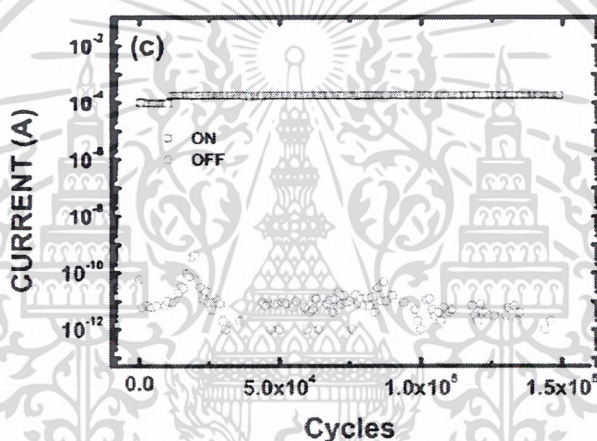
รูปที่ 2.38 ส่วนหนึ่งของกลไกการนำในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ (ก) สเปซชาร์จ (ข) เทอร์โมไอออนิกอิมิสชัน (ค) Pool-Frenkel อิมิสชัน และ (ง) การทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordhem

ในหัวข้อที่ 2.3 ได้พูดถึงกลไกการทำงานของอุปกรณ์ไปแล้วว่ามีสาเหตุหลักมาจากโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ สำหรับกลไกการนำกระแสจะเป็นการพูดถึงกระบวนการฉีดกระแสในตัวอุปกรณ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ อุณหภูมิ และฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ได้อธิบายถึงกลไกในการฉีดกระแสของตัวอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่นกลไกการนำกระแสที่เกิดจากสเปซชาร์จ [58], เทอร์โมไอออนิกอิมิสชัน [59], Pool-Frenkel อิมิสชัน [3] และการทะลุผ่านแบบ Fowler-Nordhem [2] แสดงดังรูปที่ 2.38(ก)-(ง) ตามลำดับ

2.13.3 ความสามารถในการทำซ้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.39 การทดสอบสมบัติการ อ่าน-เขียนซ้ำ (ก) ลักษณะพัลส์ และ (ข) จำนวนครั้ง [58]

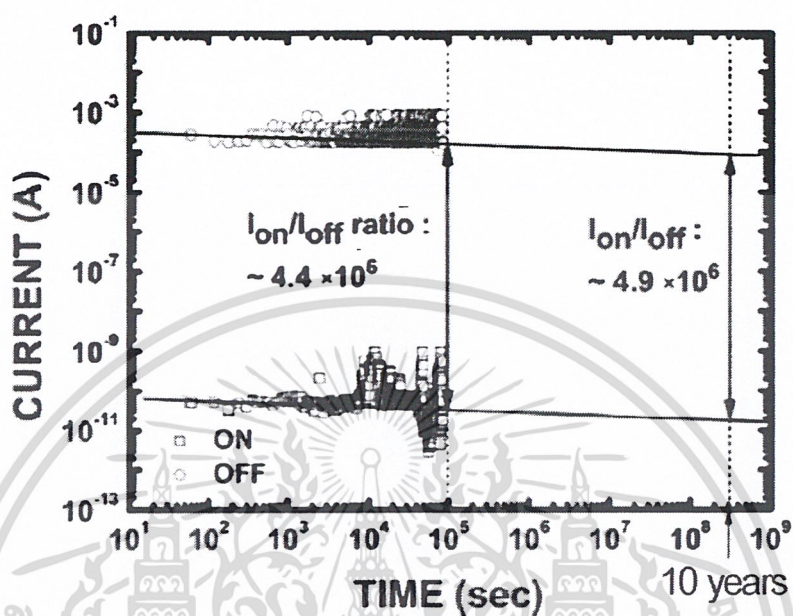
ความสามารถในการทำซ้ำคือจำนวนครั้งของการตรวจวัดที่ควรจะได้ค่าเดิมภายใต้เงื่อนไขเดิม สำหรับในอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะจะเรียกว่า สมบัติในการอ่าน-เขียนซ้ำ หรือ switching cycles นั้นเอง โดยปกติจะใช้การป้อนความต่างศักย์แบบพัลส์ที่ใช้ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน แล้วเก็บข้อมูลเฉพาะตำแหน่งกระแสเปิดและปิด เพื่อดูความสามารถของอุปกรณ์ สำหรับตัวอย่างผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.39

2.13.4 เสถียรภาพ

ความเสถียรภาพเป็นการ วัดสถานะของค่าเอาต์พุตของอุปกรณ์หน่วยความจำภายใต้เงื่อนไขการป้อนศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าคงที่เป็นระยะเวลานาน โดยปกติจะทำการป้อนความต่างศักย์ที่ใช้ในการ เขียน หรือ ลบ หนึ่งครั้ง และหลังจากนั้นจะทำการป้อนแรงดันที่ใช้สำหรับการอ่านค่าเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการอ่านค่าระยะยาว มีจุดประสงค์เพื่อดูแนวโน้มของความสามารถในการเก็บรักษาข้อมูลหรือสถานะของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยในรูปที่ 2.40 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบในโครงสร้างของ PET/ITO/PMMA/graphene/PMMA/Al แสดงดังรูปที่ 2.40



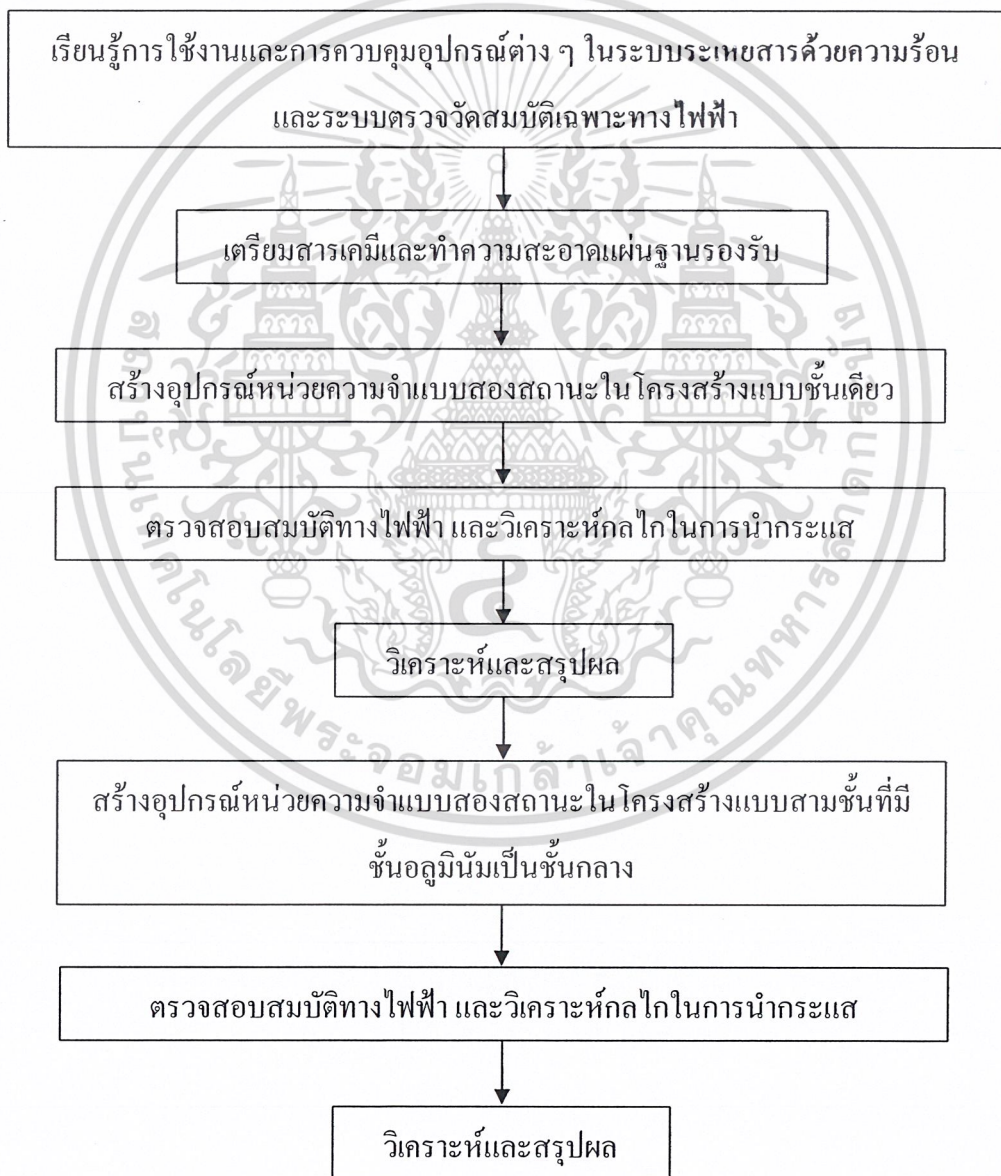
รูปที่ 2.40 การทดสอบเสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสำหรับการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวและแบบสามชั้นที่มีชั้น โลหะอลูมิเนียมเป็นชั้นกลาง สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ได้ดังรูปที่ 3.1



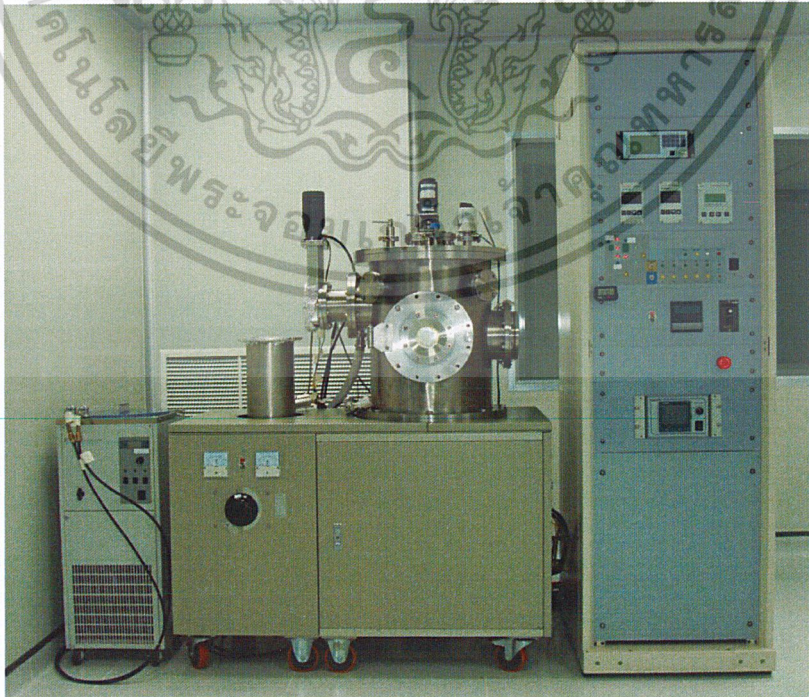
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการเรียนรู้การใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ในระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศและระบบตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า หลังจากนั้นจะทำการเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือ เพื่อใช้ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่อัตราการระเหยของชั้นคอปเปอร์พาทาโลไซยาไนน์แตกต่างกัน ตรวจสอบสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์หลักไถในการเคลื่อนที่ของพาหะ แล้วทำการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้เพื่อทำการหาเงื่อนไขของอัตราการระเหยสารที่เหมาะสม จากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นอลูมิเนียมเป็นชั้นกลาง โดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอลูมิเนียม แล้วทำการตรวจสอบสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์หลักไถในการเคลื่อนที่ของพาหะ จากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลที่ได้เพื่อทำการหาความหนาของชั้นอลูมิเนียมที่เหมาะสม

3.1 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

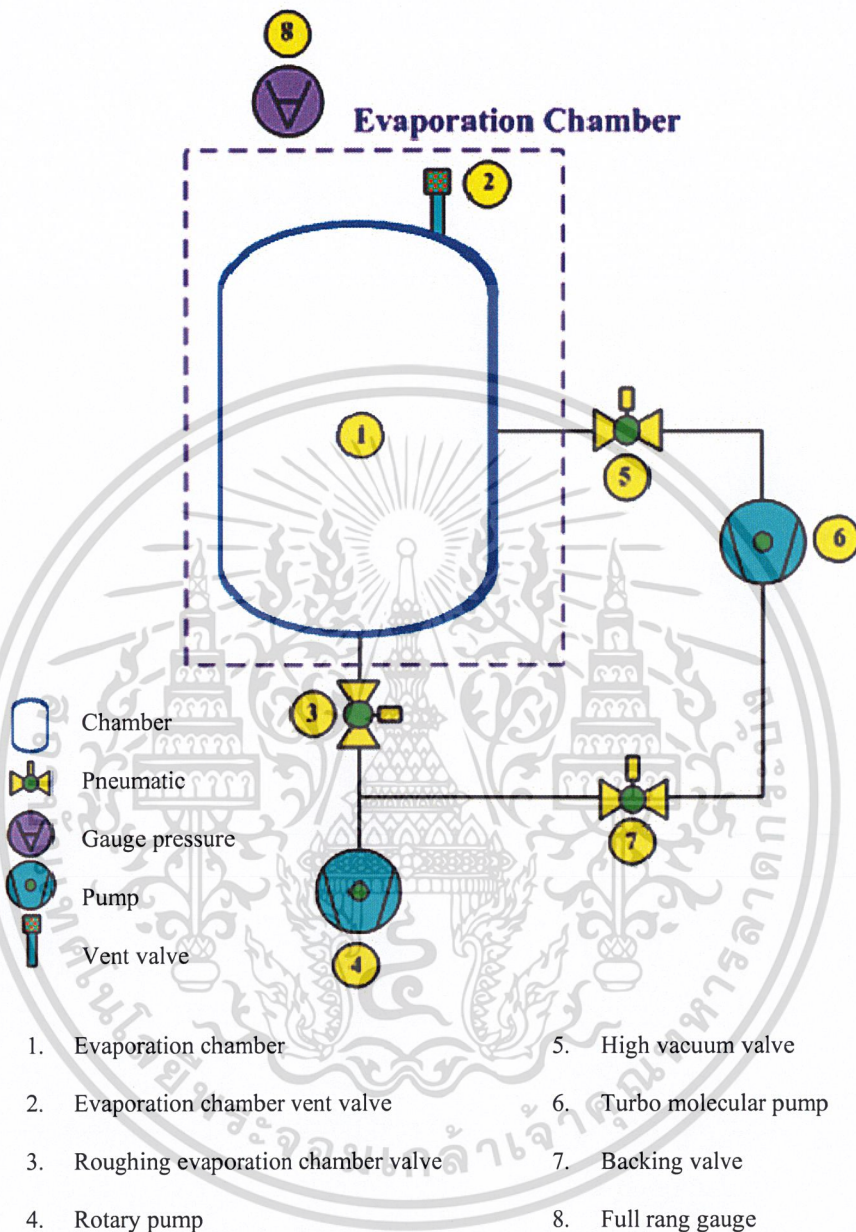
ระบบระเหยสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยระบบจะถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถระเหยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.2 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศส่วนประกอบที่สำคัญแสดงดังรูปที่ 3.3

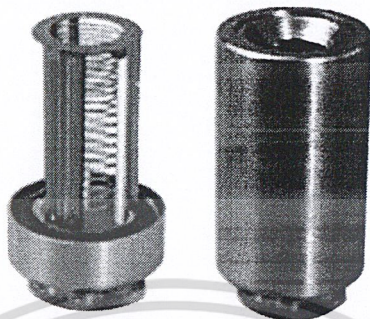


รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารด้วยความร้อน

3.1.1 ภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศเป็นระบบที่ใช้สำหรับระเหยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และโลหะ โดยระบบจะประกอบด้วย หัวระเหยสารอินทรีย์ งานระเหยสารอนินทรีย์ และชุดควบคุมการระเหยสารอินทรีย์ของบริษัท Kurt J. Lesker แสดงในรูปที่ 3.4 ถึง 3.6 ตามลำดับ ซึ่งชุดควบคุมการระเหยสารอินทรีย์สามารถให้ความร้อนแก่สารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ โดยมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่สารอินทรีย์ได้รับเพื่อนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารอินทรีย์ ซึ่งระบบที่ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ให้ได้อย่างแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์ [60]



รูปที่ 3.5 งานระเหยสารอินทรีย์และโลหะ [60]



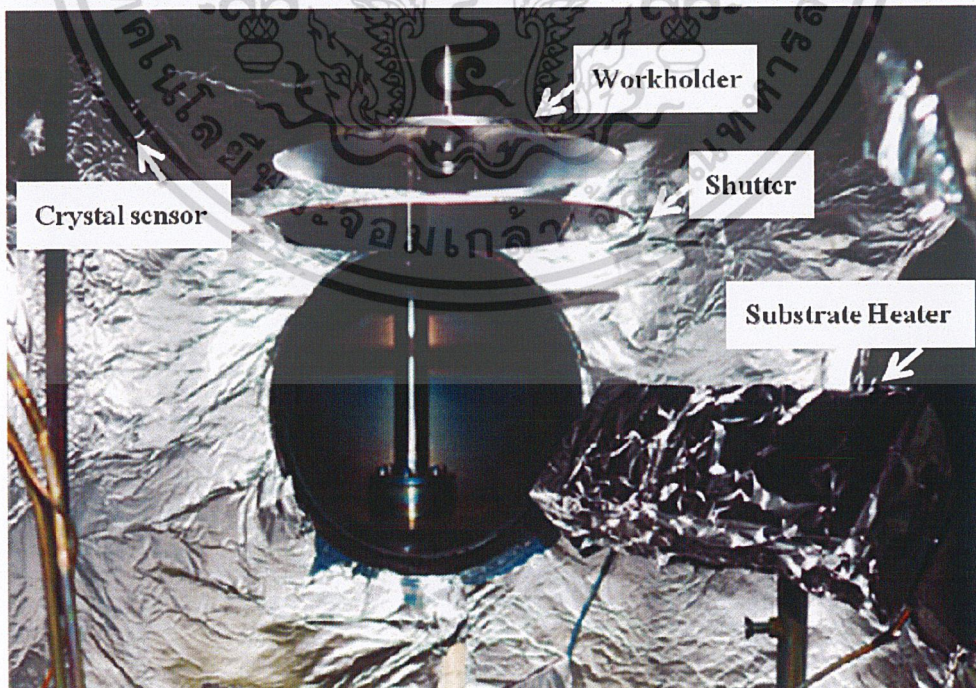
รูปที่ 3.6 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์ [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยภายในห้องสุญญากาศได้ทำการติดตั้งชุดระเหยสารอินทรีย์ทั้งหมด 3 ชุดและชุดระเหยสารอินทรีย์ 1 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ส่วนล่างภายในห้องสุญญากาศ



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ส่วนบนภายในห้องสุญญากาศ

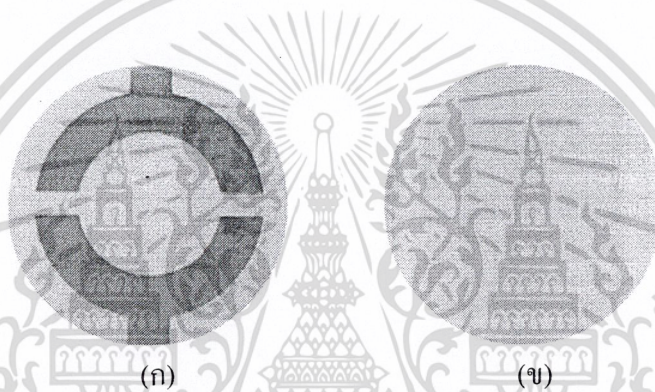
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชัตเตอร์ (shutter) มีหน้าที่ในการป้องกันไอระเหยของสารที่จะขึ้นไปเกาะฐานรองรับ ก่อนที่จะได้อัตราการระเหยที่ต้องการ แสดงในรูปที่ 3.8

ตัวยึดจับฐานรองรับ (workholder) มีหน้าที่ใช้ยึดจับฐานรองรับและสามารถทำการหมุนได้ ขณะที่ทำการระเหยเพื่อทำให้ฟิล์มบางเกิดความหนาที่สม่ำเสมอ แสดงในรูปที่ 3.8

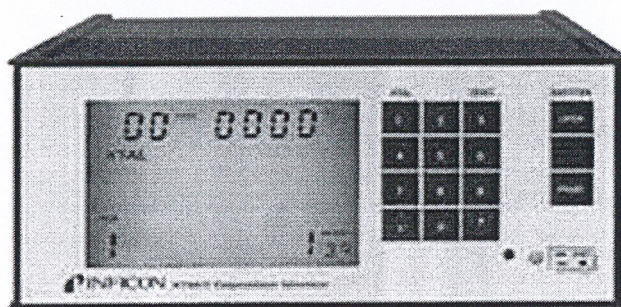
ชุดให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ (substrate heater) เป็นระบบที่ให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ โดยหลอดไฟควอทซ์ และมีเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดอุณหภูมิของฐานรองรับได้ แสดงในรูปที่ 3.8

ระบบตรวจวัดความหนาของฟิล์มบาง (crystal sensor) ความหนาของฟิล์มบางจะถูกตรวจสอบความหนาโดยใช้ผลึกควอทซ์ โดยวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของผลึกในขณะที่มีสารระเหยขึ้นมาเกาะ แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลึกควอทซ์สำหรับตรวจวัดความหนา (ก) ด้านหลัง และ (ข) ด้านหน้า [61]

- ความหนาของสารที่ระเหยขึ้นมาเกาะกับฐานรองรับและผลึกควอทซ์ จะคำนวณจากค่าความถี่การสั่นของตัวผลึกควอทซ์เองที่จะมีค่าลดลงเมื่อมีสารมาเคลือบเกาะที่ผิวมากขึ้น โดยความถี่ที่ได้ จะคำนวณออกมาเป็นอัตราการระเหยสารและความหนา โดยเครื่อง XTC/2 Thin Film Deposition Monitor ของ INFICON แสดงดังรูปที่ 3.10



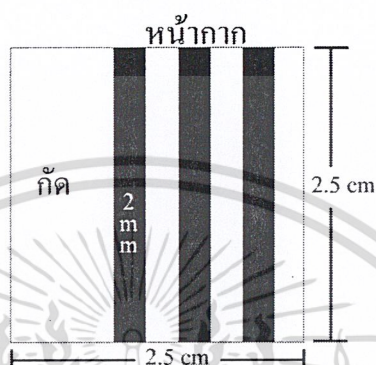
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์แสดงผลความหนาของฟิล์มบาง [61]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการกัดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ (ITO)

เป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อกัด (etching) ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บางส่วนที่ไม่ต้องการออกจากแผ่นฐานรองรับเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของขั้วไฟฟ้า โดยส่วนที่เหลือจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด โดยมีวิธีการดังนี้

- ปิดแผ่นหน้ากากลงบนแผ่นฐานรองรับในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดออก ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผ่นฐานรองรับ ITO ที่ถูกปิดด้วยหน้ากาก

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

3.3 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

ก่อนที่จะทำการระเหยสารลงบนฐานรองรับจะมีขั้นตอนการทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ผุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนบนพื้นผิว โดยขั้นตอนการทำความสะอาดแบ่งได้เป็น

3.3.1 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกเคลือบ ITO

1. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
2. ล้างด้วยอะซิโตน (acetone: CH₃COCH₃) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างด้วยเมทานอล (methanol: CH₃OH) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanol: (CH₃)₂CHOH) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที และเป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N₂)

3.3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์

1. ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างด้วยเมทานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
5. ล้างด้วยไอโซโพรพานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที และเป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน
6. ไล่ความชื้นออกจากฐานรองรับด้วยนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 15 นาที

3.3.3 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ polyethylene terephthalate (PET)

1. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
2. ล้างด้วยเมทานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างด้วยไอโซโพรพานอลในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที และเป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน

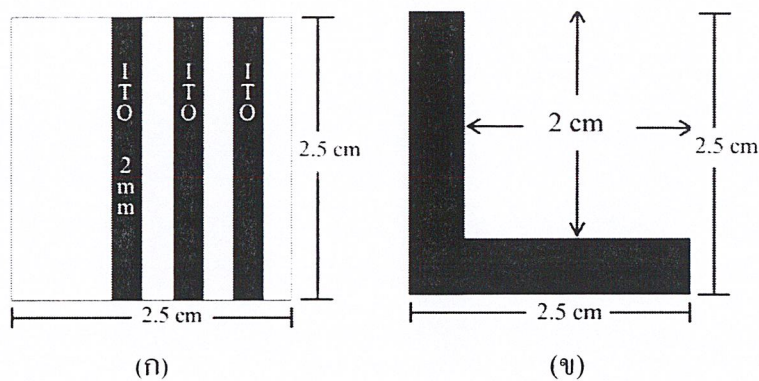
3.4 การสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวจะประกอบไปด้วยการระเหยสารในชั้นทำงานซึ่งก็คือ คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ ให้มีความหนา 100 นาโนเมตรที่อัตราการระเหยแตกต่างกันบนแผ่นฐานรองรับกระจกอินเดียมทินออกไซด์ โดยที่อัตราการระเหย 0.01 nm/s จะทำการระเหยโดยหัวระเหยสารอินทรีย์ ในขณะที่อัตราการระเหย 0.1, 0.5 และ 1.0 nm/s จะทำการระเหยจากจานระเหยสารอนินทรีย์โดยการอัดเม็ดสารคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ เนื่องจากข้อจำกัดของหัวระเหยสารอินทรีย์ต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (heating rate) ไม่สามารถเพิ่มอัตราการระเหยได้ หลังจากนั้นระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมให้มีความหนา 100 นาโนเมตร โดยมีโครงสร้างดังต่อไปนี้

- ITO /CuPc 100 nm (0.01 nm/s) /Al 100 nm
- ITO /CuPc 100 nm (0.1 nm/s) /Al 100 nm
- ITO /CuPc 100 nm (0.5 nm/s) /Al 100 nm
- ITO /CuPc 100 nm (1.0 nm/s) /Al 100 nm

3.4.1 การปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสูญญากาศ

นำแผ่นฐานรองรับ ITO ที่ผ่านการกัดและทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 3.12(ก) มาติดหน้ากาก (mask) สำหรับระเหยสารดังรูปที่ 3.12(ข)



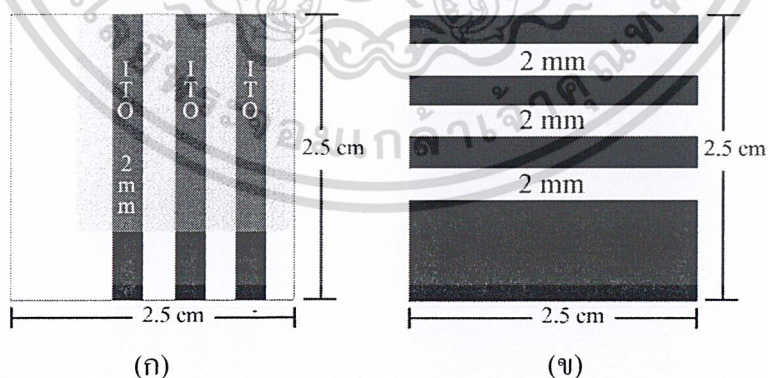
รูปที่ 3.12 (ก) ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยสาร CuPc

ทำการระเหยสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราในการระเหยของสาร โดยให้มีอัตราการระเหยเป็น 0.01, 0.1, 0.5 และ 1.0 nm/s โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ดังนี้

- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลูก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

3.4.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านบนด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

นำฐานรองรับที่ทำการระเหยชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์เสร็จแล้ว มาทำการระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยชั้นแรกออกจะได้ฟิล์มบางบนกระจก ITO ดังรูปที่ 3.13(ก) และนำหน้ากากสำหรับระเหยขั้วอลูมิเนียมมาติด แสดงดังรูปที่ 3.13(ข)



รูปที่ 3.13 (ก) ฟิล์มบาง CuPc บนกระจก ITO และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยขั้ว Al

ทำการระเหยขั้วไฟฟ้า Al ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

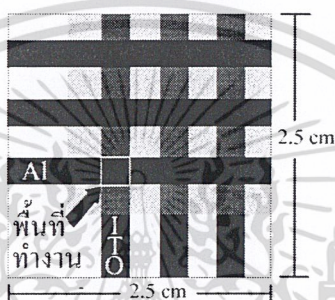
- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลูก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

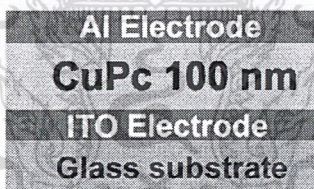
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการระเหยอยู่ในช่วง 1-2 nm/s
- ความหนา 100 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว จะมีพื้นที่ทำงาน 4 ตารางมิลลิเมตรซึ่งเกิดจากการตัดกันระหว่างขั้วไฟฟ้า ITO ด้านล่างกับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านบน มีเซลล์ที่สามารถทำการทดสอบได้ 9 เซลล์ ดังรูปที่ 3.14 โดยโครงสร้างแบบชั้นเดียวในลักษณะภาพตัดขวางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15 จากนั้นนำอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่มีพื้นที่ทำงาน 4 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบชั้นเดียว

3.5 การสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น

โครงสร้างแบบสามชั้น จะประกอบไปด้วยการระเหยขั้วโลหะอลูมิเนียมบนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์เป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่างความหนา 50 นาโนเมตร หลังจากนั้นระเหยสารในชั้นแรกที่เป็นสารอินทรีย์ Alq_3 ชั้นที่สองจะเป็นชั้นของ โลหะอลูมิเนียมบาง ๆ ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกักอิเล็กตรอน ส่วนชั้นที่สามจะเป็นชั้นของ สารอินทรีย์ Alq_3 หรือ สารอินทรีย์ซิงค์ซิติไลน์และสุดท้ายคือ อลูมิเนียมที่นำมาเป็นขั้วไฟฟ้าด้านบนมีความหนา 50 นาโนเมตร ตามลำดับ

โดยเงื่อนไขที่สำคัญคือ หากความหนาที่เหมาะสมของชั้น Alq_3 ในโครงสร้าง $Alq_3/Al/Alq_3$ ที่มีความหนาของชั้นอลูมิเนียมคงที่ โดยมีโครงสร้างที่ศึกษาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Al 50 nm /Alq₃ 50 nm /Al 5 nm /Alq₃ 50 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 80 nm /Al 5 nm /Alq₃ 80 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 5 nm /Alq₃ 100 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 150 nm /Al 5 nm /Alq₃ 150 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 200 nm /Al 5 nm /Alq₃ 200 nm /Al 50 nm

โดยความหนาที่เหมาะสมของชั้น Alq₃ คือ 100 นาโนเมตร หลังจากนั้นทำการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นอลูมิเนียมในโครงสร้าง Alq₃/Al/Alq₃ ที่มีความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ โดยมีโครงสร้างที่ศึกษาดังต่อไปนี้

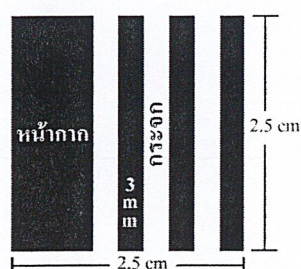
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 5 nm /Alq₃ 100 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 10 nm /Alq₃ 100 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 15 nm /Alq₃ 100 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 20 nm /Alq₃ 100 nm /Al 50 nm

และความหนาที่เหมาะสมของชั้นอลูมิเนียมคือ 5 นาโนเมตร หลังจากนั้นจะทำการศึกษาในโครงสร้างของ สารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ โดยหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ในโครงสร้าง Alq₃/Al/ZnSe ที่มีความหนาของชั้น Alq₃ และ อลูมิเนียมคงที่ที่ 100 นาโนเมตร และ 5 นาโนเมตรตามลำดับ โดยมีโครงสร้างที่ศึกษาดังต่อไปนี้

- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 5 nm /ZnSe 50 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 5 nm /ZnSe 100 nm /Al 50 nm
- Al 50 nm /Alq₃ 100 nm /Al 5 nm /ZnSe 150 nm /Al 50 nm

3.5.1 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านล่างด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

นำฐานรองรับกระจกสไลด์หรือพลาสติก PET ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว มาติดหน้ากากสำหรับระเหยขั้วอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ถูกปิดด้วยหน้ากาก

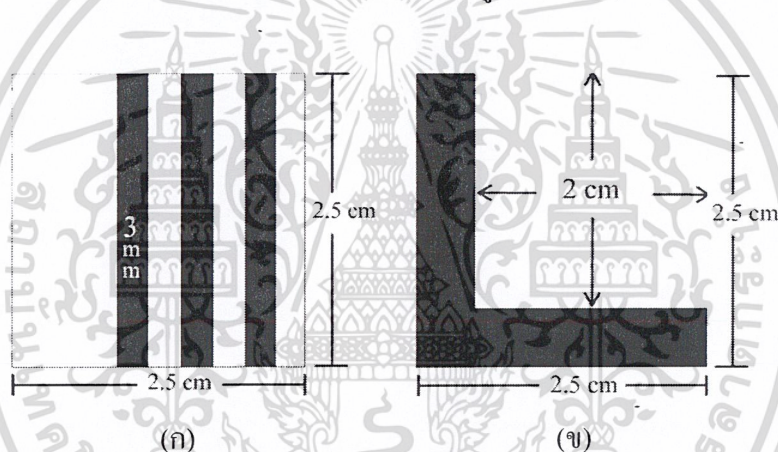
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลูก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยอยู่ในช่วง 1-2 nm/s
- ความหนา 50 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

3.5.2 การปลูกฟิล์มบาง Alq_3 ชั้นที่หนึ่งและอลูมิเนียมชั้นกลางด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

นำฐานรองรับที่ทำการระเหยขั้วไฟฟ้าด้านล่างเสร็จแล้วมาทำการระเหยชั้น Alq_3 และอลูมิเนียมชั้นกลาง โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยขั้วออกจะได้ขั้วไฟฟ้าบนกระจก ดังรูปที่ 3.17(ก) และนำหน้ากากสำหรับระเหยชั้นที่หนึ่งและสองมาติด ดังรูปที่ 3.17(ข)



รูปที่ 3.17 (ก) ขั้วไฟฟ้าด้านล่างบนกระจก และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยชั้น Alq_3/Al

ทำการระเหยสารอินทรีย์ Alq_3 ที่ความหนาต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ จากนั้นทำการระเหยชั้นกลางด้วยอลูมิเนียมที่ความหนาต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่ระบุไว้เช่นเดียวกัน โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสารทั้งสองดังนี้

- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลูก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยของชั้น Alq_3 ประมาณ 0.1-0.2 nm/s
- อัตราการระเหยของอลูมิเนียมชั้นกลาง 0.01 nm/s
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

3.5.3 การปลูกฟิล์มบาง Alq₃ เป็นชั้นที่สามด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนใน

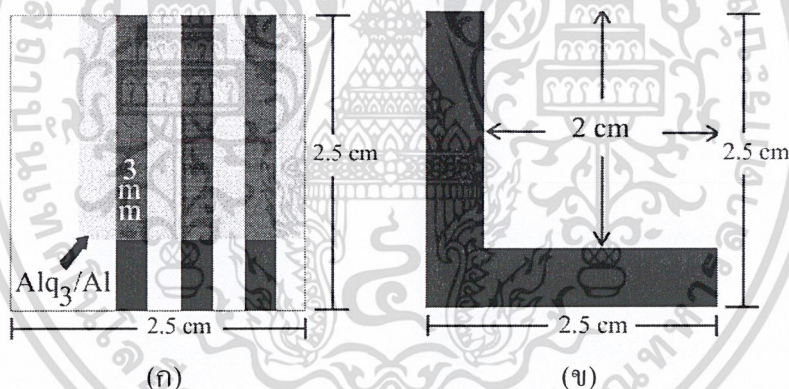
สุญญากาศ

ในกรณีที่เป็นโครงสร้าง Alq₃/Al/Alq₃ จะไม่มีการเปลี่ยนหน้ากากระเหยสารในชั้นตอนนี้ จะทำการปลูกชั้น Alq₃ ชั้นที่สามต่อจากการระเหยอลูมิเนียมชั้นกลางทันที โดยตลอดกระบวนการจะอยู่ในระบบสุญญากาศ และมีเงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสาร Alq₃ เช่นเดียวกับการระเหยสารในชั้นที่หนึ่ง

3.5.4 การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซีสไนด์เป็นชั้นที่สามด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนใน

สุญญากาศ

ในกรณีที่เป็นโครงสร้าง Alq₃/Al/ZnSe จำเป็นที่จะต้องมีการเปลี่ยนหน้ากากระเหยสาร เนื่องจากข้อจำกัดของหัวระเหยสาร โดยการนำฐานรองรับที่ทำการระเหยชั้น Alq₃ และอลูมิเนียมเสร็จแล้วมาทำการระเหยชั้นซิงค์ซีสไนด์เป็นชั้นที่สาม โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยชั้นที่หนึ่งและสองออก จะได้ชั้นของ Alq₃/Al บนขั้วไฟฟ้าด้านล่างดังรูปที่ 3.18(ก) และนำหน้ากากสำหรับระเหยชั้นซิงค์ซีสไนด์มาติด ดังรูปที่ 3.18(ข)



รูปที่ 3.18 (ก) ฟิล์มบาง Alq₃/Al บนขั้วไฟฟ้า และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยชั้น ZnSe

สำหรับการระเหยสารอินทรีย์ Alq₃ หรือ สารอนินทรีย์ซิงค์ซีสไนด์ ที่ความหนาต่าง ๆ ตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ จะมีเงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสารทั้งสองดังนี้

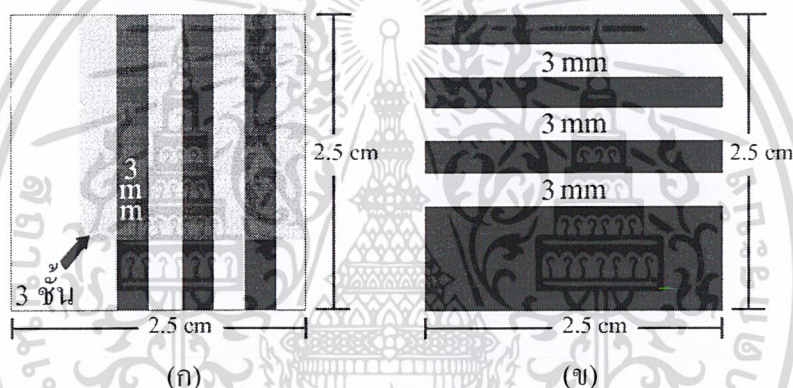
- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลูก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยของสารทั้งสอง ประมาณ 0.1-0.2 nm/s
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

3.5.5 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้านบนด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

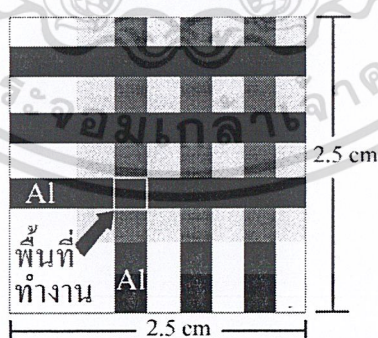
นำฐานรองรับที่ทำการระเหยชั้นที่สามเสร็จแล้ว มาทำการระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านบน โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยสารออกจะได้ฟิล์มบาง ดังรูปที่ 3.19(ก) และนำหน้ากากสำหรับระเหยขั้วอลูมิเนียมมาติด ดังรูปที่ 3.19(ข)

ทำการระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

- ความดันบรรยากาศภายในระบบปลูก ประมาณ 2.5×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยอยู่ในช่วง 1-2 nm/s
- ความหนา 50 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ

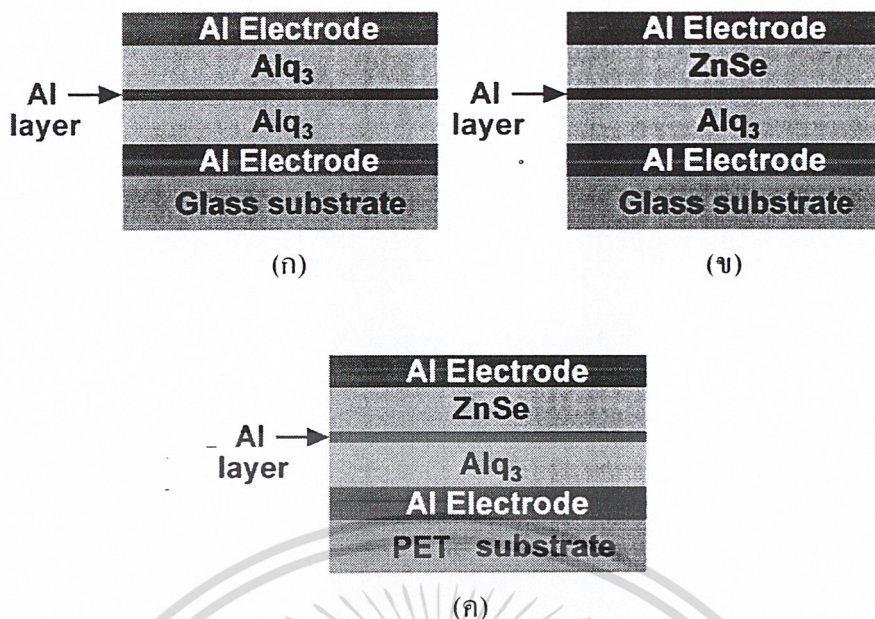


รูปที่ 3.19 (ก) ฟิล์มบาง 3 ชั้น บนขั้วไฟฟ้า และ (ข) หน้ากากสำหรับระเหยขั้ว Al



รูปที่ 3.20 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีพื้นที่ทำงาน 9 ตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 โครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะแบบสามชั้น (ก) $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ (ข) $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ และ (ค) $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ บนฐานรองรับพลาสติก PET

อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น จะมีพื้นที่ทำงาน 9 ตารางมิลลิเมตรซึ่งเกิดจากการตัดกันระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านล่างกับด้านบน มีเซลล์ที่สามารถทำการทดสอบได้ 9 เซลล์ ดังรูปที่ 3.20 โดยโครงสร้างแบบสามชั้นในลักษณะภาพตัดขวางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.21 จากนั้นนำอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้า

3.6 การศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านต่างๆ

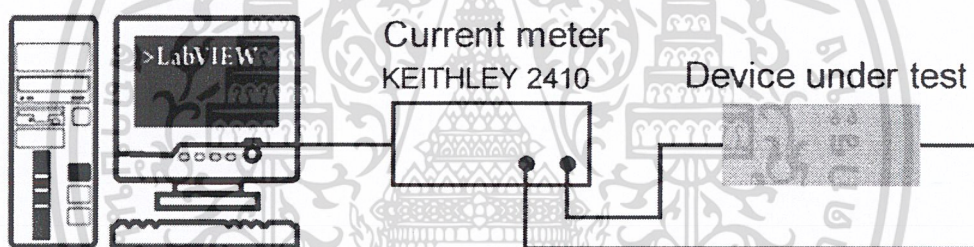
3.6.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ ด้วยระบบวัดทางไฟฟ้าในที่มืด ซึ่งจัดเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่อง Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter ดังรูปที่ 3.22 สำหรับการตรวจวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ และชุดทดสอบความสามารถในการ อ่าน-เขียน ของอุปกรณ์โดย Keithley 2410 ดังรูปที่ 3.23 เพื่อทำการตรวจวัด

- กระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ
- เสถียรภาพของตัวอุปกรณ์



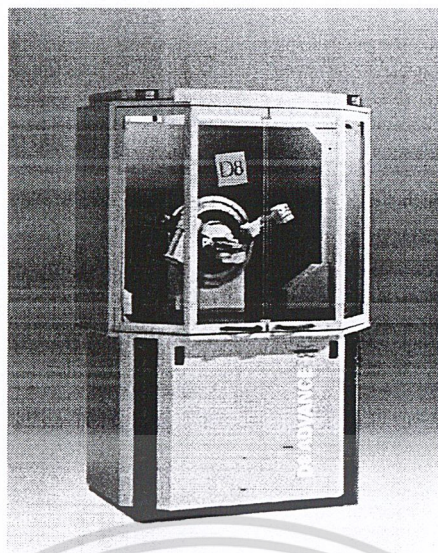
รูปที่ 3.22 เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้า Agilent E4980A 20Hz-2MHz Precision LCR Meter [62]



รูปที่ 3.23 ชุดทดสอบความสามารถในการ อ่าน-เขียน และเสถียรภาพของอุปกรณ์

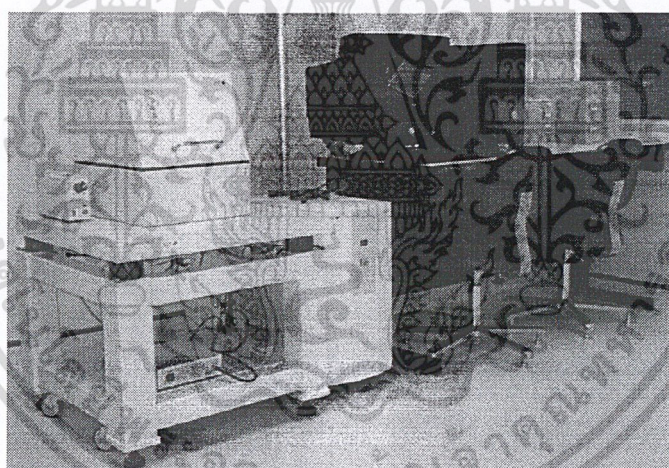
3.6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้เครื่อง XRD รุ่น D8 Discover with GADDS ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เครื่อง XRD ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Discover with GADDS [63]

3.6.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



รูปที่ 3.25 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของบริษัท Seiko รุ่น SPA-400

เป็นระบบที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่จัดขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยจะอาศัยหลักการของแรงที่กระทำระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับปลายทูปดิ่งที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น โดยเครื่องที่ใช้เป็นของบริษัท Seiko รุ่น SPA400 แสดงดังรูปที่ 3.25

3.6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคออเจอร์อิเล็กตรอน

ออเจอร์อิเล็กตรอนเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาชนิดของธาตุต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในผิวของวัสดุ โดยใช้หลักการระดมยิงอิเล็กตรอนไปบนฟิล์มบางจนกระทั่งอะตอมเกิดการแตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

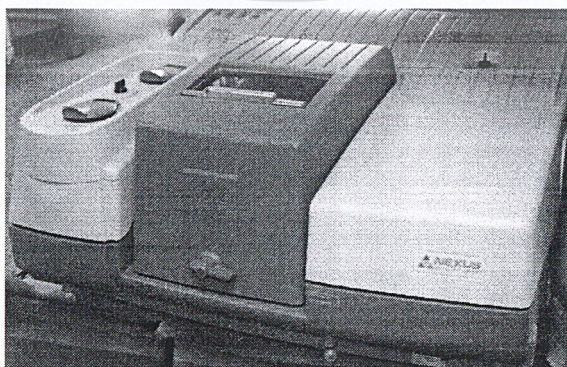
ตัวเป็นไอออน โดยสามารถตรวจสอบองค์ประกอบของชั้นฟิล์มได้จนถึงชั้นในสุดของฟิล์มบาง แต่มีข้อเสียคือชิ้นงานที่ถูกนำมาตรวจสอบจะสูญเสียชั้นของฟิล์มบางไปและไม่สามารถนำมาตรวจสอบใหม่ได้ โดยในที่นี้จะใช้เครื่องออเจอร์อิเล็กตรอนจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) รุ่น PHI 700 แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 เครื่อง Auger Electron Spectroscopy (AES) รุ่น PHI 700

3.6.5 การวิเคราะห์พันธะของสารประกอบด้วยเทคนิค FT-IR

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุโดยใช้วิธีการทางสเปกโตรสโกปีชนิดหนึ่งที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสงอินฟราเรดซึ่งโดยการวิเคราะห์โครงสร้าง จะอาศัยการดูดกลืนที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล โดยโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่แตกต่างกัน โดยในที่นี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์ FT-IR ของสำนักนิติวิทยาศาสตร์บริการสถาบันนิติวิทยาศาสตร์ รุ่น Nicolet NEXUS 670FT-IR ของบริษัท Thermo แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เครื่อง FT-IR รุ่น Nicolet NEXUS 670FT-IR [64]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่สร้างขึ้นในโครงสร้างแบบชั้นเดียวและแบบสามชั้นดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 โดยแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วน คือ

- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวจากสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/Alq_3$
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับพลาสติก PET ที่สามารถโค้งงอได้
- ผลการทดสอบอายุการใช้งานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะระหว่างโครงสร้าง $Alq_3/Al/Alq_3$ กับโครงสร้าง $Alq_3/Al/ZnSe$

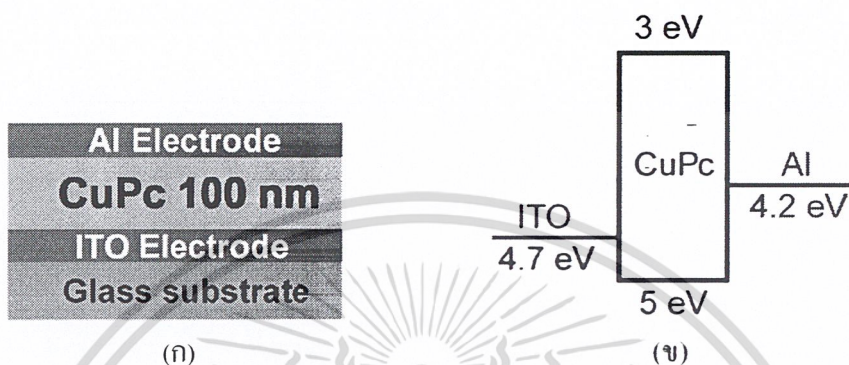
โดยในส่วนของ การวิเคราะห์ผลการทดลองได้ทำการศึกษาสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อที่จะสามารถอธิบายถึงกลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะและกลไกการนำกระแสของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำ โดยจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

4.1 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว โดยเริ่มจากการระเหยสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยทำหน้าที่เป็นชั้นทำงาน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตรากระเหยของสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ คือ 0.01, 0.1, 0.5 และ 1.0 nm/s และมีขั้วแคโทดที่เป็นโลหะอลูมิเนียมที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวแสดงดังรูปที่ 4.1(ก) และแผนภาพระดับพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.1(ข) [65] โดยมีโครงสร้างที่ทำการศึกษาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ITO /CuPc 100 nm (**0.01 nm/s**) /Al 100 nm
- ITO /CuPc 100 nm (**0.1 nm/s**) /Al 100 nm
- ITO /CuPc 100 nm (**0.5 nm/s**) /Al 100 nm
- ITO /CuPc 100 nm (**1.0 nm/s**) /Al 100 nm



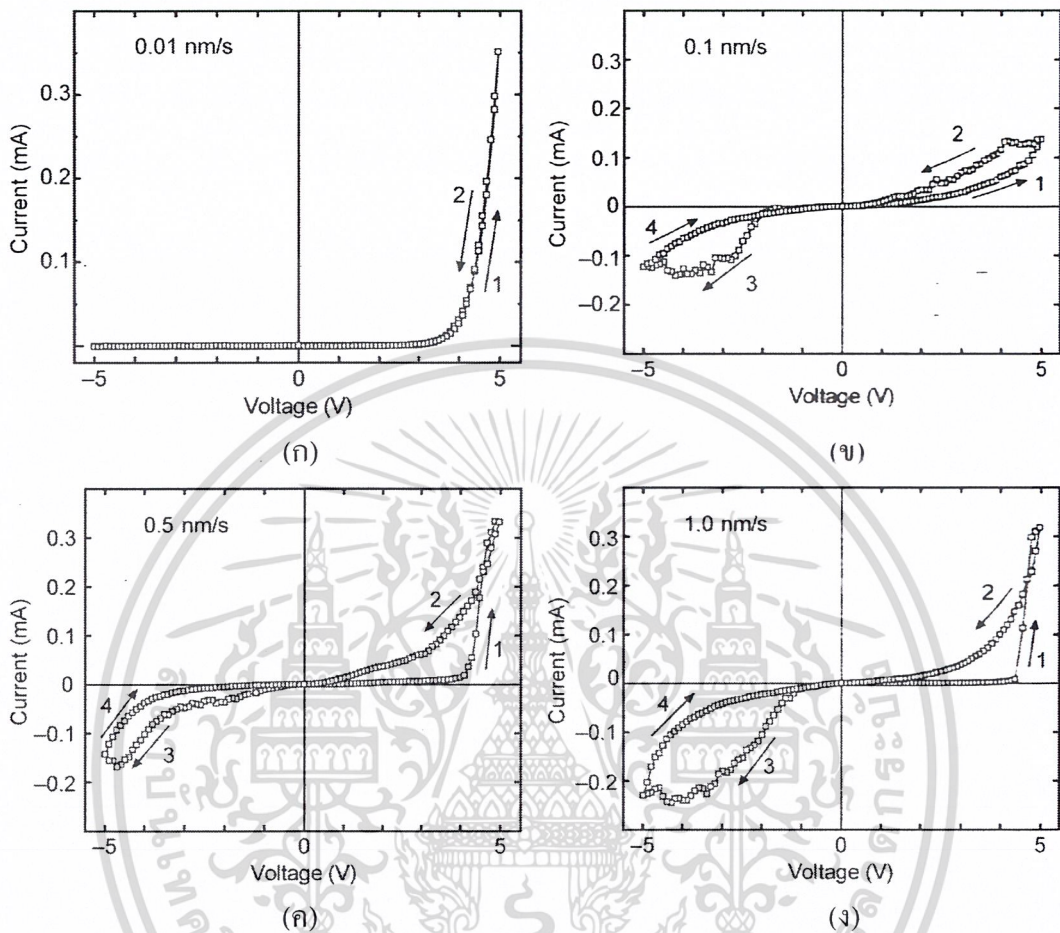
รูปที่ 4.1 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ และ (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้างแบบชั้นเดียว

4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่อัตราการระเหยของชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยในการวัดค่ากระแสกับความต่างศักย์จะทำการป้อนค่าความต่างศักย์จาก 0 ถึง +5 โวลต์, +5 ถึง -5 โวลต์ และ -5 ถึง 0 โวลต์ โดยในส่วนของอัตราการระเหยชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ 0.01 nm/s ไม่พบสมบัติแบบสองสถานะแสดงดังรูปที่ 4.2(ก) แต่เป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งเมื่ออัตราในการระเหยของชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์เพิ่มขึ้นเป็น 0.1, 0.5 และ 1.0 nm/s อุปกรณ์สามารถแสดงสมบัติแบบสองสถานะออกมาให้เห็น แสดงดังรูปที่ 4.2(ข)-(ง) ตามลำดับ โดยที่สถานะเริ่มต้นของอุปกรณ์นั้น ตัวอุปกรณ์จะมีสถานะความนำทางไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งก็คือสถานะปิดของอุปกรณ์ แต่เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้อุปกรณ์เพิ่มขึ้นถึงค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มหรือแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage, V_{th}) ที่ประมาณ +4.5 โวลต์ การฉีดกระแสในตัวอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.2(ค) และ 4.2(ง) และเมื่อมีการป้อนค่าความต่างศักย์ย้อนกลับจาก +5 ถึง 0 โวลต์ ตัวอุปกรณ์ยังคงมีสถานะความนำทางไฟฟ้าที่สูงซึ่งก็คือสถานะเปิดของอุปกรณ์ โดยสถานะเปิดจะคงอยู่จนกระทั่งป้อนความต่างศักย์จนถึง -5 โวลต์ หลังจากนั้นตัวอุปกรณ์จะเปลี่ยนสถานะจากสถานะเปิดไปสู่สถานะปิด สำหรับตัวอุปกรณ์ที่มีอัตราการระเหยของชั้นคอปเปอร์-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พทาโลไซยาไนน์สูงจะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะออกมาได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ



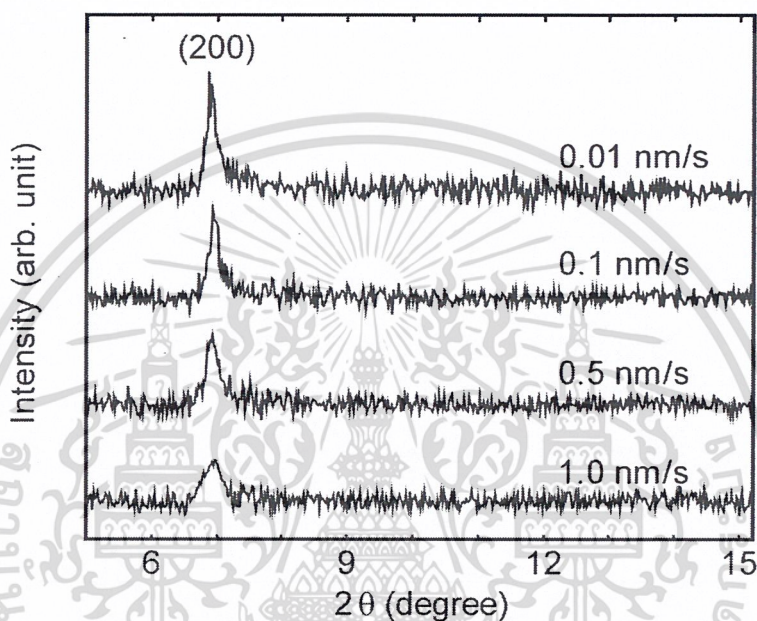
รูปที่ 4.2 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว ที่อัตราการระเหย (ก) 0.01 nm/s, (ข) 0.1 nm/s, (ค) 0.5 nm/s และ (ง) 1.0 nm/s

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2(ก)-(ง) พบว่าอัตราการระเหยสารมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราการระเหยสารมีผลต่อการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของฟิล์มบาง ดังนั้นจึงได้ตั้งสมมติฐานว่าสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกและความไม่สมบูรณ์เหล่านี้เองที่ทำหน้าที่เป็นสถานะในการดักจับและปลดปล่อยพาหะ ซึ่งเป็นผลให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะ ดังนั้นการวิเคราะห์ในส่วนถัดไปจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อสนับสนุนสมมติฐานเหล่านี้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่ปลูกด้วยเงื่อนไขอัตราการระเหยสารที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับผลึกแบบโมโนคลินิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

α -เฟส มีระนาบความเป็นผลึกเด่นชัดที่ระนาบ (200) ที่มีมุม $2\theta=6.95^\circ$ [66] และเมื่ออัตราการระเหยสารเพิ่มขึ้นตำแหน่งของพิกไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ได้ยังคงมีความเป็นผลึกเช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามความเข้มของพิกจะลดลงเมื่ออัตราการทับถมของสารเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความกว้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางพิก (FWHM) จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความกว้างที่เพิ่มขึ้นของ FWHM สามารถอธิบายได้ว่ามีความบกพร่องของแลตติซเพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของขนาดเม็ดผลึก



- รูปที่ 4.3 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบาง CuPc ที่อัตราการระเหยสารแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรทางโครงสร้าง (ขนาดเม็ดผลึก, ความหนาแน่นของอะตอมที่ขาดหายไปและความเครียดแลตติซ) ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ในอัตราการระเหยแตกต่างกัน

อัตราการระเหยสาร (nm/s)	D (nm)	δ (10^{14} lin m^{-2})	ϵ (10^{-3} lin $^{-2}$ m^{-2})
0.01	67.70	2.18	2.28
0.1	59.22	2.85	2.61
0.5	39.22	6.50	3.94
1.0	26.41	14.34	5.86

ตารางที่ 4.1 แสดงถึง ขนาดของเม็ดผลึก (D) ที่คำนวณได้จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, ความหนาแน่นของอะตอมที่ขาดหายไป (δ) และความเครียด (ϵ) ที่อัตราการระเหยของชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์แตกต่างกัน จากทฤษฎีที่ว่าด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวในบทที่ 2 ขนาดของเม็ดผลึกที่คำนวณจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ Scherrer [54]

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

- โดยที่ β คือ FWHM
 k คือ ค่าคงที่ (0.94)
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 θ คือ มุมของเบรกก์

ในขณะที่ความหนาแน่นของอะตอมที่ขาดหายไป จะนิยามถึงปริมาณที่มีอยู่ของเส้นความคลาดเคลื่อนต่อหนึ่งหน่วยของผลึก สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการของ Williamson และ Smallman [54, 67]

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4.2)$$

โดยความเครียดแลตติซในชั้นฟิล์มสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ [54]

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{D \cos \theta} - \beta \right) \left(\frac{1}{\tan \theta} \right) \quad (4.3)$$

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราในการระเหยของชั้นคอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนต์เพิ่มขึ้นขนาดของเม็ดผลึกที่คำนวณได้จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีขนาดลดลง ในขณะที่ความหนาแน่นของอะตอมที่ขาดหายไปและความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วความเครียดที่เกิดขึ้นในฟิล์มเกิดขึ้นเนื่องมาจากการผิดรูปของแลตติซ ซึ่งจะมีสาเหตุหลักมาจาก 2 ปัจจัย คือ

- ความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างฟิล์มและฐานรองรับ
- ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื่องจากผลกระทบจากข้อบกพร่องของผลึกในระหว่างการทับถม

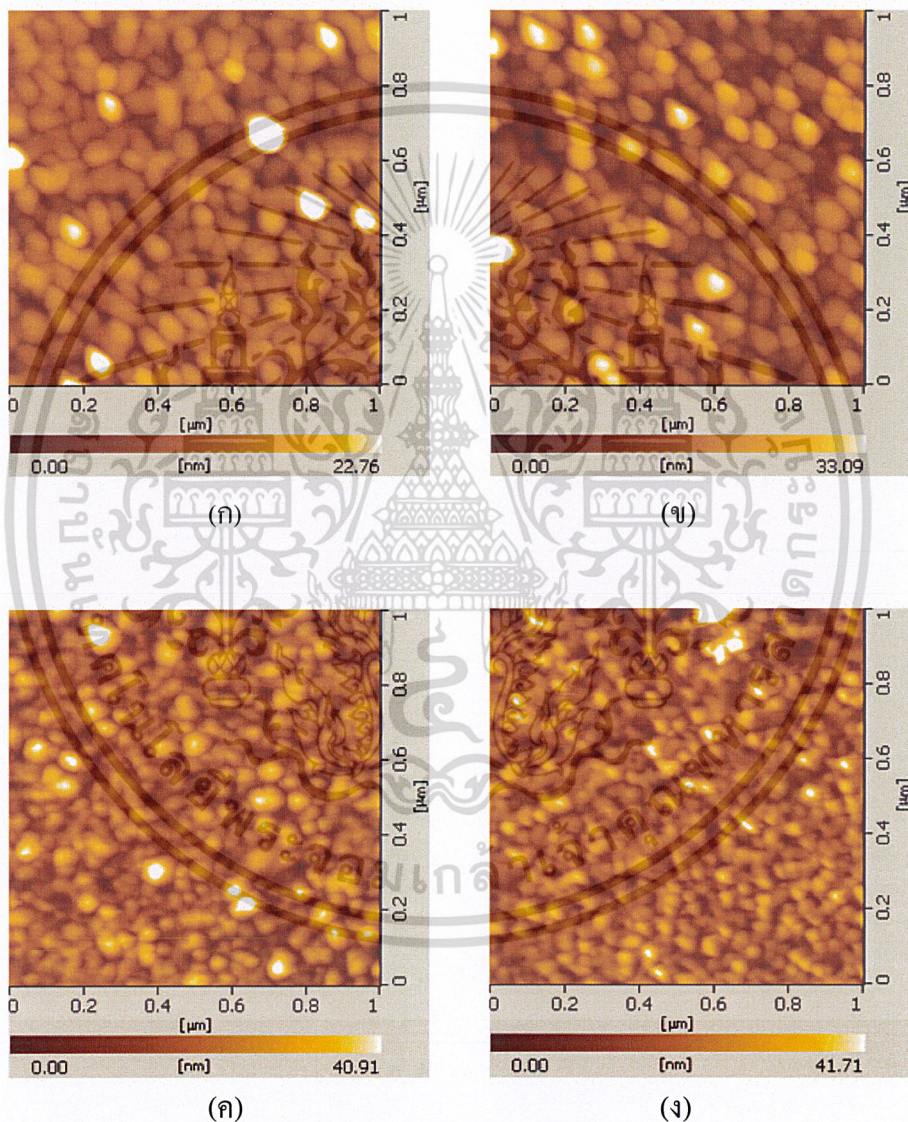
ซึ่งโดยปกติแล้วความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในการเกิดฟิล์มบาง และผลที่เกิดจากความเครียดนั้นก็คือ จะส่งผลกระทบต่อบริเวณขอบของผลึก โดยจะส่งผลอย่างมากกับความเป็นผลึกในชั้นฟิล์ม [68] จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า อัตราในการระเหยสารเป็นตัวแปรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญสำหรับ โครงสร้างของผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง ดังนั้นอัตราการทับถมของสารที่แตกต่างกันก็ควรส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางแตกต่างกันด้วย ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมต่อไป

4.1.3 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนน์ที่อัตราการระเหยแตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



รูปที่ 4.4 ภาพจาก AFM ของฟิล์มบาง CuPc ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ในอัตราการระเหยสาร (ก) 0.01 nm/s, (ข) 0.1 nm/s, (ค) 0.5 nm/s และ (ง) 1.0 nm/s

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนน์ที่อัตราการระเหยสารแตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AFM คือหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความละเอียดสูงและมีระบบซอฟต์แวร์ประมวลผลที่ดี โดยในรูปที่ 4.4 จะเป็นการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางบนฐานรองรับกระจกสไลด์ และเป็นที่น่าทึ่งกันว่าเมื่ออัตราการระเหยสารมีค่าต่ำ จะเป็นผลทำให้เม็ดผลึกมีขนาดใหญ่ [69] ในทำนองเดียวกันฟิล์มของบางคอปเปอร์ทาโลไซไฮไดรด์ที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 0.01 nm/s พบว่าจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกที่มีขนาดใหญ่ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4(ก) และเมื่ออัตราการระเหยสารเพิ่มสูงขึ้นจากการคำนวณจากพีคของ XRD ขนาดของเม็ดผลึกจะลดลงจึงทำให้สภาพพื้นผิวของฟิล์มค่อย ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างของผลึกที่มีขนาดใหญ่ไปสู่โครงสร้างของผลึกที่มีขนาดเล็ก โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4.4(ข)-(ง) และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบในเชิงปริมาณของขนาดเม็ดผลึกที่ได้จากการคำนวณจากพีคของ XRD และจากภาพ AFM โดยขนาดของเม็ดผลึกจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจะเป็นการประมาณค่าโดยตรงจากภาพโดยซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ (image processing) ซึ่งจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 โดยเมื่อเปรียบเทียบขนาดของเม็ดผลึกระหว่างค่าที่ได้จากพีคของ XRD และภาพจาก AFM พบว่ามีขนาดของเม็ดผลึกที่สอดคล้องกัน ทั้งนี้อัตราการระเหยที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดการนิเวศเลี่ยนหรือการเกิดนิเวศเลี่ยนที่สูงขึ้น ซึ่งนิเวศเลี่ยนเหล่านี้จะเจริญเติบโตเป็นผลึกต่อไป ดังนั้นเมื่อเกิดนิเวศเลี่ยนเริ่มต้นมากความหนาแน่นของผลึกจึงมีมากส่งผลให้ผลึกมีขนาดเล็กนั่นเอง

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบขนาดเม็ดผลึกที่ได้จาก XRD และ AFM

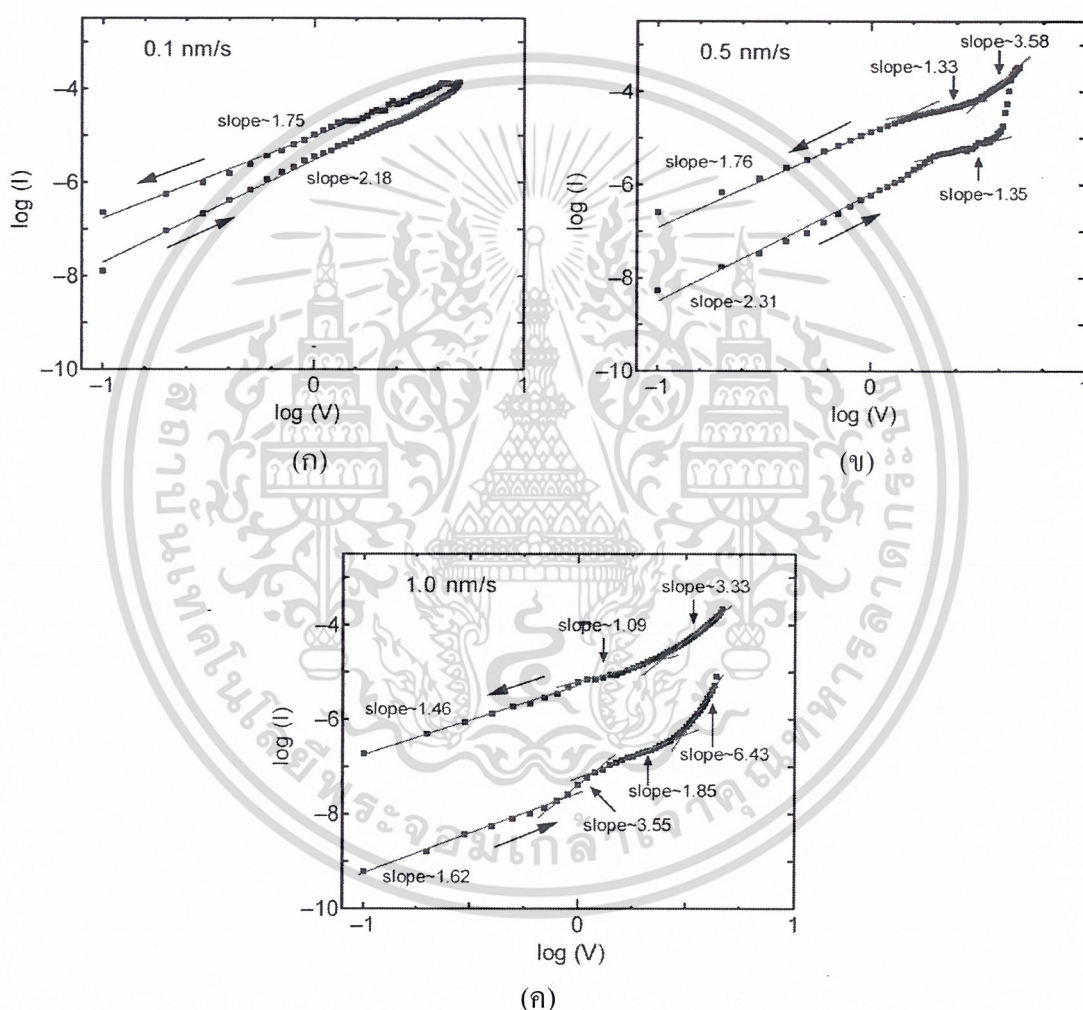
อัตราการระเหยสาร (nm/s)	ขนาดเม็ดผลึกจาก XRD (nm)	ขนาดเม็ดผลึกจาก AFM (nm)
0.01	67.70	66.89 ± 9.76
0.1	59.22	58.51 ± 10.49
0.5	39.22	40.68 ± 10.59
1.0	26.41	28.27 ± 8.86

แต่อย่างไรก็ตาม จากหลาย ๆ งานวิจัยได้เป็นที่ยอมรับว่าอะตอมของโลหะสามารถแพร่เข้าไปยังชั้นของฟิล์มบางสารอินทรีย์เมื่อมีการระเหยด้วยไฟฟ้า และจะเกิดการแพร่ได้มากขึ้นเมื่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีขนาดผลึกที่ใหญ่ [70] ซึ่งในปกติแล้วการแพร่ของโลหะที่บริเวณรอยต่อคือหนึ่งในกลไกที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ แต่อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้กลับแสดงให้เห็นว่า พฤติกรรมของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับขนาดผลึกที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นกลไกที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวในงานวิจัยนี้ น่าจะมีเหตุผลหลักมาจากกลไกอื่นนอกเหนือจากกลไกที่บริเวณรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว

เพื่ออธิบายถึงลักษณะเฉพาะในการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ จึงได้ทำการตรวจสอบกลไกในการนำกระแสของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียว โดยในรูปที่ 4.5(ก)-(ค) ได้แสดงลักษณะของกระแสและความต่างศักย์ซึ่งเปลี่ยนสถานะจากสถานะปิดไปสู่สถานะเปิดสำหรับด้านแรงดันบวกในรูปลอการิทึมของอุปกรณ์ที่มีอัตราการระเหยของชั้นคอปเปอร์ทาทาลอไซยาไนด์ 0.1, 0.5 และ 1.0 nm/s ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะของ โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่อัตราการระเหยของชั้น CuPc (ก) 0.1 nm/s, (ข) 0.5 nm/s และ (ค) 1.0 nm/s ในรูปลอการิทึมสองแกน

โดยอุปกรณ์ทุกตัวมีความสัมพันธ์ของความชันเส้นกราฟค่อนข้างคล้ายกัน จากรูปที่ 4.5 พบว่าค่ากระแสจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ V^{slope} และจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะได้ว่า

$\log(I) = (slope)\log(V)$ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของชิลด์ (child law) โดยสามารถแสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \frac{9}{8} \frac{\epsilon_i \mu V^2}{d^3} \quad (4.4)$$

เมื่อ ϵ_i คือ insulator dynamic permittivity

μ คือ charge carrier mobility

d คือ ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ

V คือ ความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์เข้าใกล้ค่าแรงดันขีดเริ่ม ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงได้ชัดเจนในรูปที่ 4.5(ข) และ (ค) ดังนั้นพฤติกรรมกรรมการนำในระบบนี้จึงสอดคล้องกับการนำกระแสแบบสเปซชาร์จ (space charge limited current, SCLC) [71, 72] โดยช่วงที่มีค่าความชันสูงในสถานะปิดแสดงถึงการจับพาหะ (trap) มีค่าเพิ่มขึ้นจนใกล้เต็ม ซึ่งพฤติกรรมกรรมการนำที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะโดยกลไก SCLC สำหรับโครงสร้างแบบชั้นเดียวในงานวิจัยนี้ได้มีการรายงานมาก่อนหน้านี้แล้วในสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์อื่น ๆ [72] ดังนั้นการเคลื่อนที่ของพาหะจึงสามารถให้เหตุผลได้ว่าน่าจะเป็นผลมาจากสถานะดักจับพาหะที่เกิดจากข้อบกพร่องของผลึก [73, 74] โดยข้อบกพร่องของผลึกที่เกิดขึ้นได้แก่ การแทนที่ของออกซิเจน (oxygen vacancies), การขาดหายไปของอะตอม (dislocations) และบริเวณขอบของผลึก ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในฟิล์มบางสารอินทรีย์ทั่วไป และจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการดักจับพาหะและส่งผลให้เกิดพฤติกรรมกรรมการนำกระแสแบบ SCLC โดยบริเวณขอบของผลึกและการขาดหายไปของอะตอม เป็นข้อบกพร่องที่ง่ายต่อการทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่องแบบจุด (point defects) ซึ่งนำไปสู่การแพร่ของพาหะและสนามไฟฟ้า โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำทำให้มีค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง จากผลการทดลองจะพบว่าค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีข้อบกพร่องของผลึกเพิ่มขึ้นจากอัตราการทับถมของสารที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณาแผนภาพระดับพลังงานในรูปที่ 4.1(ข) จะพบว่ากำแพงศักย์ (barrier height) ระหว่างฟังก์ชันงานของอลูมิเนียม (4.2 eV) กับระดับพลังงานต่ำสุดที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ (LUMO) หรือค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (3.0 eV) มีค่าสูงถึง 1.2 eV ทำให้การฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมเป็นไปได้ยาก ในขณะที่ในฝั่งของ ITO กับระดับพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ (HOMO) มีค่า 0.3 eV ซึ่งทำให้การฉีดโฮลจากขั้วไฟฟ้า ITO เป็นไปได้ง่าย สำหรับกรณีที่ $V < V_{th}$ โฮลจะถูกฉีดและถูกจับในชั้นฟิล์มซึ่งสอดคล้องกับสถานะปิดของตัวอุปกรณ์ ในกรณีที่ $V > V_{th}$ สถานะในการจับโฮลจะเต็ม (trap filled) อุปกรณ์จึงเปลี่ยนไปสู่สถานะเปิด และเมื่อมีการป้อนแรงดันลบให้กับอุปกรณ์โฮลที่ถูกจับจะถูกปลดปล่อยและถูกทำให้เป็นกลางโดยการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชั้นของฟิล์มบางออปเปอร์พาทาโลไซยาไนน์จะทำหน้าที่สำคัญในการดักจับและปลดปล่อยพาหะในตัวอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

สำหรับการศึกษาเพื่อสนับสนุนกลไกในการเคลื่อนที่ของพาหะนั้น จะทำการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ โดยสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปจนถึง 423 K (150 °C) แสดงได้ดังรูปที่ 4.6(ก)-(ค) โดยในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันสมบัติของความเป็นสารกึ่งตัวนำของชั้นฟิล์มคอปเปอร์-พทาไลโซยาไนน์ที่อัตรากระแสแตกต่างกัน จากรูปจะพบว่าค่ากระแสทั้งสองสถานะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดจะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการให้ความร้อนมีผลต่อค่ากระแสในสถานะปิดมากกว่า และจากที่ได้วิเคราะห์แล้วว่ากลไกการเปลี่ยนสถานะในโครงสร้างนี้น่าจะมาจากความหนาแน่นของการจับพาหะในชั้นของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาไลโซยาไนน์ ดังนั้นการนำกระแสของอุปกรณ์ในสถานะปิดจึงได้ทำการวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินี้ โดยพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการจับพาหะสามารถอธิบายได้จากสมการของอาร์เรเนียส

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{KT}\right) \quad (4.5)$$

เมื่อ

E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

σ คือ ค่าความนำทางไฟฟ้า

σ_0 คือ ค่าความนำทางไฟฟ้าที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์

K คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann (8.617×10^{-5} eV/K)

T คือ อุณหภูมิ

เมื่อจัดรูปใหม่ให้เข้ากับความสัมพันธ์เชิงเส้นในรูปที่ 4.6(ง) จะได้

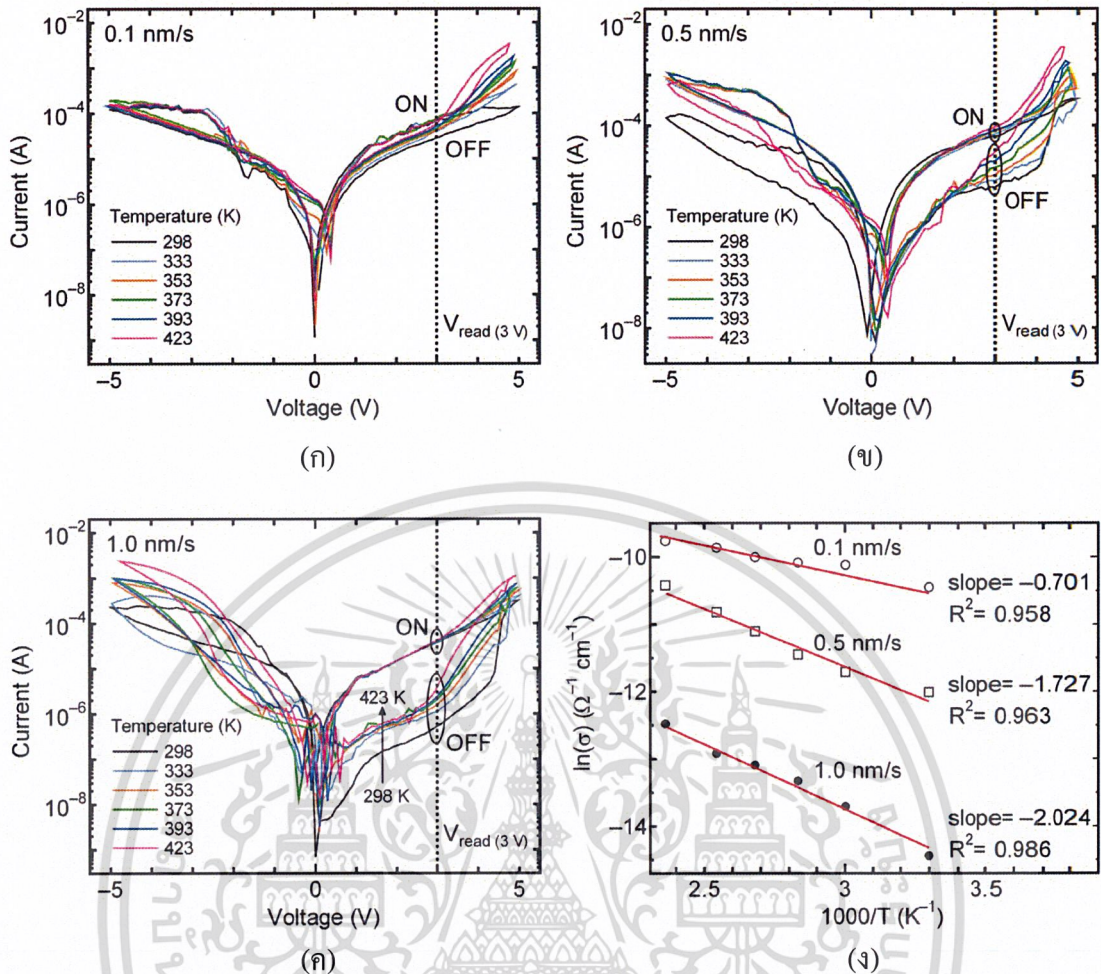
$$\ln I = \left(\frac{-E_a}{1000K}\right) \frac{1000}{T} \quad (4.6)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรง $y=mx+c$ จะได้

$$\text{Slope } (m) = \left(\frac{-E_a}{1000K}\right) \quad (4.7)$$

$$\text{ดังนั้นพลังงานกระตุ้น } (E_a) \text{ จะมีค่า} \quad E_a = \text{Slope} \times 1000 \times K \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ในอัตราการระเหยชั้น CuPc (ก) 0.1 nm/s, (ข) 0.5 nm/s, (ค) 1.0 nm/s และ (ง) กราฟอาร์เรเนียสที่เป็นส่วนกลับของอุณหภูมิในสถานะปิด ที่แรงดัน +3 โวลต์

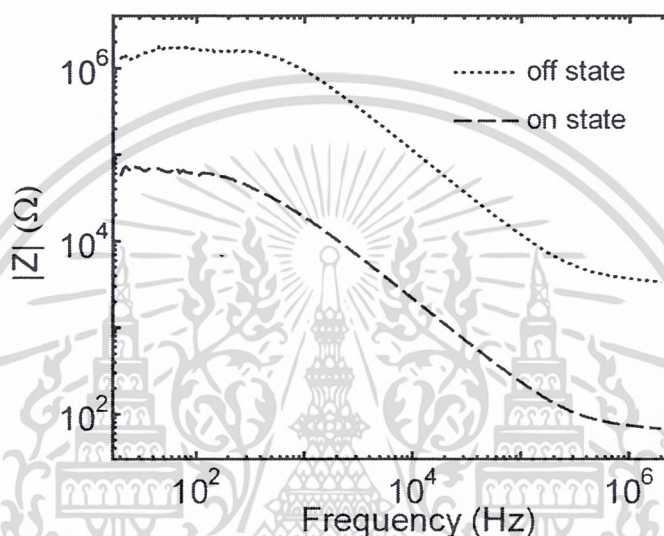
โดยในรูปที่ 4.6(ง) แสดงการพล็อตกราฟของอาร์เรเนียสที่แรงดัน +3 โวลต์ โดยพลังงานกระตุ้นในสถานะการดักจับพาหะของอุปกรณ์ที่อัตราการระเหยของชั้นคอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนด์ 0.1, 0.5 และ 1.0 nm/s คือ 0.060, 0.148 และ 0.174 eV ตามลำดับ จากการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน สามารถยืนยันได้ว่าสารอินทรีย์คอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนด์ในงานวิจัยนี้ประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำ (อุณหภูมิเพิ่มขึ้นการนำกระแสเพิ่มขึ้น) [75] และจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการแพร่ของ โลหะที่บริเวณรอยต่อเป็นหนึ่งในกลไกในการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์จากการนำกระแสแบบเส้น โยโลหะ แต่จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถยืนยันได้ว่า กลไกในการเกิดสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะใน โครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระเหยมีสาเหตุหลักมาจากกระบวนการดักจับและปลดปล่อยพาหะจากสถานะดักจับที่เกิดจากข้อบกพร่องของผลึกในชั้นของสารคอปเปอร์ฟทาโลไซยาไนด์ และจากผลการทดลองที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดคือ ที่อัตราการระเหย 1.0 nm/s หลังจากนั้นจะนำมาวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติของความเป็นอุปกรณ์หน่วยความจำต่อไป

4.1.6 ผลการวิเคราะห์วงจรสมมูลของอุปกรณ์ที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s

4.1.6.1 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ของอุปกรณ์ที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s



รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ไบอัสที่ +3 โวลต์ ในสถานะเปิดและสถานะปิด

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่อัตราการระเหยชั้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนต์ที่ 1.0 nm/s กับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ทดสอบคือ 50 mV ทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วง 20 Hz ถึง 1 MHz และทำการทดสอบในโหมดการตรวจวัด Z- θ โดยมีกรไบอัสแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ +3 โวลต์ (แรงดันสำหรับการอ่านข้อมูล) ทั้งในสถานะปิดและสถานะเปิดแสดงดังรูปที่ 4.7 จะพบว่าตลอดช่วงความถี่ ค่าอิมพีแดนซ์จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการนำกระแสในอุปกรณ์ทั้งสองสถานะ โดยค่าความนำสูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ ในขณะที่ค่าความนำต่ำจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูง

4.1.6.2 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่ส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ (กราฟ Cole-Cole) ของอุปกรณ์ที่เตรียมจากอัตราการระเหยสาร 1.0 nm/s

การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจริงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจินตภาพจะเรียกว่า กราฟ Cole-Cole ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยความถี่จะขึ้นอยู่กับค่าของอิมพีแดนซ์และเฟสของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ และมีเงื่อนไขในการทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองในรูปที่ 4.7 และเนื่องจากการทดสอบในโหมดการตรวจวัด $Z-\theta_r$ จึงทำให้

$$Re Z = Z \cos \theta_r \quad (4.9)$$

และ
$$Im Z = Z \sin \theta_r \quad (4.10)$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจริงในแกนนอนที่อยู่ด้านขวาของรูปที่ 4.8 จะเป็นข้อมูลที่ได้จากค่าความถี่ต่ำและค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจริงจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะจะมีลักษณะของกราฟครึ่งวงกลมที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจริงต่ำในสถานะเปิด และมีลักษณะของกราฟครึ่งวงกลมที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นส่วนจริงสูงในสถานะปิด ซึ่งความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์สอดคล้องกับคุณสมบัติการนำกระแสในอุปกรณ์ทั้งสองสถานะ แสดงให้เห็นว่ามีพฤติกรรมของหน่วยความจำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายใน โดยจากกราฟจะใช้เพื่อวิเคราะห์หาวงจรมูลของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียว และจากทฤษฎีในบทที่ 2 ทำให้ทราบว่า

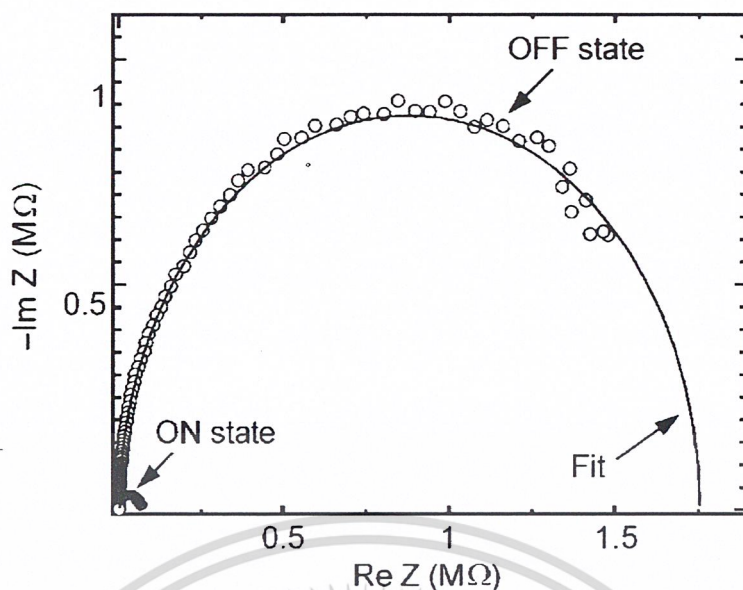
- ถ้ามีจุดหรือเส้นบนแกนนอนเพียงอย่างเดียว จะมีเพียงความต้านทานเท่านั้น
- ถ้ามีจุดหรือเส้นบนแกนตั้งเพียงอย่างเดียว จะมีความต้านทานที่เกิดจากความจุไฟฟ้าเท่านั้น
- แต่ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมดังรูปที่ 4.8 แสดงว่าเป็นวงจรมูลของวงจรรขนาน RC ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.9

จากการวิเคราะห์วงจรมูลของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียว เพื่อที่จะทำการจำลองค่าความต้านทานและค่าความจุที่วัดได้ โดยใช้รูปแบบวงจรมูลในรูปที่ 4.9 ที่ประกอบไปด้วยวงจรรขนานที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน (R_p) ขนานกับตัวเก็บประจุ (C_p) โดยเทียบได้กับชั้นของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาไลโซไซด์ที่มีความหนา 100 nm นอกจากนี้วงจรรขนานยังเชื่อมต่อกับวงจรมูลที่มีความต้านทาน (R_s) ซึ่งเทียบได้กับความต้านทานจากขั้วไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ [76] ดังนั้นจากสมการในบทที่ 2 จะได้เป็น

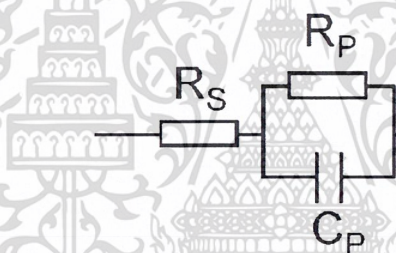
$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} - j \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \quad (4.11)$$

เมื่อ Z คือ อิมพีแดนซ์ C_p คือ ความจุไฟฟ้าในชั้นฟิล์ม
 R_p คือ ความต้านทานไฟฟ้าในชั้นฟิล์ม ω คือ ค่าความถี่เชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริงกับส่วนจินตภาพ (กราฟ Cole-Cole) โดยไบอัสที่แรงดันอ่านค่า +3 โวลต์ ในสถานะเปิดและสถานะปิด



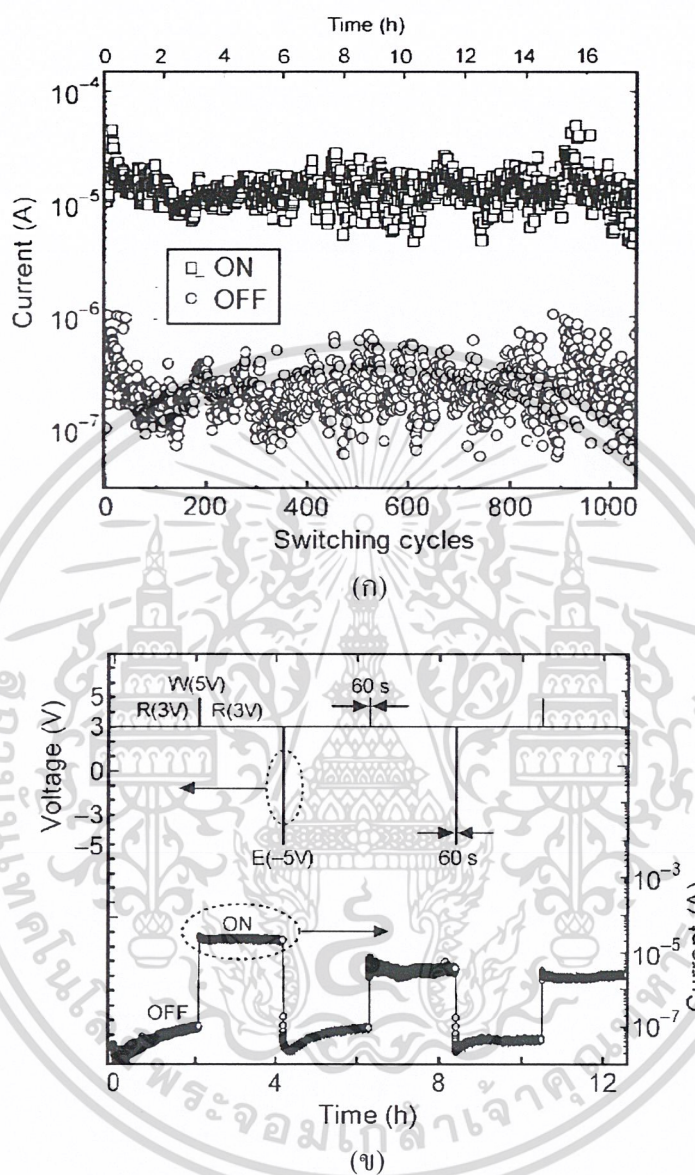
รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียว

จากค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่วัดได้ทั้งสถานะเปิดกับสถานะปิดจะแสดงค่าเป็นจุดกลมในรูปที่ 4.8 โดยได้ทำการวิเคราะห์วงจรสมมูลและทำการฟิตกราฟซึ่งจะแสดงค่าเป็นเส้นทึบในรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 จะแสดงค่าความต้านทานจากขั้วไฟฟ้า ความต้านทานในชั้นฟิล์ม รวมถึงความจุทางไฟฟ้าในชั้นฟิล์มทั้งในสถานะเปิดและสถานะปิด

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานและความจุของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียวสำหรับสถานะเปิดและสถานะปิด

สถานะ	R_s (Ω)	R_p (Ω)	C_p (nF)
ON	96.67	6.75×10^4	8.51
OFF	3.20×10^3	1.75×10^6	0.14

4.1.7 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่เตรียมจากอัตรากระเหยสาร 1.0 nm/s



รูปที่ 4.10 (ก) เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน และ (ข) การอ่านข้อมูลแบบต่อเนื่องหลังการเปลี่ยนสถานะ

หนึ่งในการทดสอบที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะคือความสามารถในการอ่าน-เขียนซ้ำ ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบโดยการป้อนแรงดันในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน ให้กับตัวอุปกรณ์ โดยค่าแรงดันที่ใช้ในการ เขียนข้อมูล, ลบข้อมูล และ อ่านข้อมูล คือ +5 V (30 s), -5 V (30-s) และ +3 V (300 ms) ตามลำดับ พบว่าอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบชั้นเดียวที่เตรียมจากอัตรากระเหย 1.0 nm/s สามารถเปลี่ยนสถานะ

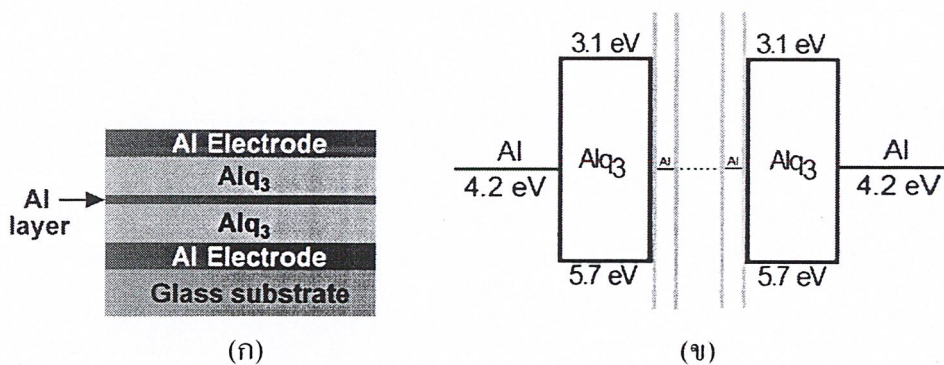
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สลับกัณฑ์ได้มากกว่า 1.000 รอบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10(ก) โดยจากจำนวนรอบในช่วงสถานะเปิดทั้งหมดสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่ากระแสได้ที่ 13.34 μA ในขณะที่จำนวนรอบในช่วงสถานะปิดทั้งหมดสามารถหาค่าเฉลี่ยของค่ากระแสได้ที่ 0.24 μA แต่จากการทดสอบจะเห็นได้ว่ามีความผันผวนของค่ากระแสอย่างเห็นได้ชัดทั้งสองสถานะตลอดช่วงการทดสอบ โดยอาจจะเป็นผลมาจากความไม่เสถียรของการดักจับและปลดปล่อยพาหะในชั้นฟิล์มคอปเปอร์ททาโลไซยาไนด์ แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ในโครงสร้างแบบชั้นเดียวสามารถแสดงคุณสมบัติแบบสองสถานะให้เห็นได้อย่างชัดเจนตลอดการทดสอบ

หัวใจสำคัญอีกประการหนึ่งในการทดสอบอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะเพื่อแสดงถึงความสามารถในการทำหน้าที่เป็นหน่วยความจำ คือ ความมีเสถียรภาพระยะยาวของตัวอุปกรณ์ สามารถทดสอบได้โดยการอ่านข้อมูลแบบต่อเนื่องหลังมีการเปลี่ยนสถานะ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10(ข) โดยจากการทดสอบจะเพิ่มระยะเวลาในการเขียนและลบข้อมูลเป็น 60 วินาที เพื่อให้ตัวอุปกรณ์มีความเสถียรในสถานะมากขึ้น จากรูปที่ 4.10(ข) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บค่ากระแสในแต่ละสถานะ และจะพบว่าหลังจากที่อุปกรณ์เปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะปิดค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบเอกโพเนนเชียลในช่วงแรก ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุมาจากกลไกในการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์เองที่เกิดจากความล่าช้าในการดักจับและปลดปล่อยพาหะ แต่จากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ในโครงสร้างแบบชั้นเดียว สามารถคงความเสถียรของสถานะได้มากกว่า 2 ชั่วโมง ดังนั้นอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสารอินทรีย์ชั้นเดียวได้แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะสำคัญที่สามารถพัฒนาไปสู่อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

4.2 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น โดยเริ่มจากการระเหยขั้วโลหะอลูมิเนียมเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่างให้มีความหนา 50 นาโนเมตร หลังจากนั้นทำการระเหยสารอินทรีย์ Alq_3 โลหะอลูมิเนียมและสารอินทรีย์ Alq_3 ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ Alq_3 จาก 50 ถึง 200 นาโนเมตร เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นสารอินทรีย์ Alq_3 และระเหยขั้วโลหะอลูมิเนียมเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าด้านบนให้มีความหนา 50 นาโนเมตร โดยโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นแสดงดังรูปที่ 4.11(ก) และแผนภาพระดับพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.11(ข)

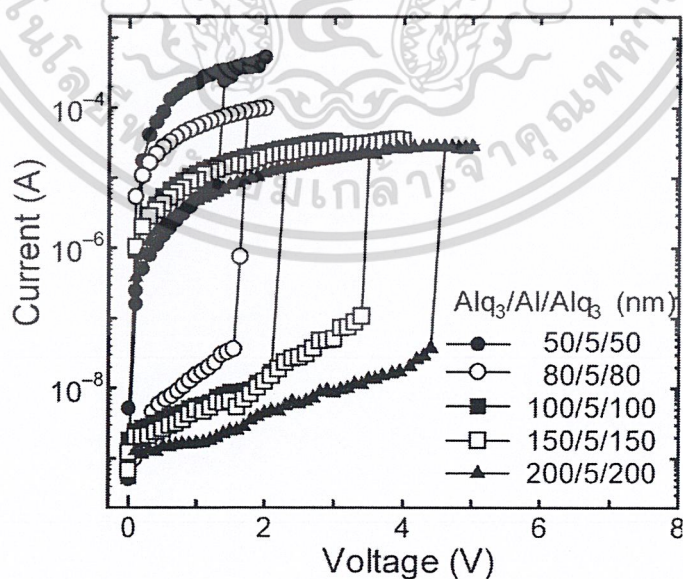


รูปที่ 4.11 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ และ (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น

โดยมีโครงสร้างทั้งหมดดังนี้

- Al/Alq₃(50 nm)/Al/Alq₃(50 nm)/Al
- Al/Alq₃(80 nm)/Al/Alq₃(80 nm)/Al
- Al/Alq₃(100 nm)/Al/Alq₃(100 nm)/Al
- Al/Alq₃(150 nm)/Al/Alq₃(150 nm)/Al
- Al/Alq₃(200 nm)/Al/Alq₃(200 nm)/Al

4.2.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น Alq₃/Al/Alq₃



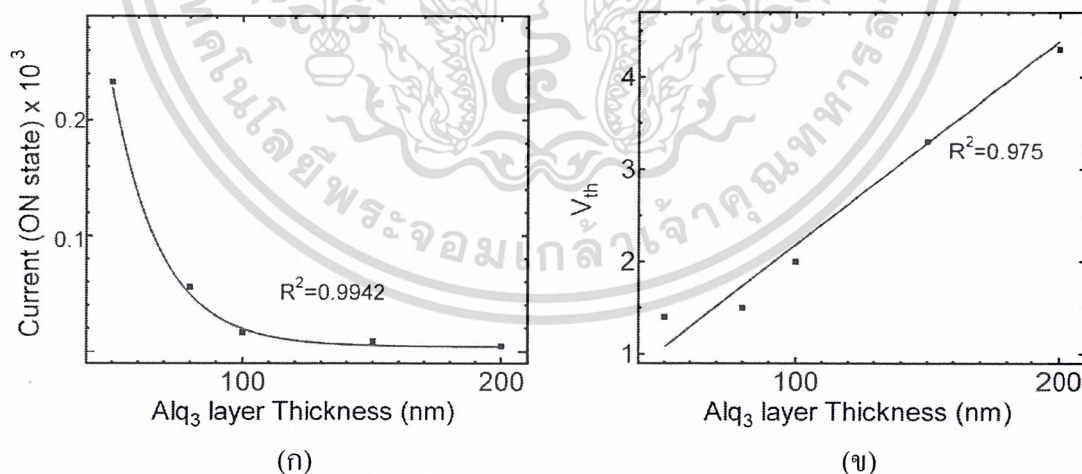
รูปที่ 4.12 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น ที่ความหนาของชั้นสาร Alq₃ แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่ความหนาของชั้นสาร Alq₃ แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.12 โดยที่สถานะเริ่มต้นของอุปกรณ์จะมีสถานะความนำทางไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งก็คือสถานะปิด แต่เมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าให้อุปกรณ์เพิ่มขึ้นถึงค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม การฉีดกระแสในตัวอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเห็นได้ชัดเจนกว่าในโครงสร้างแบบชั้นเดียว และเมื่อมีการป้อนค่าความต่างศักย์ย้อนกลับถึง 0 โวลต์ ตัวอุปกรณ์ยังคงมีสถานะความนำทางไฟฟ้าที่สูงซึ่งก็คือสถานะเปิด โดยค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด และแรงดันขีดเริ่มแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันขีดเริ่มและอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด ที่ความหนาของชั้น Alq₃ แตกต่างกัน

ความหนาของชั้น Alq ₃ (nm)	V _{th} (V)	I _{OFF} (μA)	I _{ON} (μA)	I _{ON} /I _{OFF}
50	1.4	7.46	360.00	4.83×10 ¹
80	1.5	0.06	89.40	1.49×10 ³
100	2.1	0.01	28.60	2.86×10 ³
150	3.3	0.10	31.50	3.15×10 ²
200	4.4	0.03	27.90	9.30×10 ²



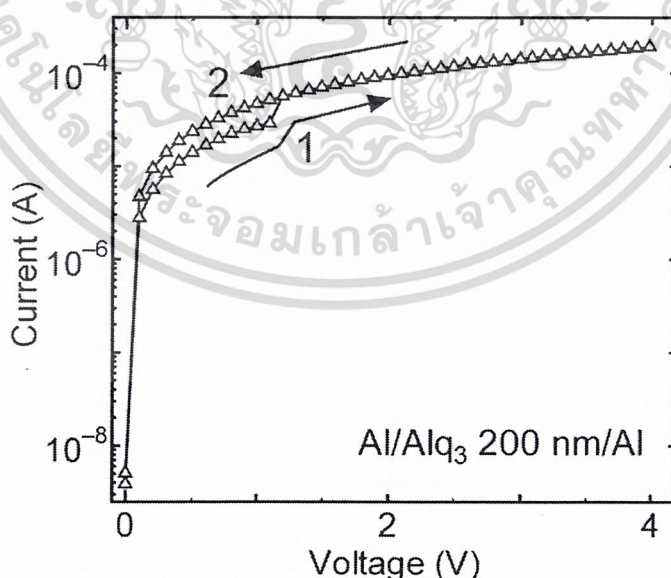
รูปที่ 4.13 ความหนาของชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ ที่มีผลต่อ (ก) ค่ากระแสที่สถานะเปิด และ (ข) ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อความหนาของชั้นสาร Alq₃ แต่ละชั้นเพิ่มสูงขึ้น ผลที่ตามมาคือค่าแรงดันขีดเริ่มและค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่เปลี่ยนแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไป และในรูปที่ 4.13(ก) แสดงความหนาของชั้นสาร Alq_3 ที่มีผลต่อกระแสที่สถานะเปิดของอุปกรณ์ จากรูปค่ากระแสจะลดลงแบบเอกโพเนนเชียลเมื่อความหนาของชั้นสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีจากการทดลองของ Yang และคณะ [77] ที่กล่าวว่า ในสถานะเปิดซึ่งเป็นสถานะสมดุลการเคลื่อนที่ของพาหะเนื่องจากสถานะดักจับเต็ม โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่พาหะจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นสารกึ่งตัวนำจะลดลงแบบเอกโพเนนเชียล นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต่างศักย์ที่ทำให้อุปกรณ์เกิดการเปลี่ยนสถานะจะเพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อความหนาของชั้นสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.13(ข)

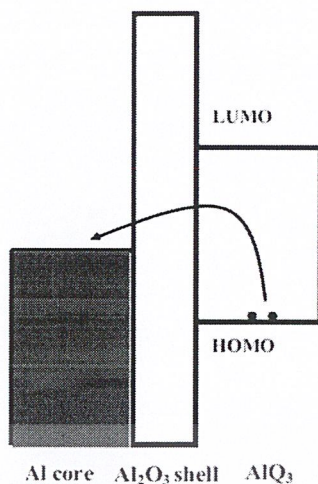
4.2.2 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/Alq_3$

กลไกในการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีชั้นโลหะเป็นชั้นกลางจะเกิดจากการกักพาหะ ที่เป็นผลมาจากสมบัติเฉพาะของโครงสร้างโลหะที่ทับถมกันอย่างซ้ำ ๆ โดยก่อนที่ จะทำการอธิบายถึงสาเหตุการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ จำเป็นที่จะต้องตัดปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ออก ดังที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 2 ซึ่งปัจจัยอื่นที่สำคัญต่อการเปลี่ยนสถานะคือผลกระทบของบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จากรูปที่ 4.14 เป็นการนำโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดคือ $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/Alq_3(100\text{ nm})/Al$ จากการเปลี่ยนความหนาของชั้นสารอินทรีย์ Alq_3 มาทำการทดสอบ โดยไม่มีชั้นของอลูมิเนียมอยู่ตรงกลาง คือ $Al/Alq_3(200\text{ nm})/Al$ แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่ไม่มีชั้นของโลหะอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



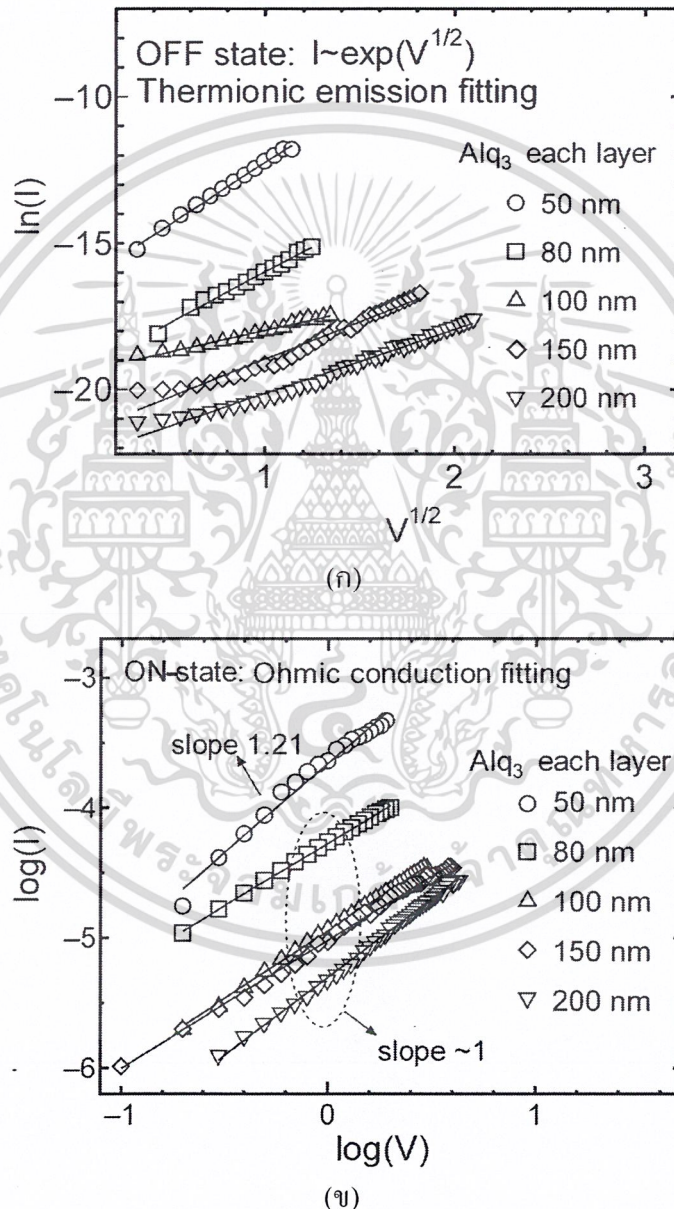
รูปที่ 4.15 กลไกการเปลี่ยนสถานะ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าตัวอุปกรณ์ยังคงแสดงสมบัติสเปกตรัมที่ขนาดเล็กลงมาให้เห็น ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุมาจากผลกระทบของบริเวณรอยต่อ โลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่อุณหภูมิโลหะเกิดการแพร่เข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์เกิดเป็นสถานะดักจับขึ้น ซึ่งกลไกของอุปกรณ์จากบริเวณรอยต่อได้มีการศึกษาและรายงานมาก่อนหน้าจากหลายกลุ่มวิจัย [3, 78] และสำหรับ โครงสร้างจาก Alq₃ แบบชั้นเดียว ทีมวิจัยของ Tu และคณะ [79] ได้มีการรายงานถึงสมบัติความเป็นอุปกรณ์สองสถานะที่ดี เนื่องจากกลไกในการเปลี่ยนสถานะจากเส้นใยโลหะ แต่จากการทดลองในงานวิจัยนี้จะพบว่ากลไกหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะคือ การมีอยู่ของชั้น โลหะออกซิเดชันชั้นกลางที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกักพาหะซึ่งสอดคล้องกับหลาย ๆ งานวิจัยก่อนหน้านี้ [3, 13, 32] เนื่องจากทั้งโครงสร้างที่มีออกซิเดชันชั้นกลางและไม่มีออกซิเดชันชั้นกลางได้มีการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่เงื่อนไขเดียวกัน ดังนั้นจากการทดลองจึงยืนยันได้ว่าชั้นโลหะคือตัวแปรที่สำคัญสำหรับโครงสร้างแบบสามชั้นในงานวิจัยนี้ โดยสาเหตุที่ทำให้ชั้นโลหะมีคุณสมบัติในการกักพาหะคือ กระบวนการทับถมของชั้นโลหะที่ต่ำมากทำให้เกิดกระบวนการทางเคมีระหว่างอนุภาคของโลหะกับออกซิเจนที่ยังมีอยู่ในระบบปลูกทำให้เกิดเป็นชั้นออกไซด์ล้อมรอบอนุภาค โลหะไว้ก่อนที่จะทับถมบนชั้นสาร Alq₃ เกิดเป็นลักษณะของนาโนคลัสเตอร์ โดย Reddy และคณะ [32] ได้ทำการยืนยันผลการทดลองโดยละเอียดจากการเกิดเป็นลักษณะของชั้นโลหะออกไซด์ Al₂O₃ ล้อมรอบอนุภาคโลหะโดยใช้เทคนิค X-ray Photoemission Spectroscopy (XPS) และการที่อิเล็กตรอนจะถูกชั้นของออกซิเดชันนาโนคลัสเตอร์ก็กักอยู่ในได้นั้น จะเกิดจากการที่สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นของสาร Alq₃ และ ชั้นของออกซิเดชัน โดยเมื่อความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นสนามไฟฟ้าก็จะเพิ่มสูงเช่นเดียวกัน ทำให้พาหะอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน HOMO ของสาร Alq₃ อาจได้รับพลังงานมากเพียงพอและเกิดการทะลุผ่านชั้นออกไซด์ส่วนที่ล้อมรอบเข้าไปยังแกนของออกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 4.15 และกระบวนการนี้เองจะนำไปสู่การเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำจากสถานะปิดไปสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะเปิด โดยประจุลบที่อยู่ในแกนของอลูมิเนียมจะมีความเสถียรเนื่องจากการมีอยู่ของชั้นออกไซด์ที่จะทำหน้าที่ขัดขวางการรวมตัวกันระหว่างประจุบวกและประจุลบ

เพื่ออธิบายถึงลักษณะเฉพาะในการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ จึงได้ทำการตรวจสอบกลไกในการนำกระแสของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น โดยในรูปที่ 4.16(ก) และ (ข) แสดงกลไกการนำกระแสของอุปกรณ์ในโครงสร้างแบบสามชั้นทั้งในสถานะเปิดและปิด



รูปที่ 4.16 กลไกการนำที่สอดคล้องกับสมบัติทางไฟฟ้าและความต่างศักย์ (ก) เทอร์โมอิเล็กทริกที่สถานะปิด และ (ข) การนำกระแสแบบโอห์มมิกที่สถานะเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) จากการฟิตข้อมูลเข้ากับสมการของกระแสและแรงดันในสถานะปิดที่ความหนาของชั้น Alq₃ แตกต่างกัน

กลไกการนำกระแส	สถานะปิด				
	R^2				
	50 nm	80 nm	100 nm	150 nm	200 nm
Thermionic emission: $\ln(I) \sim V^{1/2}$	0.995	0.992	0.983	0.981	0.989
Pool-Frenkel emission: $\ln(I/V) \sim V^{1/2}$	0.911	0.808	0.644	0.665	0.030
Fowler-Nordheim tunneling: $\ln(I/V^2) \sim 1/V$	0.967	0.925	0.899	0.184	0.894
Ohmic conduction: $\log(J) \sim \log(V)$	0.980	0.978	0.881	0.850	0.754

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) จากการฟิตข้อมูลเข้ากับสมการของกระแสและแรงดันในสถานะเปิดที่ความหนาของชั้น Alq₃ แตกต่างกัน

กลไกการนำกระแส	สถานะเปิด				
	R^2				
	50 nm	80 nm	100 nm	150 nm	200 nm
Thermionic emission: $\ln(I) \sim V^{1/2}$	0.913	0.945	0.955	0.925	0.934
Pool-Frenkel emission: $\ln(I/V) \sim V^{1/2}$	0.643	0.527	0.842	0.060	0.779
Fowler-Nordheim tunneling: $\ln(I/V^2) \sim 1/V$	0.645	0.796	0.836	0.710	0.711
Ohmic conduction: $\log(J) \sim \log(V)$	0.980	0.999	0.999	0.994	0.996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะพบว่าในสถานะปิดรูปแบบที่สอดคล้องมากที่สุดคือ การนำแบบเทอร์โมไอออนิกที่มีผลต่อการนำกระแส ซึ่งสามารถยืนยันได้จากสมบัติของกระแสและความต่างศักย์จากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\ln(I)$ กับ $V^{1/2}$ ในรูปที่ 4.16(ก) โดยกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ในสถานะปิดจากการนำแบบเทอร์โมไอออนิกจะพิจารณาจาก

$$J = T^2 \exp \left[\frac{-(\phi - q\sqrt{qV/4\pi d\epsilon_i})}{kT} \right] \quad (4.12)$$

- เมื่อ ϵ_i คือ insulator dynamic permittivity
 D คือ ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ
 V คือ ความต่างศักย์
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
 ϕ คือ ความสูงกำแพงศักย์ (barrier height)
 T คือ อุณหภูมิ
 k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่า 1.38×10^{-23} J/K

ในขณะที่สถานะเปิดความชันที่ได้จากกราฟในรูปที่ 4.16(ข) มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นการนำไฟฟ้าที่เด่นที่สุดในสถานะเปิดจึงจะเป็นการนำกระแสแบบโอห์มมิกที่เกิดขึ้นหลังจากสถานะดักจับที่เกิดจากโลหะออกซิเดชันชั้นกลางเต็ม เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกโดยไม่มีอุปสรรค ซึ่งสามารถยืนยันได้จากสมบัติของกระแสและความต่างศักย์จากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\log(I)$ กับ $\log(V)$ ในรูปที่ 4.16(ข) จะพบว่าค่ากระแสจะแปรผันตรงกับค่าความต่างศักย์ ดังสมการ

$$J = \frac{V}{d} \exp \left[\frac{-\Delta E_{ae}}{kT} \right] \quad (4.13)$$

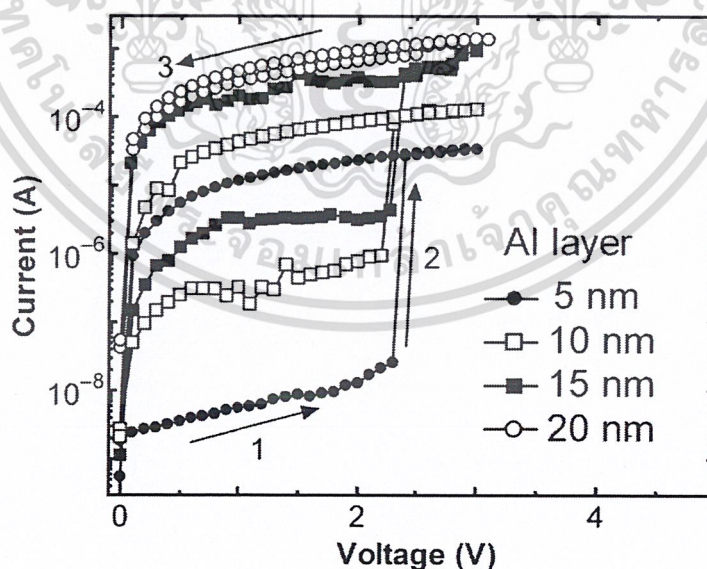
- เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ
 V คือ ความต่างศักย์
 T คือ อุณหภูมิ
 ΔE_{ae} คือ พลังงานกระตุ้นของอิเล็กตรอน

4.2.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/Alq_3$ ที่เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอลูมิเนียม

จากการศึกษาอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบสามชั้นที่มีความหนาของชั้นสารอินทรีย์ Alq_3 แตกต่างกัน พบว่าโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดคือ $Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/Alq_3(100\text{ nm})$ ซึ่งพิจารณาจากค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิด และค่าแรงดันจิกเริ่มที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ โดยศึกษาถึงความหนาของชั้นอลูมิเนียมที่เป็นตัวแปรหลักต่อการเปลี่ยนสถานะ โดยมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอลูมิเนียมชั้นกลางจาก 5 ถึง 20 นาโนเมตร โดยมีขั้วโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่างและด้านบนที่ความหนา 50 นาโนเมตรเช่นเดิม เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของอลูมิเนียมชั้นกลางและนำไปพัฒนาเป็นโครงสร้างที่ดีต่อไป โดยโครงสร้างของอุปกรณ์และแผนภาพระดับพลังงานมีลักษณะเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.11

โดยมีโครงสร้างทั้งหมดดังนี้

- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/Alq_3(100\text{ nm})/Al$
- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(10\text{ nm})/Alq_3(100\text{ nm})/Al$
- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(15\text{ nm})/Alq_3(100\text{ nm})/Al$
- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(20\text{ nm})/Alq_3(100\text{ nm})/Al$



รูปที่ 4.17 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมแตกต่างกัน

รูปที่ 4.17 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่มีความหนาของชั้นอลูมิเนียมแตกต่างกัน พบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์แก่อุปกรณ์จนถึงค่าแรงดันขีดเริ่ม (ลูกศรเส้นที่ 2) ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่าแรงดันขีดเริ่มจะอยู่ในช่วง +2.1 ถึง +2.5 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันขีดเริ่มในโครงสร้างของ $Alq_3(100 \text{ nm})/Al(5 \text{ nm})/Alq_3(100 \text{ nm})$ ที่ได้ทำการศึกษาไปก่อนหน้านี้ ในส่วนของค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดของตัวอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นอลูมิเนียมได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 4.7 โดยค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดในครั้งนี้จะแตกต่างจากที่ทำการตรวจสอบในหัวข้อที่ผ่านมาคือ ในหัวข้อที่ผ่านมาจะทำการวัดที่แรงดันขีดเริ่มแต่ในหัวข้อนี้จะทำการวัดที่แรงดันการอ่าน +1 โวลต์ เนื่องจากสิ่งที่จำเป็นในการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำคือ มีความสามารถที่เพิ่มขึ้นและใช้พลังงานที่ต่ำลง โดยจากรูปที่ 4.17 จะพบว่าที่แรงดัน +1 โวลต์ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทุกความหนาของชั้นอลูมิเนียมจะแสดงสมบัติแบบสองสถานะให้เห็น ซึ่งมีค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดสูงที่สุดอยู่ที่ 1.17×10^3 สำหรับชั้นอลูมิเนียม 5 นาโนเมตร

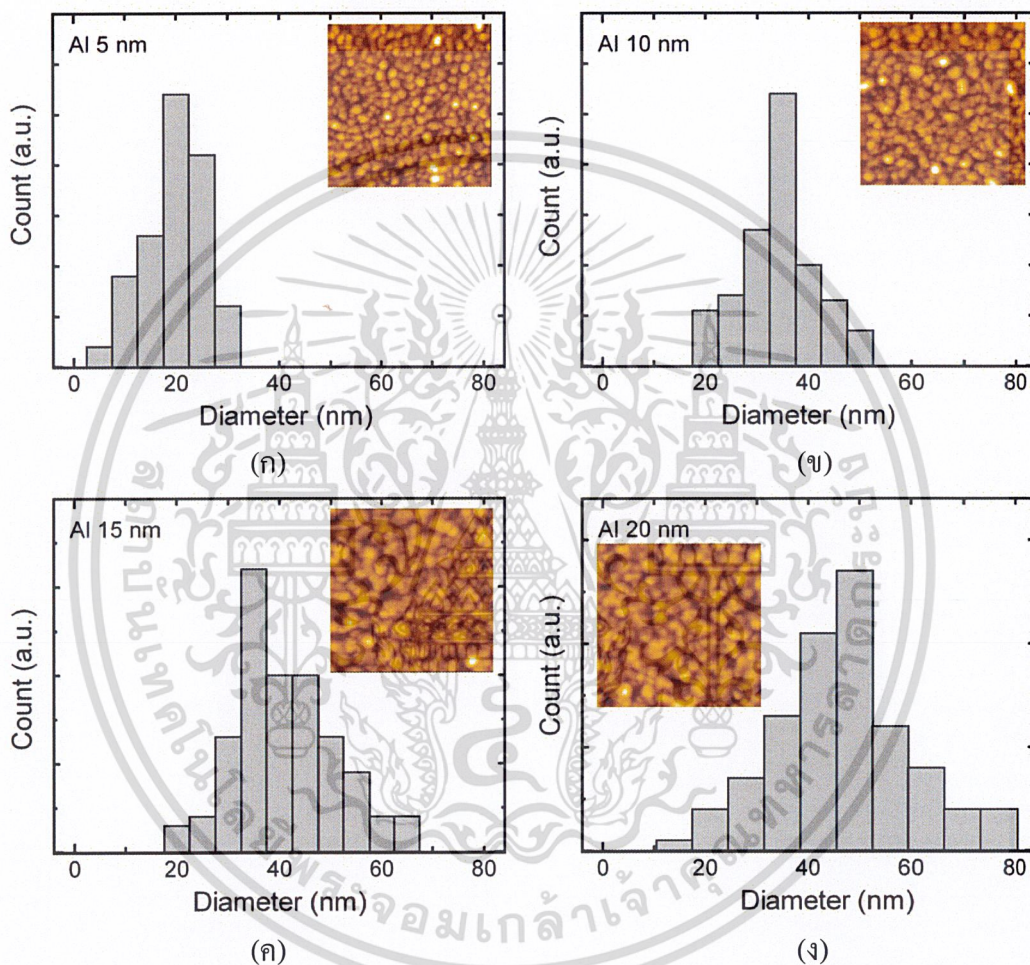
ตารางที่ 4.7 ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมแตกต่างกันที่แรงดัน +1 โวลต์

ความหนาของชั้น Al (nm)	$I_{OFF} (\mu A)$	$I_{ON} (A)$	I_{ON}/I_{OFF}
5	0.01	11.70	1.17×10^3
10	0.32	43.20	1.35×10^2
15	3.36	207.00	61.60
20	329.00	466.00	1.41

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้างแบบสามชั้นมีการตอบสนองกับอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์และความหนาของโลหะอลูมิเนียมชั้นกลางอย่างชัดเจน ดังนั้นค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่แตกต่างกันน่าจะมาจากขนาดและความหนาแน่นของชั้นอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์ชั้นกลาง โดยที่ลักษณะของพื้นผิวและความหนาของชั้นอลูมิเนียมจะขึ้นอยู่กับอัตราในการระเหยและการควบคุมความหนา ซึ่งจากหลาย ๆ งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่อัตราการทับถมของโลหะสูงจะทำให้เกิดพื้นผิวของชั้นโลหะที่ต่อเนื่อง และจะส่งผลให้ไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้อัตราการระเหยเป็น 0.01 nm/s จึงเป็นผลทำให้เกิดเป็นลักษณะพื้นผิวแบบนาโนคลัสเตอร์ที่สามารถดักจับพาหะได้ และส่งผลให้เกิดสมบัติทาง

ไฟฟ้าแบบสองสถานะนั่นเอง โดยรายละเอียดเกี่ยวกับนาโนคลัสเตอร์ของชั้นอลูมิเนียม ได้ทำการตรวจสอบโดยเครื่อง AFM

4.2.4 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชั้นอลูมิเนียมที่ความหนาแตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



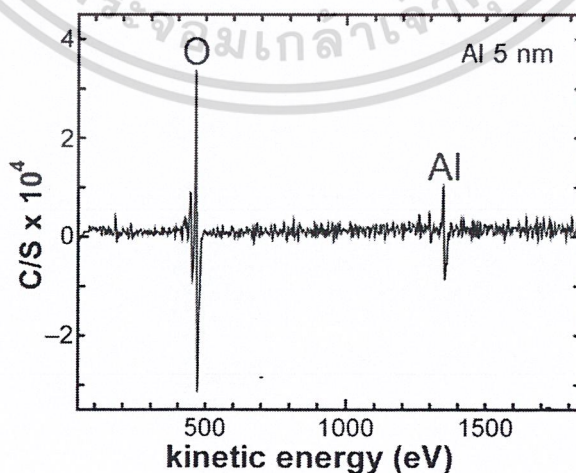
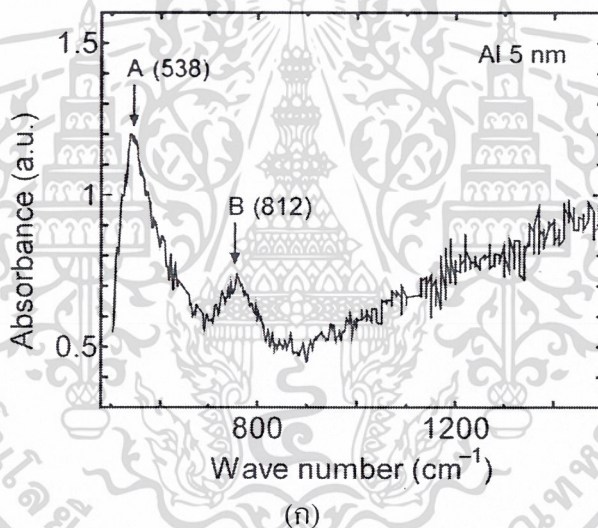
รูปที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิวจาก AFM (500×500 nm) และการกระจายของนาโนคลัสเตอร์ของอลูมิเนียมชั้นกลางที่ความหนา (ก) 5 nm, (ข) 10 nm, (ค) 15 nm และ (ง) 20 nm

รูปที่ 4.18(ก) ในภาพเล็กจะเป็นการแสดงลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของอลูมิเนียมชั้นกลางที่ความหนา 5 นาโนเมตร ภาพจาก AFM แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีการกระจายตัวของอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์อย่างเป็นระเบียบ โดยการกระจายตัวของอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์เป็นการประมาณค่าโดยตรงจากภาพโดยซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ ซึ่งมีขนาดของนาโนคลัสเตอร์อยู่ในช่วง 5 ถึง 30 นาโนเมตร และมีพีกสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 20 นาโนเมตร หลังจากนั้นเมื่อความหนาของชั้นโลหะอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเป็น 10 นาโนเมตรขนาดของอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นแสดง

เอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นในรูปที่ 4.18(ข) สำหรับฟิล์มอลูมิเนียมที่มีความหนา 10 นาโนเมตร การกระจายตัวของอลูมิเนียม นาโนคลัสเตอร์จะอยู่ในช่วง 18 ถึง 50 นาโนเมตร และมีพีคสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 35 นาโนเมตร แต่หลังจากที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมเพิ่มเป็น 15 และ 20 นาโนเมตร การกระจายตัวของนาโนคลัสเตอร์จะมีความเป็นระเบียบลดลงและจะมีการเคลื่อนที่ของขอบเกิดขึ้น ซึ่งจะเริ่มมีการเปลี่ยนจากลักษณะของคลัสเตอร์ไปเป็นลักษณะของเลเซอร์ จึงทำให้ความสามารถในการดักจับพาหะลดลงแต่ความสามารถในการนำกระแสจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถอธิบายตารางที่ 4.7 ได้ว่า สาเหตุที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นแล้วทำให้กระแสทั้งสถานะเปิดและสถานะปิดสูงขึ้นแต่ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดลดลงนั้น เป็นผลมาจากความสามารถในการนำกระแสที่เพิ่มขึ้นของอลูมิเนียมชั้นกลางนั่นเอง

4.2.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและพันธะของสารประกอบ

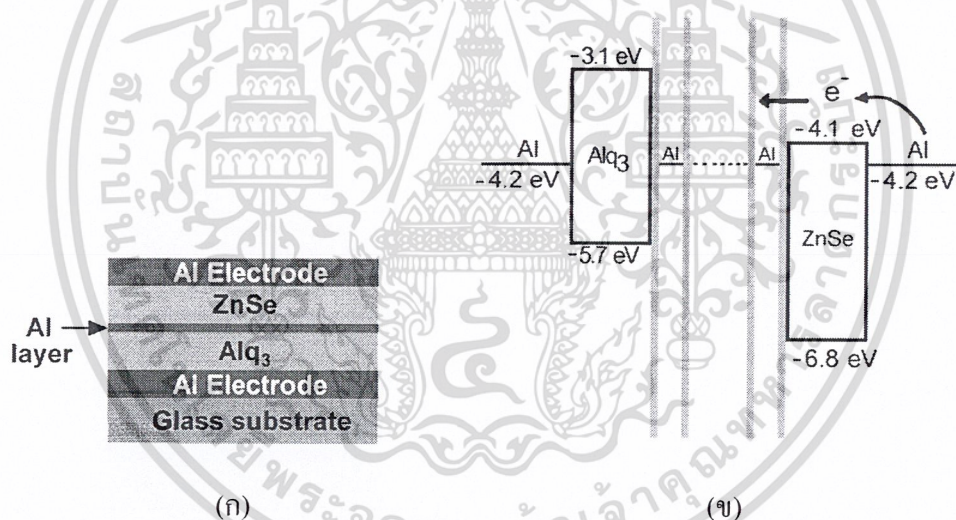


รูปที่ 4.19 สเปกตรัมจาก (ก) FT-IR และ (ข) AES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า Reddy และคณะ [32] ได้ทำการยืนยันผลการทดลองโดยละเอียดจากการเกิดเป็นลักษณะของชั้น โลหะออกไซด์ Al_2O_3 ล้อมรอบอนุภาคโลหะโดยใช้เทคนิค XPS แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงสเปกตรัมจาก FT-IR และ AES โดยในรูปที่ 4.19(ก) เป็นการแสดงสเปกตรัมจาก FT-IR ของชั้นอลูมิเนียมที่มีความหนา 5 นาโนเมตรซึ่งเป็นความหนาของโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดในช่วง 500 ถึง 1500 cm^{-1} โดยที่พีคเด่นที่เห็นได้ชัดคือที่ $\sim 538 \text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่ง A) เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Al-O แบบออกตะฮีดรัล ในขณะที่พีครองอยู่ที่ $\sim 812 \text{ cm}^{-1}$ (ตำแหน่ง B) เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Al-O แบบเตตระฮีดรัล [3, 80-82] และในรูปที่ 4.19(ข) แสดงสเปกตรัมจาก AES ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและออกซิเจน จากผลการทดลองนี้เองเมื่อพิจารณาพร้อมกับลักษณะพื้นผิวแบบนาโนคลัสเตอร์จากภาพ AFM ก็จะสามารถยืนยันถึงการเกิดเป็นชั้น โลหะออกไซด์ปะปนกับโลหะอลูมิเนียมได้

4.3 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$



รูปที่ 4.20 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์ และ (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น ที่ทำการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ และชั้น โลหะอลูมิเนียมจากหัวข้อที่ผ่านมา นั้น จะได้โครงสร้างที่เหมาะสมคือ Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/Alq₃(100 nm) หลังจากนั้นจึงได้ ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ในโครงสร้างแบบสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ โดยมีโครงสร้างคือ Alq₃/Al/ZnSe ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงความหนาของชั้นสารอนินทรีย์ โดยมีการ เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์จาก 50 ถึง 150 นาโนเมตร โดยมีขั้วโลหะ

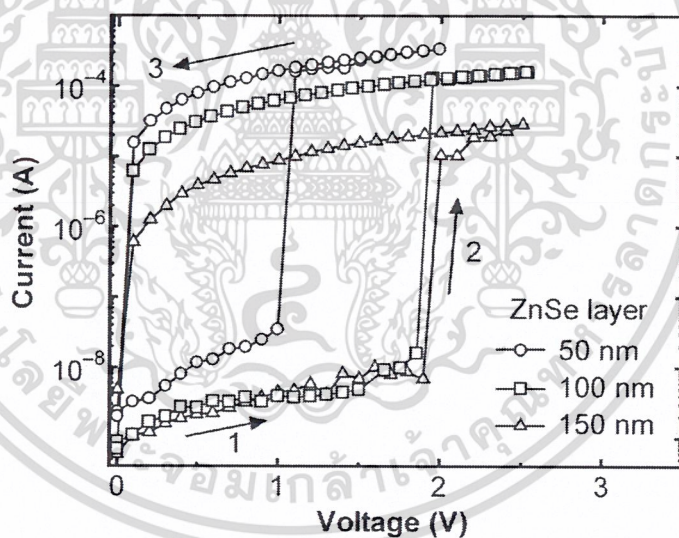
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าด้านล่างและด้านบนที่มีความหนา 50 นาโนเมตรเช่นเดิม เพียงแต่ในโครงสร้างของ $Alq_3/Al/Alq_3$ เป็นโครงสร้างแบบสมมาตรขั้วไฟฟ้า ในขณะที่โครงสร้างของ $Alq_3/Al/ZnSe$ นั้นเป็นโครงสร้างที่ไม่สมมาตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากระดับพลังงานแล้วจึงกำหนดให้ขั้วอลูมิเนียมด้านซิงค์ซิติไลน์เป็นขั้วแคโทด ในขณะที่ขั้วอลูมิเนียมด้าน Alq_3 เป็นขั้วแอโนด โดยโครงสร้างของอุปกรณ์และแผนภาพระดับพลังงานแสดงดังรูปที่ 4.20

โดยมีโครงสร้างทั้งหมดดังนี้

- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/ZnSe(50\text{ nm})/Al$
- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/ZnSe(100\text{ nm})/Al$
- $Al/Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/ZnSe(150\text{ nm})/Al$

4.3.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$



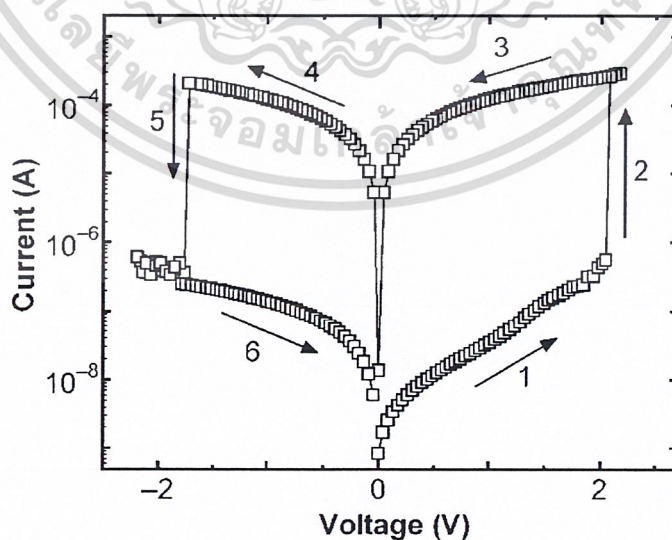
รูปที่ 4.21 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น ที่ความหนาของชั้น ZnSe แตกต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นที่ความหนาของชั้นสารอินทรีย์ซิงค์ซิติไลน์แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.21 โดยค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดจะทำการวัดที่แรงดันการอ่าน +1 โวลต์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.8 และจากตารางที่ 4.8 พบว่าที่ความหนา 100 นาโนเมตรจะให้ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดสูงที่สุด โดยในรูปที่ 4.22 เป็นการแสดงสมบัติเฉพาะของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ากระแสและความต่างศักย์ที่ฝั่งแรงดันบวกและแรงดันลบของโครงสร้าง $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$ จากรูปจะพบว่าที่สถานะเริ่มต้นที่ 0 โวลต์ จนถึงประมาณ +2 โวลต์ (กราฟเส้นที่ 1) ตัวอุปกรณ์จะมีสถานะการนำต่ำ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 0.83 nA ถึง 0.54 μA เปรียบเสมือนกับสถานะปิดของตัวอุปกรณ์นั่นเอง หลังจากเพิ่มแรงดันจนถึงแรงดันขีดเริ่มประมาณ +2 โวลต์ การฉีดกระแสในตัวอุปกรณ์จะเปลี่ยนแปลงแบบเพิ่มขึ้นจาก 0.54 μA ไปเป็น 0.28 mA (กราฟเส้นที่ 2) เปรียบเสมือนกับการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์หน่วยความจำจากสถานะปิดไปเป็นสถานะเปิดนั่นเอง ซึ่งค่าแรงดันขีดเริ่มที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะนี้เรียกได้อีกอย่างว่าการเขียนข้อมูล และในสถานะเปิดตัวอุปกรณ์ยังคงสามารถรักษาสภาพความนำสูงเอาไว้ได้โดยอยู่ในช่วง 0.28 mA ถึง 5.3 μA (กราฟเส้นที่ 3) และสถานะเปิดจะกลับมายังสถานะปิดโดยการป้อนแรงดันลบประมาณ -2 โวลต์ หรือเรียกได้อีกอย่างว่าการลบข้อมูล

ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดที่ความหนาของชั้นซิงค์ซีลีไนด์แตกต่างกันที่แรงดัน +1 โวลต์

ความหนาของชั้น ZnSe (nm)	$I_{\text{OFF}} \text{ (A)}$	$I_{\text{ON}} \text{ (A)}$	$I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$
50	2.48×10^{-8}	1.64×10^{-4}	6.61×10^3
100	4.48×10^{-9}	6.20×10^{-5}	1.38×10^4
150	3.93×10^{-9}	8.82×10^{-6}	2.24×10^3



รูปที่ 4.22 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะของโครงสร้าง

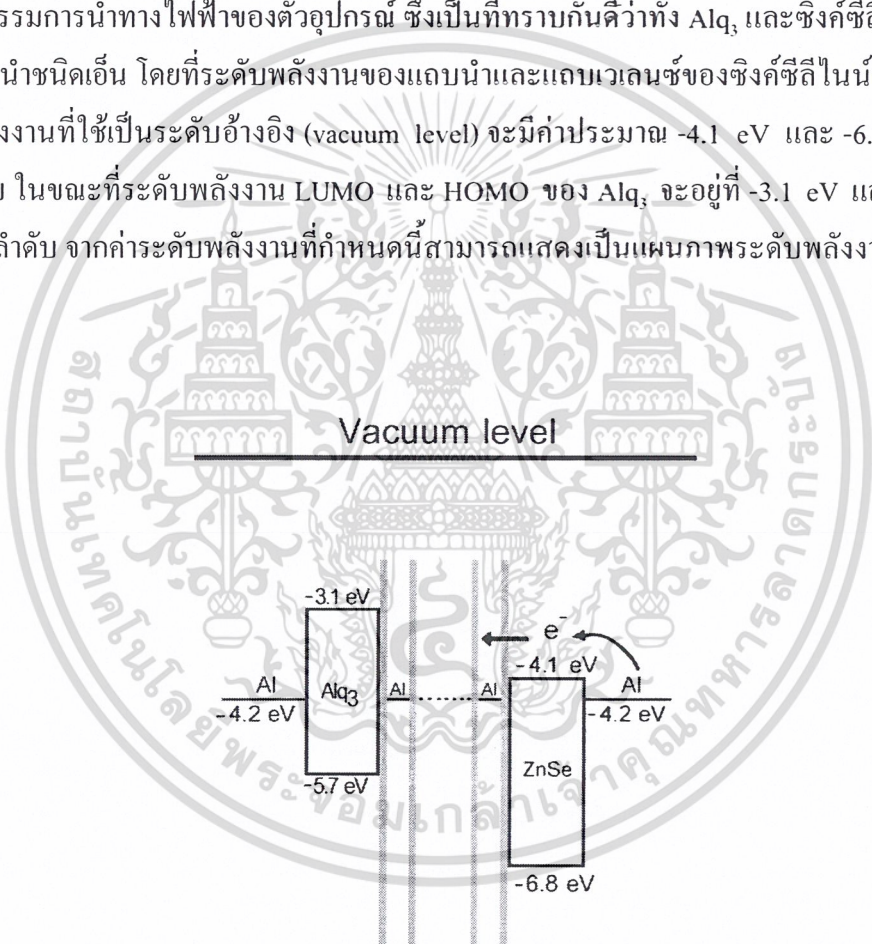
$\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น Alq₃/Al/ZnSe

ในการวิเคราะห์กลไกในการเปลี่ยนสถานะจากโครงสร้าง Alq₃/Al/Alq₃ สามารถบอกได้ว่าหัวใจสำคัญของการเปลี่ยนสถานะคือ การมีอยู่ของโลหะอะลูมิเนียมชั้นกลาง ดังนั้นในโครงสร้าง Alq₃/Al/ZnSe จะทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของชั้นสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนน์ที่มาแทนที่ชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ และจากผลการทดลองในโครงสร้างที่มีสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนน์พบว่า ตัวอุปกรณ์ให้ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดได้สูงกว่าโครงสร้างที่ใช้สารอินทรีย์ Alq₃ ในขณะที่แรงดันขั้วเริ่มจะมีค่าต่ำกว่า ดังนั้นชั้นสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนน์จึงน่าจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการนำทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าทั้ง Alq₃ และซิงค์ซีลีไนน์ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยที่ระดับพลังงานของแถบนำและแถบเวเลนซ์ของซิงค์ซีลีไนน์ที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง (vacuum level) จะมีค่าประมาณ -4.1 eV และ -6.8 eV [83] ตามลำดับ ในขณะที่ระดับพลังงาน LUMO และ HOMO ของ Alq₃ จะอยู่ที่ -3.1 eV และ -5.7 eV [84] ตามลำดับ จากค่าระดับพลังงานที่กำหนดนี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพระดับพลังงานได้ดังรูปที่ 4.23

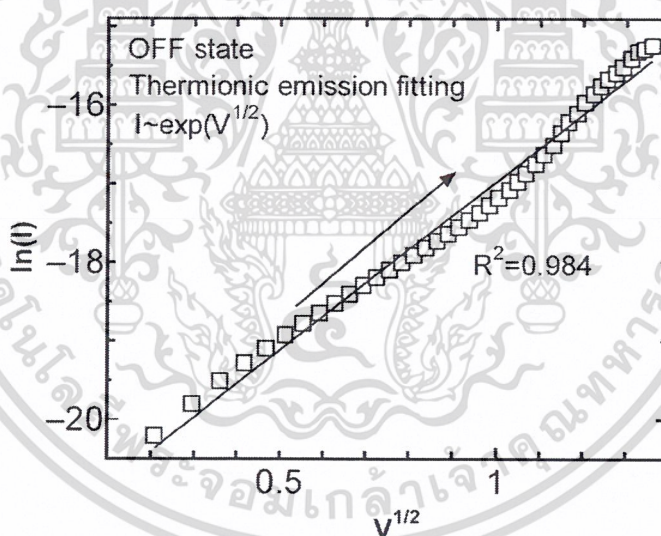


รูปที่ 4.23 ระดับพลังงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

จากแผนภาพระดับพลังงานเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Alq₃ และซิงค์ซีลีไนน์ จะพบว่า ระดับพลังงาน LUMO หรือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี ของสาร Alq₃ จะมีค่าต่ำกว่าระดับพลังงานการนำของสารซิงค์ซีลีไนน์ ในขณะที่ระดับพลังงานการนำของซิงค์ซีลีไนน์จะอยู่ใกล้กับระดับฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมากกว่าระดับพลังงาน LUMO ของ Alq₃ ดังนั้นกำแพงศักย์ที่ขัดขวางการฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าด้านบนเข้าไปยังชั้นของซิงค์ซีลีไนน์จึงมีค่าต่ำกว่าการฉีดอิเล็กตรอนจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

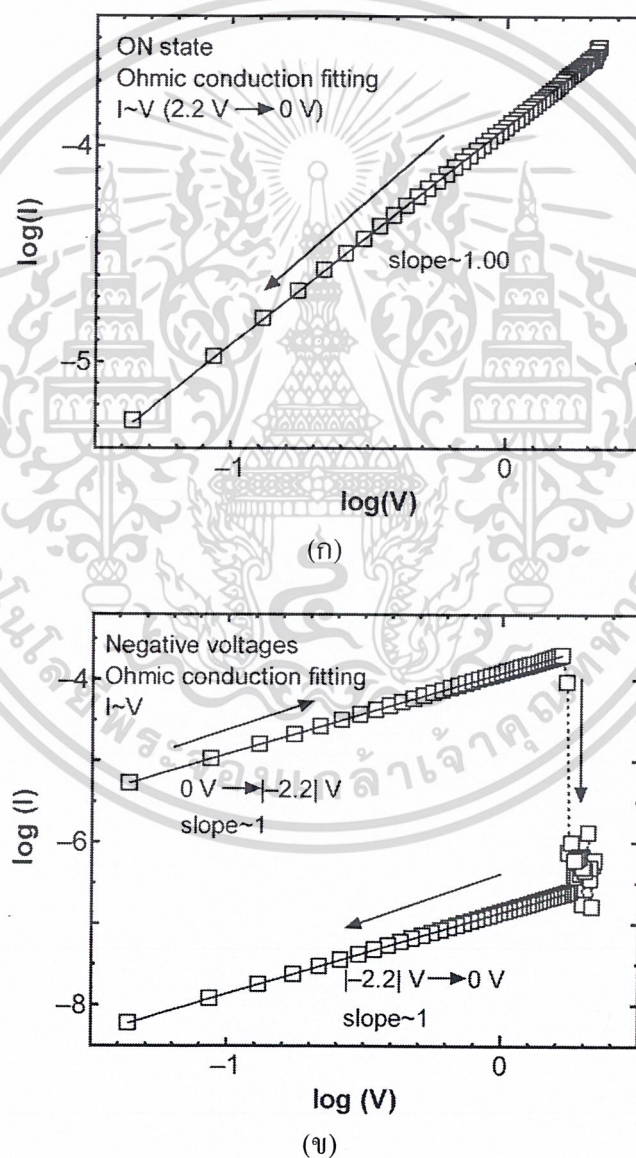
ขั้วไฟฟ้าด้านล่างเข้าไปยังชั้นของ Alq_3 ทำให้เมื่อป้อนแรงดันบวกให้กับอุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากขั้วแคโทดเข้าไปยังชั้นของซิงค์ซีลีไนน์และเคลื่อนที่ไปยังชั้นของอลูมินัมนาโนคลัสเตอร์ได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการทะลุผ่านชั้นของโลหะออกไซด์เข้าไปกักอยู่ที่แกนของอลูมินัมและทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ได้เร็วขึ้นเอง จึงเป็นเหตุผลในการอธิบายถึงค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดของโครงสร้าง $Alq_3/Al/ZnSe$ ที่มีค่าสูงกว่าในโครงสร้าง $Alq_3/Al/Alq_3$ ในขณะที่ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าต่ำกว่า จึงกล่าวได้ว่าค่าพวงศักร์ที่บริเวณรอยต่อมีบทบาทสำคัญต่อการฉีดพาหะในตัวอุปกรณ์ โดยหลังจากที่อิเล็กตรอนเริ่มมีการทะลุผ่านชั้นของโลหะออกไซด์เข้าไปกักอยู่ที่แกนของอลูมินัม คือช่วงที่มีความนำต่ำซึ่งเปรียบเสมือนสถานะปิดของตัวอุปกรณ์ที่ค่อย ๆ มีค่ากระแสเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อค่าแรงดันเข้าใกล้แรงดันขีดเริ่มหรือแรงดันในการเขียนที่ประมาณ +2 โวลต์ สถานะดังกล่าวในชั้นอลูมินัมจะเริ่มลดลงและเต็มในที่สุด ความนำในตัวอุปกรณ์จึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเปรียบเสมือนสถานะเปิดของตัวอุปกรณ์ และเมื่อป้อนแรงดันลบให้กับตัวอุปกรณ์อิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้จะถูกปลดปล่อยกลับเข้าไปยังชั้นของซิงค์ซีลีไนน์ และเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะเปิดกลับไปสู่สถานะปิด



รูปที่ 4.24 กลไกการนำแบบเทอร์โมอิเล็กทริกในสถานะปิดของโครงสร้าง $Alq_3(100 \text{ nm})/Al(5 \text{ nm})/ZnSe(100 \text{ nm})$

เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการนำกระแสทั้งในสถานะเปิดและสถานะปิดของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบโดยรูปแบบทางทฤษฎี โดยรูปแบบที่สอดคล้องกับสมบัติของค่ากระแสและแรงดัน คือ การนำกระแสแบบเทอร์โมอิเล็กทริกและการนำกระแสแบบโอดัมมิก โดยในช่วง 0 ถึง +2 โวลต์ในสถานะปิดรูปแบบที่ตรงที่สุดคือการนำกระแสแบบเทอร์โมอิเล็กทริก [71] โดยจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\ln I$ กับ $V^{1/2}$ แสดงดังรูปที่ 4.24 โดยทั่วไปการฉีดกระแสแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมไอออนจะถูกควบคุมโดยพาหะจากขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงขึ้นจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถข้ามผ่านกำแพงศักย์ไปได้และเกิดกระแสไหลโดยที่ไม่ขึ้นกับค่าความต่างศักย์ [36] และหลังจากที่ตัวอุปกรณ์เปลี่ยนไปเป็นสถานะเปิดค่าความชันทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ คือ 0.99 ดังนั้นกลไกการนำกระแสของสถานะเปิดหลังจากที่สถานะดักจับเต็มจะแสดงพฤติกรรมการนำกระแสแบบโอห์มมิก [71] แสดงดังรูปที่ 4.25(ก) และ 4.25(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำกระแสแบบโอห์มมิกอาจจะเกี่ยวข้องกับสถานะการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในชั้นของอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์ สำหรับข้อมูลการพิตจากรูปแบบทางทฤษฎีสามารถพิจารณาจากค่า R^2 ที่ความหนาของชั้นซิงค์ซลีไนด์แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 4.9



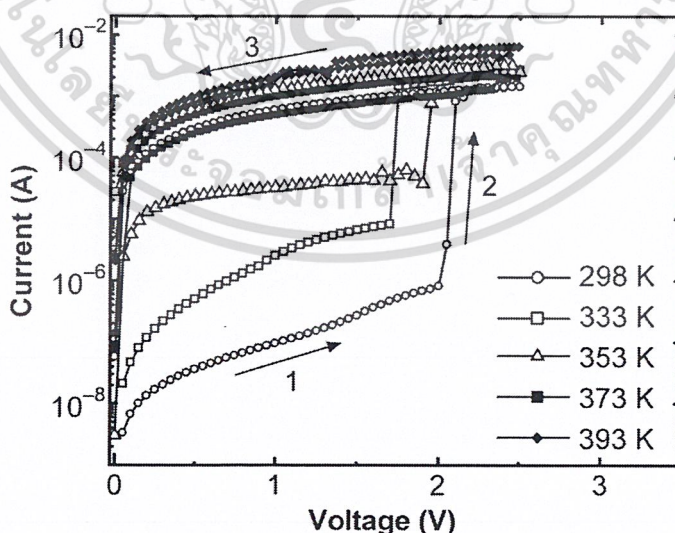
รูปที่ 4.25 กลไกการนำแบบโอห์มมิกที่ (ก) สถานะเปิด และ (ข) ฝั่งแรงดันลบ ของโครงสร้าง $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) จากการฟิตข้อมูลเข้ากับสมการของกระแสและแรงดัน ที่ความหนาของชั้นซิงค์ซีลีไนด์แตกต่างกัน

กลไกการนำกระแส	สถานะปิด			สถานะเปิด		
	R^2			R^2		
	50 nm	100 nm	150 nm	50 nm	100 nm	150 nm
Thermionic emission: $\ln(I) \sim V^{1/2}$	0.977	0.984	0.975	0.958	0.967	0.972
Pool-Frenkel emission: $\ln(I/V) \sim V^{1/2}$	0.790	0.927	0.889	0.880	0.022	0.869
Fowler-Nordheim tunneling: $\ln(I/V^2) \sim 1/V$	0.838	0.892	0.820	0.816	0.842	0.879
Ohmic conduction: $\log(I) \sim \log(V)$	0.886	0.865	0.815	0.999	0.999	0.999

4.3.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

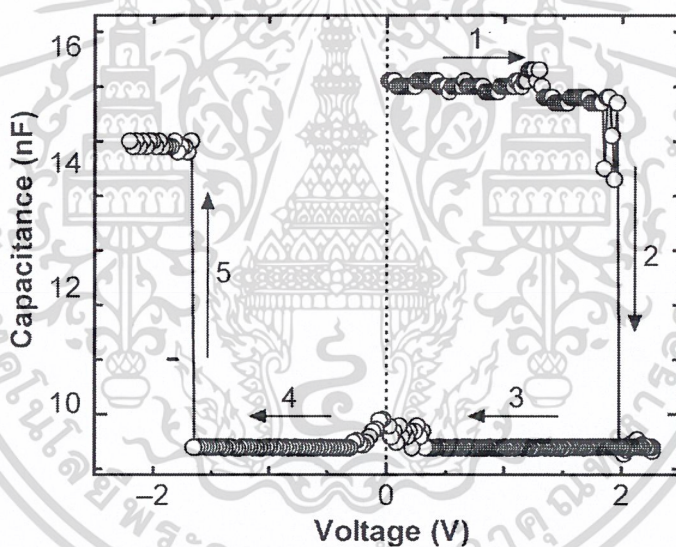


รูปที่ 4.26 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้าง $Alq_3(100 \text{ nm})/Al(5 \text{ nm})/ZnSe(100 \text{ nm})$ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น จึงทำการตรวจสอบสมบัติเฉพาะทางกระแสและแรงดัน ในโครงสร้าง $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$ ที่อุณหภูมิแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.26 ซึ่งพบว่าค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดของอุปกรณ์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อสถานะปิดอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่สถานะเปิดจะมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งในความเป็นจริงแล้วอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ดีควรจะได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม การที่อุณหภูมิมิผลต่อสถานะปิดทำให้สามารถยืนยันได้ถึงกลไกการนำแบบเทอร์โมอิเล็กทริกิมิตชันที่สถานะปิดนั่นเอง ซึ่งเป็นผลมาจาก ประจุปลดปล่อยได้เพิ่มขึ้นบริเวณเหนือกำแพงศักย์เนื่องจากความร้อน ในกรณีที่กำแพงศักย์ไม่สูงมาก [71, 36]

4.3.4 ผลการตรวจสอบสมบัติความจุทางไฟฟ้าและแรงดันของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$



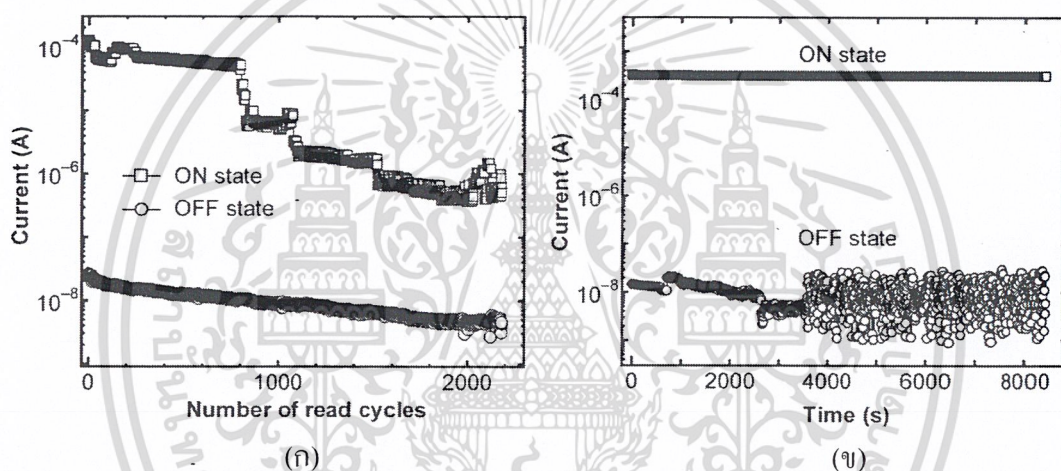
รูปที่ 4.27 ค่าความจุทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้าง $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$

รูปที่ 4.27 แสดงสมบัติของความจุทางไฟฟ้าและแรงดัน (C-V) ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ โดยแอมพลิจูดของสัญญาณที่ทดสอบคือ 50 mV ที่ความถี่ 100 kHz ทั้งฝั่งแรงดันบวกและแรงดันลบ โดยในกราฟเส้นที่ 1 ตัวอุปกรณ์จะมีค่าความจุทางไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเป็นช่วงแรงดันที่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มหรือก็คือสถานะปิดนั่นเอง แต่เมื่อแรงดันเข้าใกล้ +2 โวลต์ ค่าความจุทางไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว (กราฟเส้นที่ 2) และรักษาค่าความจุแบบคงที่เอาไว้ (กราฟเส้นที่ 3 และ 4) และเมื่อให้แรงดันลบจนถึง -1.7 โวลต์ ค่าความจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็น 15 nF (กราฟเส้นที่ 5) และเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของค่ากระแสและความต่างศักย์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุทางไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์มีความสอดคล้องกัน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความจุทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการกักและปลดปล่อยประจุในชั้นของอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์นั่นเอง เนื่องจากเมื่ออุปกรณ์เปลี่ยนเป็นสถานะเปิดจะเป็นช่วงที่สถานะคักจับในชั้นของโลหะอลูมิเนียมเต็ม จึงทำให้มีค่าความนำสูง และส่งผลให้ความจุทางไฟฟ้าลดลง และจากผลการทดสอบนี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi และคณะ [85]

4.3.5 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$



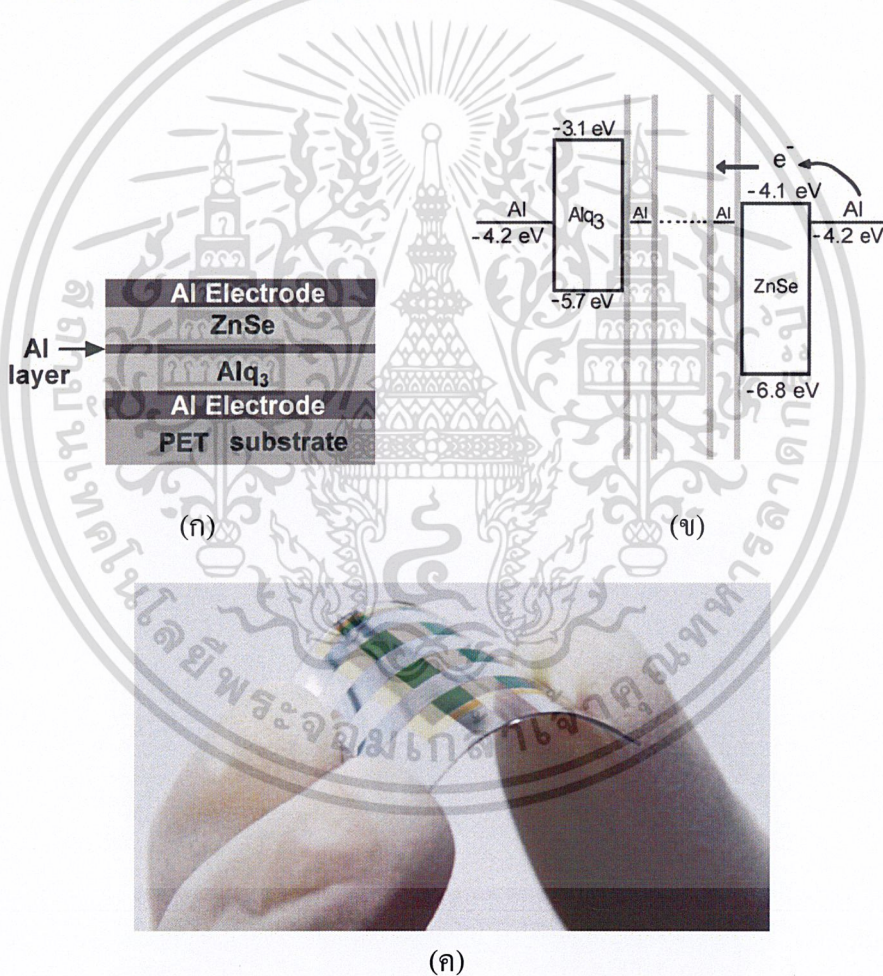
รูปที่ 4.28 (ก) เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน และ (ข) การอ่านข้อมูลแบบต่อเนื่องหลังการเปลี่ยนสถานะ

จากที่ได้ทราบกันไปแล้วว่าหนึ่งในสิ่งจำเป็นสำหรับการทดสอบของอุปกรณ์หน่วยความจำคือการทดสอบเสถียรภาพ โดยในรูปที่ 4.28(ก) แสดงค่ากระแสที่สถานะเปิดและสถานะปิดที่ได้จากจำนวนรอบในการเปลี่ยนสถานะหรือก็คือความสามารถในการทำซ้ำของตัวอุปกรณ์ จากแรงดันในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน ที่ +2, +1, -2, +1 โวลต์ตามลำดับ ซึ่งความสามารถในการเปลี่ยนสถานะการนำทางไฟฟ้าสามารถตรวจสอบได้มากกว่า 2,000 ครั้ง โดยที่สถานะเปิดค่ากระแสจะลดลงอย่างช้า ๆ ในช่วงการเปลี่ยนสถานะช่วงแรกประมาณ 800 ครั้ง ซึ่งมีค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดอยู่ที่ประมาณ 10^4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพในการทำซ้ำที่ดี แต่อย่างไรก็ตามจะพบการกระจายของค่ากระแสและความไม่แน่นอนที่สถานะเปิดหลังจากที่ทำการอ่าน-เขียนไปแล้ว 800 ครั้ง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความไม่เสถียรของวัสดุหรือบริเวณรอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบความสามารถในการเก็บรักษาข้อมูลของตัวอุปกรณ์ ทดสอบโดยการอ่านข้อมูลแบบต่อเนื่องที่แรงดัน +1 โวลต์ หลังจากที่มีการเปลี่ยนสถานะ โดยในแต่ละสถานะได้ทำการเก็บค่ากระแสเป็นเวลานานกว่า 8,000 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 4.28(ข) โดยที่สถานะปิดตัวอุปกรณ์สามารถรักษาค่าความนำต่ำไว้และไม่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสถานะเปิดและเป็นเช่นเดียวกันเมื่อทำการทดสอบที่สถานะเปิด พบว่าตลอดช่วงการทดสอบตัวอุปกรณ์แสดงการเก็บรักษาสถานะหลังการเปลี่ยนได้เป็นอย่างดี

4.4 อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น Alq₃/Al/ZnSe บนฐานรองรับ PET ที่สามารถโค้งงอได้



รูปที่ 4.29 (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับพลาสติก PET (ข) ระดับพลังงานของอุปกรณ์ และ (ค) ภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่สามารถโค้งงอได้

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น ที่ทำการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ ชั้นโลหะอลูมิเนียม และชั้นสารอินทรีย์ ซิงค์ซีสไนด์จากหัวข้อที่ผ่านมา โครงสร้างที่เหมาะสมคือ Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

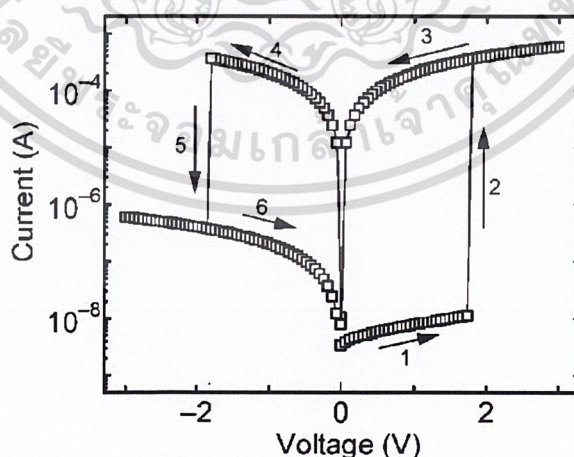
ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ลงบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ โดยฐานรองรับที่ใช้คือพลาสติก PET โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ แผนภาพระดับพลังงาน และภาพถ่ายของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.29

4.4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับ PET ในลักษณะแบนราบ

รูปที่ 4.30(ก) แสดงการทดสอบค่ากระแสและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ในลักษณะแบนราบ (flat) ก่อนที่จะมีการโค้งงอ (fresh device) โดยระยะ d คือระยะห่างระหว่างขอบของอุปกรณ์ รูปที่ 4.30(ข) เป็นการแสดงสมบัติเฉพาะของค่ากระแสและความต่างศักย์ของโครงสร้าง $Alq_3(100\text{ nm})/Al(5\text{ nm})/ZnSe(100\text{ nm})$ บนฐานรองรับ PET จากรูปพบว่าพฤติกรรมของอุปกรณ์ที่แสดงออกมาให้เห็นมีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างที่ทำการสร้างบนฐานรองรับกระจก โดยค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดมากกว่า 10^4



(ก)



(ข)

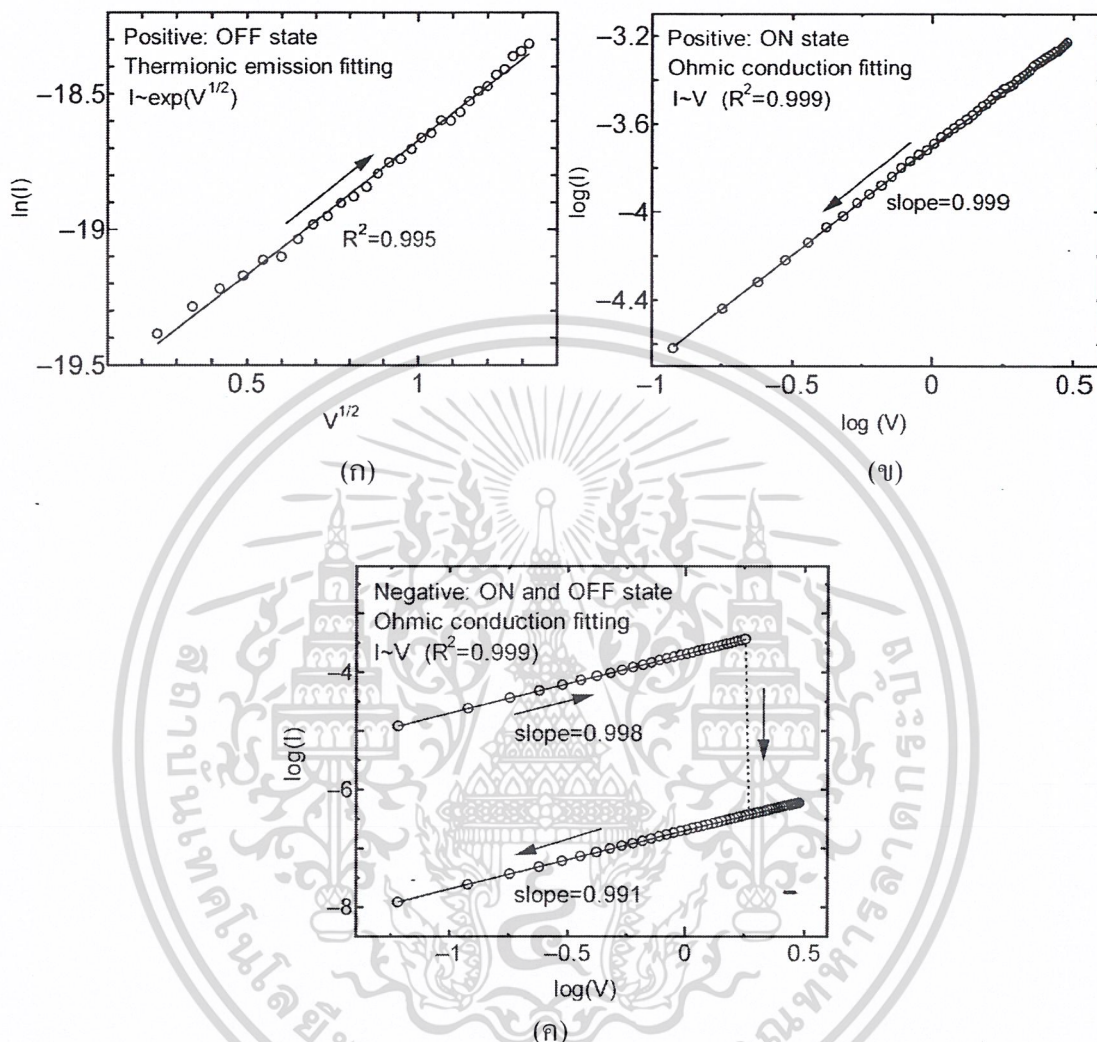
รูปที่ 4.30 (ก) การทดสอบค่ากระแสและความต่างศักย์ในลักษณะแบนราบ, d =ระยะห่างจากขอบถึงขอบของอุปกรณ์ และ (ข) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะ

ในโครงสร้างแบบสามชั้นบนฐานรองรับ PET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการวิเคราะห์กลไกการทำงานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน
โครงสร้างแบบสามชั้น Alq₃/Al/ZnSe บนฐานรองรับ PET ในลักษณะแบนราบ



รูปที่ 4.31 กลไกการนำของโครงสร้าง Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) บนฐานรองรับ PET (ก) แบบเทอร์โมไอออนิกอิมิตชันที่สถานะปิด (ข) การนำแบบโอห์มมิกที่สถานะเปิด และ (ค) การนำแบบโอห์มมิกฝั่งแรงดันลบ

เพื่อยืนยันถึงกลไกการนำกระแสทั้งในสถานะเปิดและสถานะปิดของตัวอุปกรณ์ ดังนั้น กลไกการนำกระแสของอุปกรณ์ในโครงสร้าง Alq₃/Al/ZnSe บนฐานรองรับ PET จึงได้ทำการทดสอบโดยรูปแบบทางทฤษฎีเช่นเดียวกับบนฐานรองรับกระจก โดยรูปแบบที่สอดคล้องกับสมบัติของค่ากระแสและความต่างศักย์ยังคงเป็นการนำกระแสแบบเทอร์โมไอออนิกอิมิตชันสำหรับสถานะปิด และหลังจากที่เปลี่ยนเป็นสถานะเปิดแล้วยังคงเป็นการนำกระแสแบบโอห์มมิก [71] แสดงดังรูปที่ 4.31 ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับโครงสร้างบนฐานรองรับกระจก

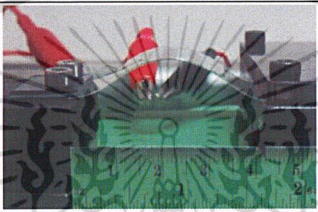
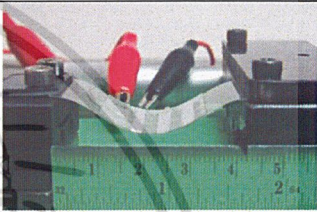

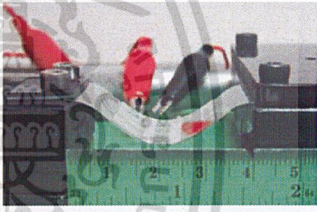

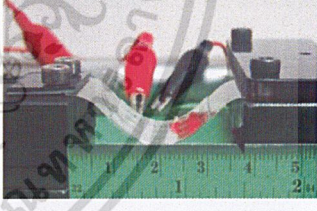
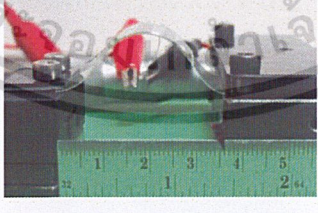
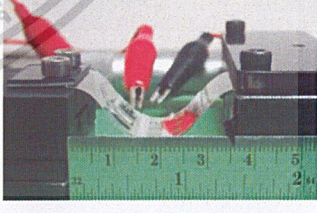
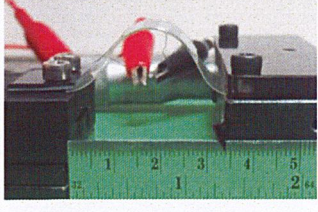
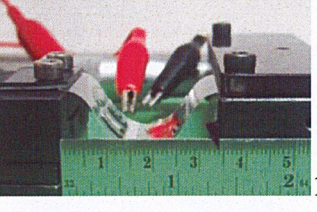
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากทางราชการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ บนฐานรองรับ PET ภายใต้การโค้งงอ

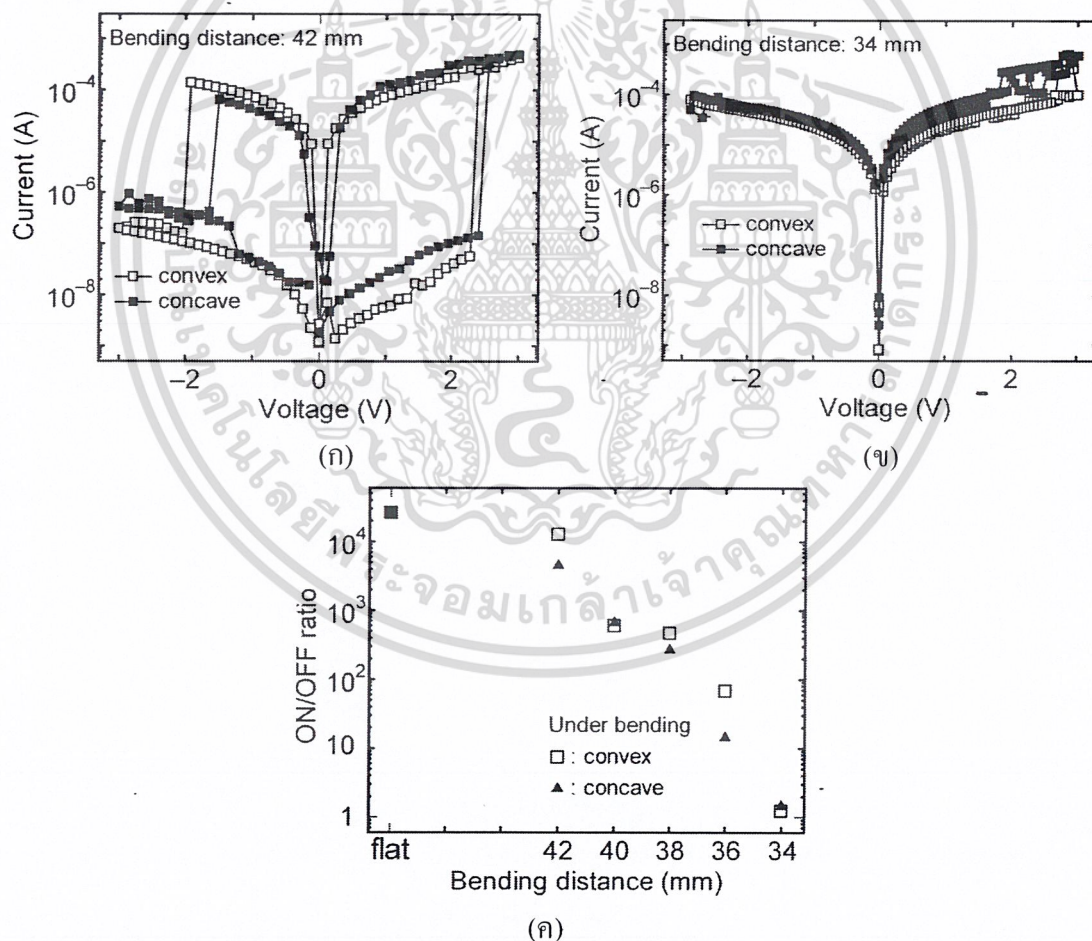
เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะที่สามารถโค้งงอได้ จึงได้ทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกัน โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ขั้นตอนการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกัน จากระยะ $d=42$ mm ถึง $d=34$ mm

d (ระยะจากขอบถึงขอบ)	นูน (convex)	เว้า (concave)
42 mm	 1	 2
40 mm	 3	 4
38 mm	 5	 6
36 mm	 7	 8
34 mm	 9	 10

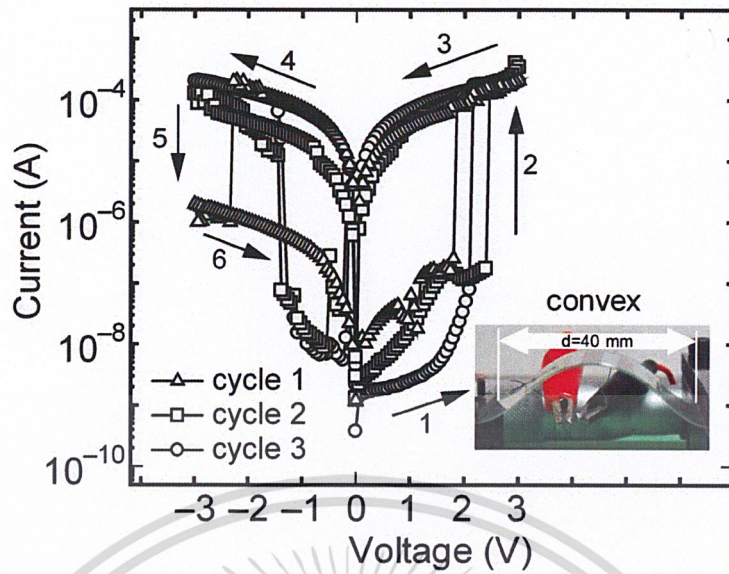
จากตารางที่ 4.10 ทำการทดสอบโดยการโค้งฐานรองรับ จากนั้นทำการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์แบบต่อเนื่องจากระยะ $d=45$ mm [ลักษณะแบนราบ ดังรูปที่ 4.30(ก)] ไปเป็นระยะเอกสารฉบับนี้ยังไม่มีผลการศึกษาเรื่องนี้ โดยผู้เขียนได้ไปแจ้งไปยังนักวิจัยที่ดูแลเรื่องนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$d=42, 40, 38, 36$ และ 34 mm ตามลำดับ โดยในแต่ละระยะการโค้งงอจะทำการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ทั้งแบบนูนและแบบเว้าโดยมีลำดับการวัดตามลำดับ 1-10 โดยที่ระยะ $d=45$ mm จะนิยามว่าเป็นระยะการโค้งงอที่ต่ำที่สุด ในขณะที่ระยะ d ลดลงจะนิยามว่าเป็นการเพิ่มระยะการโค้งงอ โดยในที่นี้จะแสดงผลการตรวจวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ที่ระยะการโค้งงอ $d=42$ mm และ 34 mm แสดงดังรูปที่ 4.32(ก) และ (ข) ตามลำดับ ในขณะที่ค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดของอุปกรณ์ที่แรงดัน $+1$ V สำหรับแต่ละการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.32(ค) พบว่าจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจากการเพิ่มระยะการโค้งงอของอุปกรณ์ โดยที่ระยะ $d=34$ mm อุปกรณ์ไม่สามารถแสดงสมบัติแบบสองสถานะให้เห็น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการโค้งงอของฐานรองรับมีผลต่อความสามารถของอุปกรณ์ โดยน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากความเครียดเชิงกลที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มจากการโค้งงอ โดยเฉพาะคุณสมบัติของขั้วโลหะอลูมิเนียมที่มีความแข็งแรงแต่เปราะ จะเกิดการแตกออกและส่งผลให้เกิดการลัดวงจรของตัวอุปกรณ์

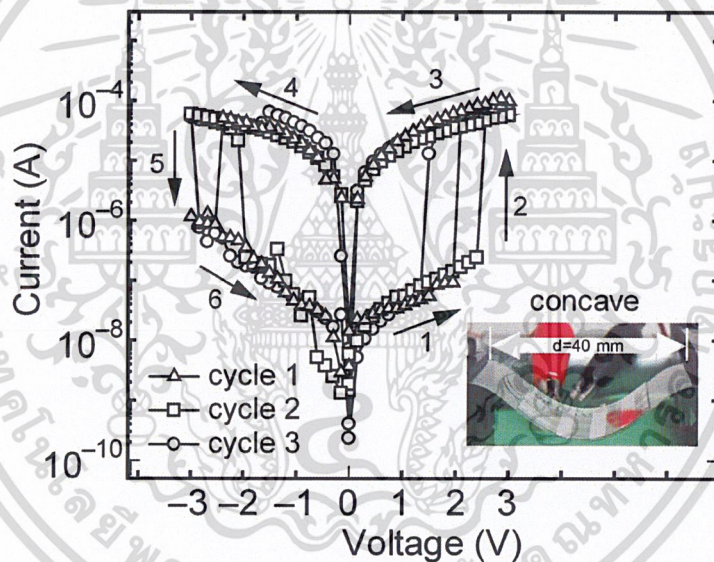


รูปที่ 4.32 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นบนฐานรองรับ PET ทดสอบโดยการงอแบบนูนและเว้า (ก) $d=42$ mm, (ข) $d=34$ mm และ (ค) ค่าอัตราส่วนกระแสที่การโค้งงอแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



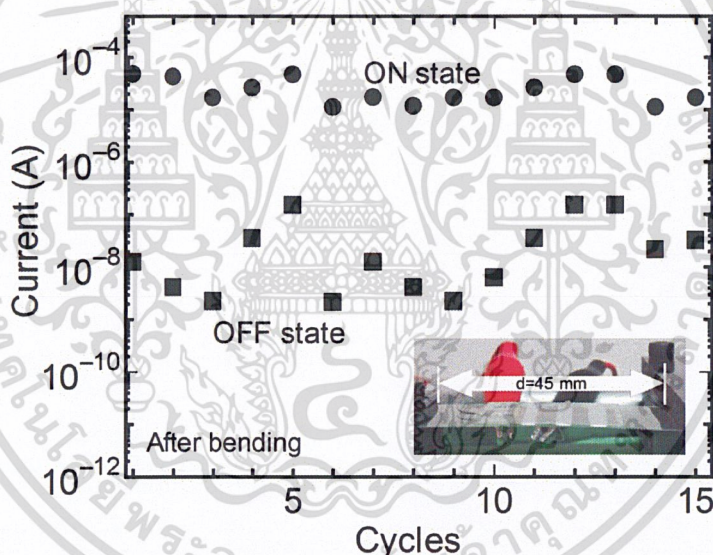
(ข)

รูปที่ 4.33 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นบนฐานรองรับ PET (ก) $d=40$ mm แบบโค้ง และ (ข) $d=40$ mm แบบเว้า

จากผลการทดสอบความสามารถในการโค้งงอของฐานรองรับที่ระยะแตกต่างกันทำให้ทราบความสามารถโดยคร่าวของระยะในการโค้งงอ ดังนั้นในการทดสอบขั้นต่อไปจะเป็นการทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของตัวอุปกรณ์ภายหลังการโค้งงอ โดยจะทำการทดสอบจากอุปกรณ์ตัวใหม่ที่ยังไม่มีการโค้งงอมาก่อน โดยนำมาทำการทดสอบที่ระยะ $d=40$ mm ทั้งแบบนูนและเว้าเพื่อหาค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ แสดงดังรูปที่ 4.33(ก) และ (ข) ตามลำดับ (พิจารณาจากรูปที่ 4.32(ค) โดยระยะ $d=40$ mm เป็นระยะที่อยู่ระหว่างช่วงการทดสอบการโค้งงอ ซึ่งแสดงผลกระทบจากการโค้งงออย่างเห็นได้ชัดและอุปกรณ์ยังคงให้อัตราส่วนกระแสที่สถานะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปิดต่อสถานะปิดที่สูง) พบว่าอุปกรณ์ตัวใหม่ที่ทำการศึกษาภายใต้การโค้งงอยังคงแสดงสมบัติแบบสองสถานะได้อย่างชัดเจนโดยมีค่าแรงดันในการเปลี่ยนเป็นสถานะเปิดประมาณ +2.5 โวลต์ และแรงดันในการเปลี่ยนเป็นสถานะปิดที่ประมาณ -2.5 โวลต์ อย่างไรก็ตามลักษณะของกระแสและแรงดันยังคงแสดงความไม่เสถียรของสถานะอาจจะมาจากความไม่เสถียรของขั้วโลหะที่เกิดจากความเครียดเชิงกลระหว่างการโค้งงอ จากค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจะสามารถกำหนดแรงดันในการทดสอบความสามารถในการ ลบ-อ่าน-เขียน-อ่าน ได้เป็น -3, +1, +3 และ +1 โวลต์ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ในแต่ละครั้งมีการกระจายอย่างเห็นได้ชัดแสดงดังรูปที่ 4.34 น่าจะมีสาเหตุมาจากการเขียน (จับพาหะ) และลบ (ปลดปล่อยพาหะ) ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากขั้วโลหะที่เกิดการโค้งงอ แต่อย่างไรก็ตามอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดในแต่ละรอบของการเปลี่ยนสถานะยังคงแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

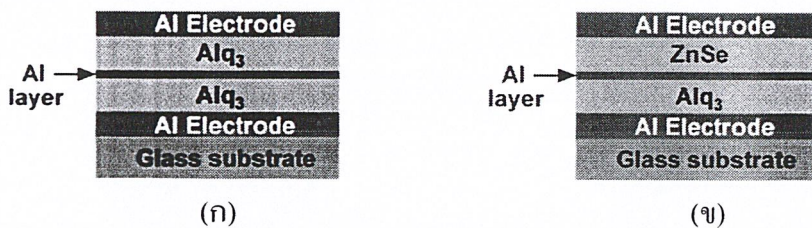


รูปที่ 4.34 เสถียรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการ เขียน-อ่าน-ลบ-อ่าน ภายหลังจากการโค้งงอ

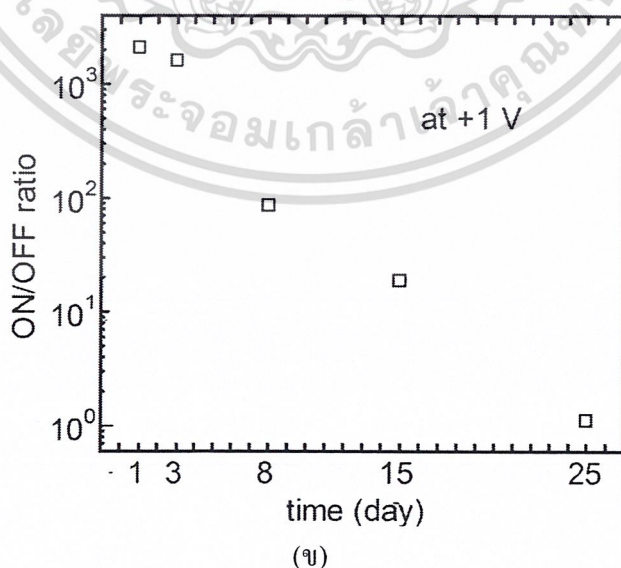
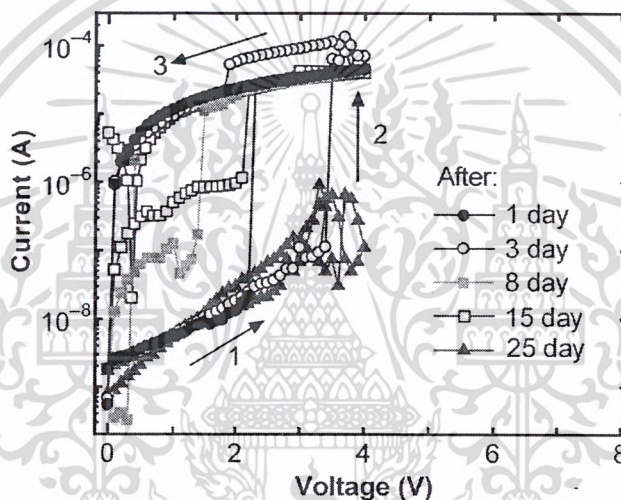
4.5 ผลการทดสอบอายุการใช้งานของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะของโครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ กับ $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ บนฐานรองรับกระจก

จากข้อดีของสารอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ที่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมและความชื้นในอากาศได้ดี ในขณะที่สารอินทรีย์ Alq_3 ได้ประสบปัญหาเป็นอย่างมากจากการเสื่อมประสิทธิภาพในเวลาอันรวดเร็วดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการทดสอบเบื้องต้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพในด้านของอายุการใช้งาน โดยเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ กับโครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ โดยโครงสร้างของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.35 ซึ่งโครงสร้างที่ได้ทำการรื้อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบจะเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/Alq₃(100 nm) และ Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm)

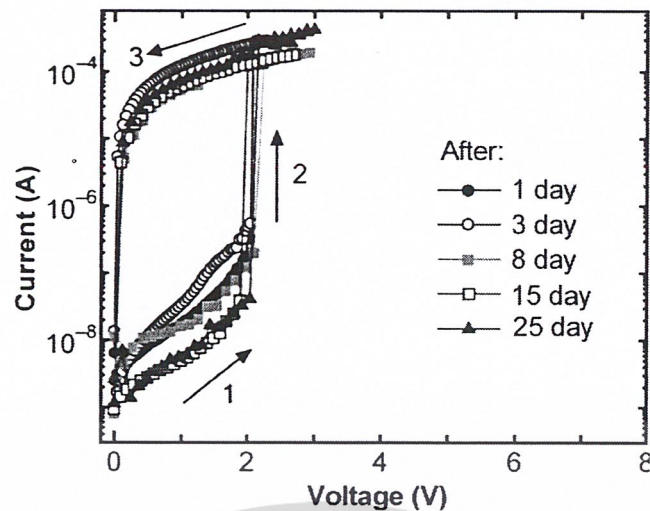


รูปที่ 4.35 โครงสร้างของอุปกรณ์แบบสามชั้นบนฐานรองรับกระจกโดย (ก) มี Alq₃ อยู่ด้านบน และ (ข) มี ZnSe อยู่ด้านบน

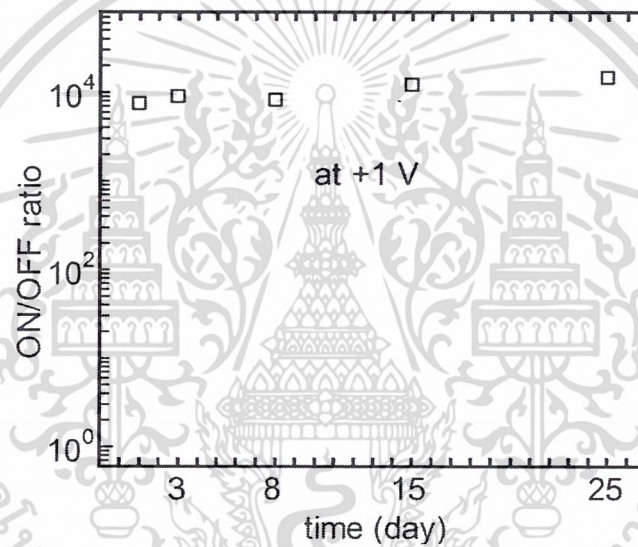


รูปที่ 4.36 โครงสร้าง Alq₃/Al/Alq₃ (ก) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง และ (ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

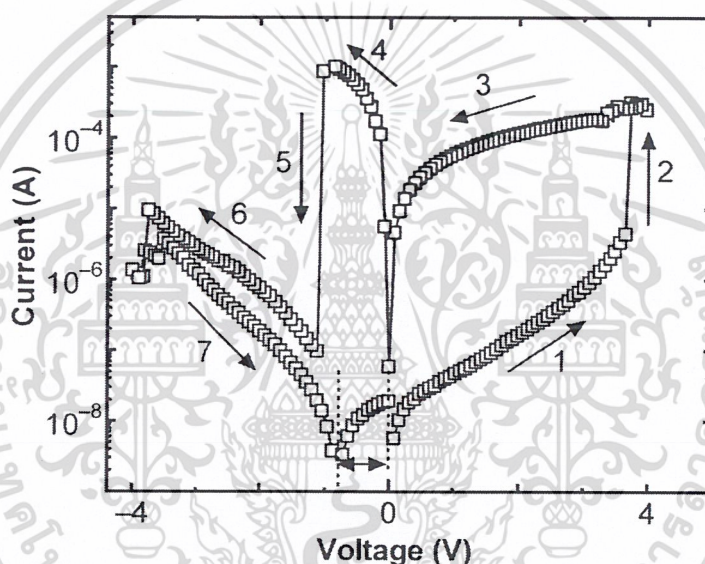


(ข)

รูปที่ 4.37 โครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ (ก) ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง และ (ข) การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนกระแส ON/OFF

รูปที่ 4.36(ก) แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์ $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ หลังจากเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการห่อหุ้ม และในรูปที่ 4.36(ข) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดของค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดหลังจากระยะเวลาผ่านไป 8 วัน และอุปกรณ์ในโครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ ไม่สามารถแสดงสมบัติแบบสองสถานะให้เห็นหลังจากเวลาผ่านไป 25 วัน (~600 ชม.) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วนั้น Alq_3 เป็นหนึ่งในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมากในการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ เช่น OLEDs, OBDs, quantum well, และอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางก็ยังไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาที่เกิดจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ Alq_3 ได้ ซึ่งฟิล์มบางของ Alq_3 จะมีความไวต่อสภาพแวดล้อม ในสภาพบรรยากาศปกติเป็นอย่างมากจึงทำให้คุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง Alq_3 ลดลงในเวลาไม่กี่ชั่วโมงหากไม่ได้รับการห่อหุ้มที่ดี โดย Baldacchini และคณะ [86] ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการเสื่อมประสิทธิภาพของฟิล์มบาง Alq_3 พบว่ามีอายุการใช้งานอยู่ในช่วง 600-700 ชม. เมื่อไม่มีการห่อหุ้มที่ดี ในขณะที่อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ อุปกรณ์ยังคงแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้อย่างชัดเจนในระยะเวลาการทดสอบที่เท่ากันแสดงดังรูปที่ 4.37(ก) และ 4.37(ข) สำหรับในโครงสร้างของ $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ นั้น ชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ที่อยู่ด้านบนจะทำหน้าที่เป็นชั้นปกป้องให้กับชั้นของ Alq_3/Al และส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.38 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องนานกว่า 1 ปี

นอกจากนี้สิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งคือ อุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานานกว่า 1 ปี ยังคงมีอุปกรณ์บางตัวสามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะออกมาให้เห็น แสดงดังรูปที่ 4.38 โดยจากรูปที่ 4.38 จะพบว่ามีกระแสดำเนินตำแหน่งของกระแสต่ำสุดมาทางด้านแรงดันลบน่าจะเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของการเกิดสเปซชาร์จภายในอุปกรณ์ ขณะที่อุปกรณ์ในโครงสร้าง $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ นั้น อุปกรณ์ทุกตัวที่ทำการทดสอบไม่สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะออกมาให้เห็นได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าโครงสร้างแบบสามชั้น $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ สามารถนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำได้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ อุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวจากสารอินทรีย์, โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์ และ โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างแบบชั้นเดียวจากสารอินทรีย์

สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบชั้นเดียวจากสารอินทรีย์ ที่มีโครงสร้างเป็น ITO/CuPc/Al จากการทดลองพบว่า

- สมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะจะขึ้นอยู่กับอัตรากระแสหายสารอินทรีย์คอปเปอร์-พทาโลไซยาไนน์ โดยตัวอุปกรณ์สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะที่แรงดันการอ่าน +3 โวลต์ และมีค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดอยู่ที่ประมาณ 100

- จากการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่อัตรากระแสหายต่างกัน พบว่าความเป็นผลึกและขนาดของเม็ดผลึกจะลดลง ในขณะที่ความเครียดและความหนาแน่นของอะตอมที่ขาดหายไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตรากระแสหายเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนที่ของพาหะจะเกิดเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการจับพาหะโดยขั้วบกร่องของผลึกที่เกิดในฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์

- เพื่อที่จะเข้าใจถึงพฤติกรรมการนำกระแสของอุปกรณ์ จึงสามารถอธิบายได้ว่าเกิดจากกระบวนการ SCLC จากการดักจับพาหะของขั้วบกร่องในชั้นฟิล์ม โดยระดับพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการดักจับพาหะในขั้วบกร่องของผลึกในชั้นฟิล์มได้ทำการวิเคราะห์โดยสมการของอาร์เรเนียส

- นอกจากนี้ความสามารถในการอ่านและเขียนซ้ำซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของอุปกรณ์หน่วยความจำยังได้รับการทดสอบมากกว่า 1,000 ครั้ง

2. โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์

สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะในโครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์ ที่มีโครงสร้างเป็น Alq₃/Al/Alq₃ จากการทดลองพบว่า

- สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้เป็นอย่างดี โดยความหนาของชั้นสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลต่อแรงดันขีดเริ่มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ากระแสที่สถานะเปิดจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จากความหนาของชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ ที่เหมาะสมจึงได้ทำการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นอลูมิเนียมชั้นกลาง พบว่าการมีอยู่ของโลหะอลูมิเนียมและความหนาที่เปลี่ยนแปลงมีผลโดยตรงกับสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะ
- โดยความหนาที่เหมาะสมของชั้นอลูมิเนียมและสารอินทรีย์ Alq₃ ในโครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์ คือ Alq₃ (100 nm)/Al (5 nm)/Alq₃ (100 nm) และหลังจากนั้นได้นำไปสู่การพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์

3. โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์

สำหรับอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสองสถานะใน โครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ ที่มีโครงสร้างเป็น Alq₃/Al/ZnSe จากการทดลองพบว่า

- อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้ และมีแรงดันการอ่านอยู่ที่ +1 โวลต์ โดยมีค่าอัตราส่วนกระแสที่สถานะเปิดต่อสถานะปิดมากกว่า 10^4 อีกทั้งยังแสดงความสามารถในการอ่านและเขียนซ้ำได้มากกว่า 2,000 รอบ
- สำหรับพฤติกรรมการนำกระแสได้ทำการวิเคราะห์จากรูปแบบทางทฤษฎี โดยกลไกการนำที่สถานะปิดรูปแบบที่สอดคล้องมากที่สุดสามารถอธิบายได้จากกระบวนการนำกระแสแบบเทอร์โมไอออไนซิมชัน ซึ่งในส่วนของสถานะเปิดจะสอดคล้องกับการนำกระแสแบบไอฮ์มมิกที่ขึ้นกับสถานะดักจับพาหะในชั้นของโลหะอลูมิเนียม
- นอกจากนี้สมบัติของสารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์อีกประการคือ อิเล็กตรอนสามารถฉีดจากขั้วไฟฟ้าได้โดยง่ายเนื่องจากระดับพลังงานการนำของซิงค์ซีลีไนด์อยู่ใกล้กับฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปยังชั้นของอลูมิเนียมนาโนคลัสเตอร์ชั้นกลางและเกิดการดักจับได้ง่าย

หลังจากนั้นจึงได้ทำการพัฒนาโครงสร้างแบบสามชั้นจากสารอินทรีย์-สารอนินทรีย์ลงบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ โดยฐานรองรับที่ใช้คือพลาสติก PET จากผลการทดลองพบว่า

- อุปกรณ์สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้อย่างดีเมื่อมีการทดสอบในสภาพแบนราบโดยมีระยะจากขอบถึงขอบ (d) ของตัวอุปกรณ์อยู่ที่ระยะ 45 mm ในขณะที่มีความสามารถในการโค้งงอมากที่สุดของอุปกรณ์อยู่ที่ระยะ $d=34$ mm ซึ่งเป็นระยะที่ขั้วโลหะเริ่มเกิดการแตกออกส่งผลให้เกิดการลัดวงจรเป็นผลทำให้ไม่สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสองสถานะได้ โดยการแตกออกของขั้วโลหะอลูมิเนียมเป็นผลมาจากความเครียดเชิงกลที่เกิดขึ้นจากการโค้งงอ โดยทั่วไปความสามารถในการโค้งงอมักจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ทำงาน โดยในงานวิจัยนี้มีขนาดพื้นที่ทำงานอยู่ที่ 9 mm^2 ซึ่งจะได้รับผลกระทบที่เกิดจากความเครียดระหว่างการโค้งงอที่สูงมาก แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบภายหลังการโค้งงอที่ระยะ $d=40$ mm อุปกรณ์ยังคงแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติการอ่าน-เขียนซ้ำของสถานะเปิดและปิดได้ตลอดช่วงการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถที่จะพัฒนาไปสู่อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ในอนาคต

- นอกจากนี้ คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีซ์ซิงค์ซีลีไนด์ที่ทนต่อสภาพแวดล้อม อีกทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนและเคมีที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำอินทรีซ์ Alq_3 ทำให้อุปกรณ์ในโครงสร้างสามชั้น $Alq_3/Al/ZnSe$ ที่มีสารกึ่งตัวนำอินทรีซ์ซิงค์ซีลีไนด์อยู่ด้านบนจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีซ์ซิงค์ซีลีไนด์ด้านบนจะทำหน้าที่เป็นชั้นห่อหุ้มให้กับอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทรงพล กาญจนชูชัย. 2550. นาโนอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] Po-Tsung Lee, Tzu-Yueh Chang, Szu-Yuan Chen, “Tuning of the electrical characteristics of organic bistable devices by varying the deposition rate of Alq₃ thin film”, **Organic Electronics**, Vol. 9, 2008, pp. 916-920.
- [3] V. S. Reddy, S. Karak, S. K. Ray, A. Dhar, “Carrier transport mechanism in aluminum nanoparticle embedded AlQ₃ structures for organic bistable memory devices”, **Organic Electronics**, Vol. 10, 2009, pp. 138-144.
- [4] M.H. Tang, Z.Q. Zeng, J.C. Li, Z.P. Wang, X.L. Xu, G.Y. Wang, L.B. Zhang, S.B. Yang, Y.G. Xiao, B. Jiang, “Resistive switching behavior of La-doped ZnO films for nonvolatile memory applications”, **Solid-State Electronics**, Vol. 63, 2011, pp. 100-104.
- [5] M. Colle, M. Buchel, D. M. de Leeuw, “Switching and filamentary conduction in non-volatile organic memories”, **Organic Electronics**, Vol. 7, 2006, pp. 305-312.
- [6] S. J. Lee, J.R. Koo, S. J. Kwon, Y. K. Kim, “Organic memory cells based on the switching by nanoparticles containing thin films”, **Microelectronic Engineering**, Vol. 85, 2008, pp. 2388-2392.
- [7] K. S. Yook, S. O. Jeon, C. W. Joo, J. Y. Lee, S.H. Kim, J. Jang, “Organic bistable memory device using MoO₃ nanocrystal as a charge trapping center”, **Organic Electronics**, Vol. 10, 2009, pp. 48-52.
- [8] A. J. Ikushima, T. Kanno, S. Yoshoda, A. Maeda, “Valence and conduction band edges of metal-phthalocyanines and carrier behavior”, **Thin Solid Films**, Vol. 273, 1996, pp. 35-38.
- [9] J. Y. Kim, A. J. Bard, “Organic donor/acceptor heterojunction photovoltaic devices based on zinc phthalocyanine and a liquid crystalline perylene diimide”, **Chemical Physics Letters**, Vol. 383, 2004, pp. 11-15.
- [10] F. Siviero, N. Coppede, A. Pallaoro, A.M. Taurino, T. Toccoli, P. Siciliano, S. Iannotta, “Hybrid n-TiO₂-CuPc gas sensors sensitive to reducing species, synthesized by cluster

- and supersonic beam deposition”, **Sensors and Actuators B**, Vol. 126, 2007, pp. 214-220.
- [11] S. Semthilarasu, Y. B. Hahnm, S. H. Lee, “Nano structure formation in vacuum evaporated zinc phthalocyanine (ZnPc) thin films”, **J. Mater. Sci. Mater. Electron.**, Vol. 19, 2008, pp. 482-486.
- [12] L. P. Ma, J. Liu, Y. Yang, “Organic electrical bistable devices and rewritable memory cells”, **Appl. Phy. Lett.**, vol. 80, April 2002, pp. 2997.
- [13] L. Ma, S. Pyo, J. Ouyang, Q. Xu and Y. Yang, “nonvolatile electrical bistability of organic/metal-nanocluster/organic system”, **Appl. Phy. Lett.**, Vol. 82, March 2003, pp. 1419.
- [14] 2005 International Technology Roadmap for Semiconductors. [Online]. Available : <http://public.itrs.net>
- [15] A. Beck, J. G. Bednorz, Ch. Gerber, C. Rossel, D. Widmer, “Reproducible switching effect in thin oxide films for memory applications”, **Appl. Phy. Lett.**, Vol. 77, July 2000, pp. 139.
- [16] T. Oyamada, H. Tanaka, K. Matsushige, H. Sasabe, C. Adachi, “Switching effect in Cu:TCNQ charge transfer-complex thin films by vacuum codeposition”, **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 83, 2003, pp. 1252.
- [17] J. Ouyang, C.-W. Chu, C. Szmanda, L. Ma, and Y. Yang, “Programmable polymer thin film and non-volatile memory device”, **Nature Mater.**, Vol. 3, 2004, pp. 918-922.
- [18] Q. D. Ling, Y. Song, S. J. Ding, C. X. Zhu, D. S. H. Chan, D. L. Kwong, E. T. Kang, and K. G. Neoh, “Non-Volatile Polymer Memory Device Based on a Novel Copolymer of N Vinylcarbazole and Eu-Complexed Vinylbenzoate”, **Adv. Mater.**, Vol. 17, 2005, pp. 455-459.
- [19] S. Paul, A. Kanwal, and M. Cuhowalla, “Memory effect in thin films of insulating polymer and C60 nanocomposites”, **Nanotechnology**, Vol. 17, 2005, pp. 145.
- [20] L. D. Bozano, B. W. Kean, M. Beinhoff, K. R. Carter, P. M. Rice, J. C. Scott, “Organic Materials and Thin-Film Structures for Cross-Point Memory Cells Based on Trapping in Metallic Nanoparticles”, **Adv. Funct. Mater.**, Vol. 15, 2005, pp. 1933-1939.
- [21] R. J. Tseng, J. Huang, J. Ouyang, R. B. Kaner, Y. Yang, “Polyaniline Nanofiber/Gold Nanoparticle Nonvolatile Memory”, **Nano Lett.**, Vol. 5, 2005, pp. 1077-1080.

- [22] L. D. Bozano, B. W. Kean, V. R. Deline, J. R. Salem, J. C. Scott, "Mechanism for bistability in organic memory elements", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 84, 2004, pp. 607.
- [23] J. Ouyang, C.-W. Chu, D. Sievers, Y. Yang, "Electric-field-induced charge transfer between gold nanoparticle and capping 2-naphthalenethiol and organic memory cells", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 86, 2005, pp. 123507.
- [24] A. K. Mahapatro, R. Agrawal, S. Ghosh, "Electric-field-induced conductance transition in 8-hydroxyquinoline aluminum (Alq₃)", **J. Appl. Phys.**, Vol. 96, 2004, pp. 3583.
- [25] D. Tondelier, K. Lmimouni, D. Vuillaume, "Metal/organic/metal bistable memory devices", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 85, 2004, pp. 5763.
- [26] Q. D. Ling, S. L. Lim, Y. Song, C. X. Zhu, D. S. H. Chan, E. T. Kang, K. G. Neoh, "Nonvolatile Polymer Memory Device Based on Bistable Electrical Switching in a Thin Film of Poly(N-vinylcarbazole) with Covalently Bonded C60", **Langmuir**, Vol. 23, 2007, pp. 312-319.
- [27] J. Chen, D. Ma, "Performance improvement by charge trapping of doping fluorescent dyes in organic memory devices", **J. Appl. Phys.**, Vol. 100, 2006, pp. 034512.
- [28] Q. D. Ling, D. J. Liaw, C. Zhu, D. S. H. Chan, E. T. Kang and K. G. Neoh, "Polymer electronic memories: Materials, devices and mechanisms", **Progress in Polymer Science**, Vol. 33, 2008, pp. 917-978.
- [29] Y. T. You, M. L. Wang, H. N. Xuxie, B. Wu, Z. Y. Sun and X. Y. Hou, "Conductance-dependent memory devices", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 97, December 2010, pp. 233301.
- [30] G. Liu, Q. D. Ling, E. Y. H. Teo, C. X. Zhu, D. S. H. Chan, K. G. Neoh and E. T. Kang, "Electrical Conductance Tuning and Bistable Switching in Poly(N-vinylcarbazole)-Carbon Nanotube Composite Films", **ACS NANO**, Vol. 3, 2009, pp. 1929-1937.
- [31] C. Wua, F. Li a, 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", **Organic Electronics**, Vol. 13, 2011, pp. 178-183.
- [32] V. S. Reddy, S. Karak, A. Dhar, "Multilevel conductance switching in organic memory devices based on AlQ₃ and Al/Al₂O₃ core-shell nanoparticles", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 94, 2009, pp. 173304.
- [33] E. H. Rhoderick, **Metal-Semiconductor Contacts**, Clarendon, Oxford, 1978.

- [34] F. Garnier, R. Hajlaoui, A. Yassar, P. Srivastava, "All-Polymer Field-Effect Transistor Realized by Printing Techniques", *Science*, Vol. 265, 1994, pp. 1684-1686.
- [35] [Online]. Available : http://gorgia.no-ip.com/phd/html/thesis/phd_html/node3.html
- [36] S. M. Sze, **Physics of Semiconductor Devices**, Third Edition, Wiley & Sons, New York, 2007.
- [37] V. L. Rideout, "A review of the theory, technology and applications of metal-semiconductor rectifiers", *Thin Solid Films*, Vol. 48, 1978, pp. 261-291.
- [38] D. Monro, "Hopping in Exponential Band Tails", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 54, 1985, pp. 146-149.
- [39] S. D. Baranovskii, T. Faber, F. Hensel and P. Thomas, "The applicability of the transport-energy concept to various disordered materials", *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 9, 1997, pp. 2699.
- [40] F. Gutman and L. E. Lyons, **Organic Semiconductors**, Wiley, New York, 1967.
- [41] S. D. Baranovskii, H. Cordes, F. Hensel, and G. Leising, "Charge-carrier transport in disordered organic solids", *Phys. Rev. B*, Vol. 62, 2001, pp. 7934-7938.
- [42] C. Schwarz, H. Bässler, I. Bauer, J. -M. Koenen, E. Preis, U. Scherf and A. Köhler, "Does Conjugation Help Exciton Dissociation? A Study on Poly(p-phenylene)s in Planar Heterojunctions with C60 or TNF", *Advanced Materials*, Vol. 24, 2012, pp. 922-925.
- [43] P. D. Townsend and R. H. Friend, "Photoexcitation in Durham-route polyacetylene: Self-localization and charge transport", *Phys. Rev. B*, Vol. 40, 1989, pp. 3112-3120.
- [44] สิริินทรา ชันชรรม. 2554. "ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ที่สามารถปรับสีได้", วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี, วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [45] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น [Online]. Available : http://physics.kku.ac.th/ac_cai/3_13Thai/3_13.html
- [46] S. Arrhenius, "Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren", *Z. Phys. Chem.*, Vol. 4, 1889, pp. 226-248.
- [47] C. T. Lee, L. Z. Yu, -H. C. Chen, "Memory bistable mechanisms of organic memory devices", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 97, 2010, pp. 043301.

- [48] Ivan V Markov, **Crystal growth for beginners**, World scientific publishing, Singapore, 1995.
- [49] B. Best. Lessons for Cryonics from Metallurgy and Ceramics, [Online]. Available : <http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html>
- [50] nanoScience Instruments, [Online]. Available : <http://www.nanoscience.com>
- [51] [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy
- [52] [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Braggs_Law.svg
- [53] [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Bragg's_law
- [54] S. Venkatachalam, D. Mangalaraj, Sa. K. Narayandass, “Characterization of vacuum-evaporated ZnSe thin films”, **Physica B**, Vol. 393, 2007, pp. 47-55.
- [55] A. R. Chourasia and D. R. Chopra., “Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry”, Texas A&M University-Commerce Department of Physics.
- [56] Evans Analytical Group, Specialist in materials characterization, [Online]. Available : http://www.eaglabs.com/training/tutorials/aes_theory_tutorial/process.php
- [57] Sence Kruanetr, MSU-CYBERCLASS, Mahasarakham University, [Online]. Available : http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass_uploads/libs/document/IR_2299.pdf
- [58] Dong Ick Son, Tae Whan Kim, et al., “Flexible Organic Bistable Devices Based on Graphene Embedded in an Insulating Poly(methyl methacrylate) Polymer Layer”, **Nano Lett.**, Vol. 10, 2010, pp. 2441-2447.
- [59] Dong Ick Son, Dong Hee Park, et al., “Bistable Organic Memory Device with Gold Nanoparticles Embedded in a Conducting Poly(N-vinylcarbazole) Colloids Hybrid”, **J. Phys. Chem. C**, Vol. 155, 2011, pp. 2341-2348.
- [60] Kurt J. Lesker Company, [Online]. Available : <http://www.lesker.com>
- [61] INFICON, Thin Film Deposition Controllers/QCM Measurement Instruments, [Online]. Available : <http://www.inficonthinfilmdeposition.com>
- [62] [Online]. Available : <http://www.home.agilent.com/agilent/home.jspx?&cc=TH&lc=eng>
- [63] [Online]. Available : http://www.bruker-axs.com/d8_advance.html?referrer=AZOMINING
- [64] [Online]. Available : <http://www.thermoscientific.com>
- [65] Satyajit Sahu, Amlan J. Pal, “Non-interacting write and read processes in organic memory devices”, **Organic Electronics**, Vol. 9, 2008, pp. 873-877.
- [66] Z. Bao, A.J. Lovinger and A. Dodabalapur, “Organic field-effect transistors with high mobility based on copper phthalocyanine”, **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 69, 1996, pp. 3066.

- [67] G.B. Williamson and R. C. Smallman, “Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum”, **Philos. Mag.**, Vol. 1, 1956, pp. 34-46.
- [68] F. A. Hamm and E. Van Norman, “Transformations in Organic Pigments”, **J. Appl. Phys.**, Vol. 19, 1948, pp. 1097.
- [69] J. Lin, D. Ma. “The morphology control of pentacene for write-once-read-many-times memory devices”. **J. Appl. Phys.**, Vol. 103, 2008, pp. 024507.
- [70] A.C. Durr, F. Schreiber, M. Kelsch, H.D. Carstanjen, H. Dosch, O.H. Seeck, “Morphology and interdiffusion behavior of evaporated metal films on crystalline diindenoperylene thin films”, **J. Appl. Phys.**, Vol. 93, 2003, pp. 5201.
- [71] M. A. Lampert, P. Mark. **Current Injection in Solids**, Academic, New York, 1970.
- [72] Q. Wang, D. S. Shang, Z. H. Wu, L. D. Chen, X. M. Li, ““Positive” and “negative” electric-pulse-induced reversible resistance switching effect in $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ films”, **Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.**, Vol. 86, 2007, pp. 357-360.
- [73] K. Szot, W. Speier, G. Bihlmayer, R. Waser, “Switching the electrical resistance of individual dislocations in single-crystalline SrTiO_3 ”, **Nature Mater.**, Vol. 5, 2006, pp. 312-320.
- [74] W. J. Park, H.S. Shin, B.D Ahn, G.H Kim, S.M Lee, K.H Kim, H.J Kim, “Investigation on doping dependency of solution-processed Ga-doped ZnO thin film transistor”, **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 93, 2008, pp. 083508.
- [75] F. T. Reis, D. Mencaraglia, S. Ould Saad, I. Seguy, M. Oukachmih, P. Jolinat, P. Destruel, “Electrical characterization of ITO/CuPc/Al diodes using temperature dependent capacitance spectroscopy and I-V measurements”, **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 338-340, 2004, pp. 599-602.
- [76] Keryn Lian, Rophina Li, Hui Wang, Jie Zhang, Daniel Gamota, “Printed flexible memory devices using copper phthalocyanine”, **Materials Science and Engineering B**, Vol. 167, 2010, pp. 12-16.
- [77] J. H. Wu, L. P. Ma, Y. Yang, “Single-band Hubbard model for the transport properties in bistable organic/metal nanoparticle/organic devices”, **Phys. Rev. B**, Vol. 69, 2004, pp. 115321.

- [78] H.Y. Jeong, J.Y. Kim, T.H. Yoon, S.Y. Choi, "Bipolar resistive switching characteristics of poly(3,4-ethylene-dioxythiophene): Poly(styrenesulfonate) thin film", **Current Applied Physics**, Vol. 10, 2010, pp. e46-e49.
- [79] C.H. Tu, Y.S. Lai, D.L. Kwong, "Memory effect in the current-voltage characteristic of 8-hydroquinoline aluminum salt films". **IEEE Electron Device Lett.**, Vol. 27, 2006, pp. 354-356.
- [80] S. Kudela Jr., S. Oswald, S. Kudela, K. Wetzig, "Application of FTIR spectra for evaluating - interfacial reactions in metal matrix composites", **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, Vol. 390, 2008, pp. 1477-1486.
- [81] Y.C. Kim, H.H. Park, J.S. Chun, W.J. Lee, "Compositional and structural analysis of aluminum oxide films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition", **Thin Solid Films**, Vol. 237, 1994, pp. 57-65.
- [82] Rajesh Katamreddy, R. Inman, G. Jursich, A. Soulet, A. Nicholls, C. Takoudis, "Post deposition annealing of aluminum oxide deposited by atomic layer deposition using tris(diethylamino)aluminum and water vapor on Si(100)", **Thin Solid Films**, Vol. 515, 2007, pp. 6931-6937.
- [83] Y. Wenge, X. Zheng, T. Feng, Y. Shengyi, Q. Lei, Q. Chong, Q. Shanyu, X. Xurong, "Different emission mechanism of organic-inorganic heterostructure device", **Displays**, Vol. 25, 2004, pp. 61-65.
- [84] C. M. Chen, M. H. Chung, T. E. Hsieh, B. R. Huang, H. E. Hsieh, F. S. Juang, Y. S. Tsai, M. O. Liu, J. L. Lin, "Electroluminescent properties of color/luminance tunable organic light emitting diodes and their lifetime enhancement with encapsulation", **Material science and Engineering B**, Vol. 153, 2008, pp. 100-105.
- [85] Jin-Sik Choi, Ji-Ho Kim, Song-Ho Kim, Dong Hack Suh, "Nonvolatile memory device based on the switching by the all-organic charge transfer complex", **Appl. Phys. Lett.**, Vol. 89, 2006, pp. 152111.
- [86] G. Baldacchini, T. Baldacchini, A. Pace and R. B. Podec, "Emission Intensity and Degradation Processes of Alq₃ Films", **Electrochemical and Solid-State Letters**, Vol. 8, Iss. 10, 2005, pp. J24-J26.



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Charge Transfer Mechanism in Organic Memory Device

K. Onlaor^{1,2,a}, S. Khantham^{1,2}, B. Tunhoo^{1,2,b},
T. Thiwawong^{1,2} and J. Nukeaw^{1,2,c}

¹College of KMITL Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Thailand Center of Excellence in Physics, CHE, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400 Thailand

^akorakot_28@hotmail.com, ^bktbencha@gmail.com, ^cknjiti@kmitl.ac.th

Keywords: Organic bistable device, Charge transfer

Abstract. In this paper, the conduction mechanism in organic bistable memory device was investigated by both experimental and theoretical method. The current voltage (I - V) characteristics showed the electrical bistable properties between an initial low-conductivity state and a high-conductivity state upon application of an external electric field at room temperature. The current transition exhibited a very narrow voltage range that causes an abrupt increase of current. The on-state and the off-state were proposed by space-charge-limited current and thermionic emission model, respectively. That supported by the experimental data to explained the charge transfer mechanism in organic memory device.

Introduction

Organic memory devices have attracted great attention due to many advantages such as high on/off ratio, high switching speed and simple fabrication process [1-5]. In addition, it can be made into flexible form on plastic substrate [6]. The basic feature of a memory device is to exhibit bistable behavior having two different conductance states at the same applied voltage. Yang et al. have demonstrated memory effects in a single metal layer embedded between two organic layers with Al electrode [7-9]. During the device operation, when applied voltage exceeds a certain value, the device suddenly switches from a low conductivity (off-state) to a high conductivity (on-state) [10-12]. Although the superior performance of organic memory devices, the charge transfer mechanism in the on and off states for bistability are not understood clearly.

In this paper, we informed the electrical properties and the charge transfer mechanisms of organic memory devices made of a single metal layer embedded between two organic layers. The bistable memory device have been studied by varying the organic layer thickness and fixed the metal layer thickness. The charge transfer mechanisms are studied by I - V measurement and it can be analyzed in term of theoretical models.

Experimental

A schematic diagram of the organic memory device is shown in Fig. 1. Devices with the structure of bottom electrode/tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq_3)/metal/ Alq_3 /top electrode were fabricated on glass substrate using thermal evaporation technique in high vacuum systems. Prior, the glass substrate was cleaned with a following procedure including sonications in deionized water, acetone, methanol, isopropanol at room temperature for 15 min and dried with nitrogen gas, respectively. After that, the glass substrate was bake at 120 °c for 15 minute and using oxygen plasma to clean residual contaminant. An Al bottom electrode with a thickness of 50 nm was evaporated onto the glass substrate. The first Alq_3 layer was thermally evaporated at 1 Å/s. Subsequently, the middle Al layer has a thickness of 5 nm, evaporated at 1 Å/s. Next, the second Alq_3 layer was thermally evaporated at 1 Å/s. Finally, Al top electrodes were deposited by thermal evaporation process with thickness of 50 nm and through a shadow mask in a direction perpendicular to the bottom electrodes. All the depositions were carried out under the vacuum

system about 2×10^{-6} mbar at room temperature. The J - V characteristics were measured by a precision LCR meter (Agilent E4980A) and the chemical compositions of the middle Al layer were characterized by auger electron spectroscopy, AES (Hitachi PHI 700).

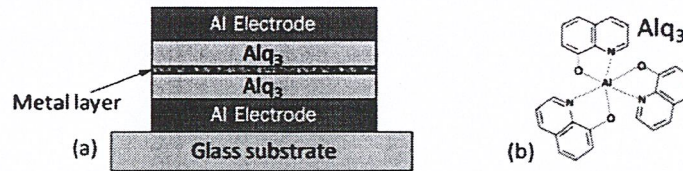


Fig. 1. The structure of an electrical bistable device (a) and the chemical structure of Alq₃ (b).

Results and discussion

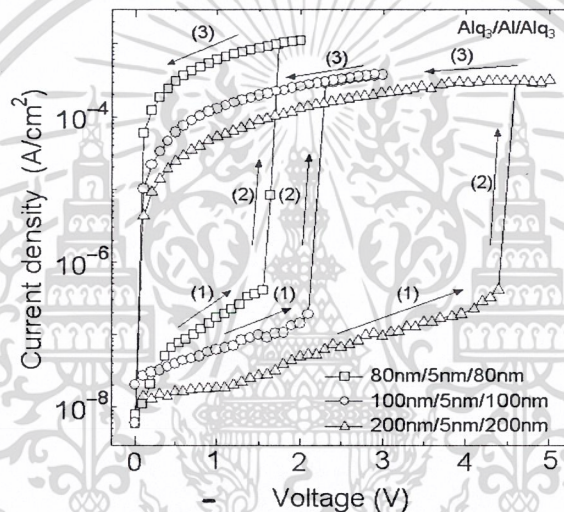


Fig. 2. Current density-voltage (J - V) curves for the Al/Alq₃/metal/Alq₃/Al device.

Figure 2 shows typical J - V curves for the organic bistable memory device. When thickness of organic layer increases the device injection current decreases whereas the threshold voltage increases. The device exhibited a low current at small bias, which is defined as the off-state. In curve (1), the current densities of the off-state under applied voltages of approximately 13-420 nA/cm². At the applied of threshold voltage [curve (2)] shows a rapid increase in the injection current at about 460-990 μ A/cm², indicative of a transition from a low-conductivity to a high-conductivity state, which is defined as the on-state. This transition serves as the writing process for the memory device. After the device changes from the off-state to the on-state, the device remained in that state even after the applied voltage was removed, as shown in Fig. 2 curve (3).

The experimental J - V curves were fitted to investigate the charge transfer mechanisms in the organic memory device. The classical non linear conduction mechanisms including Schottky emission, Thermionic emission, Pool-Frenkel emission, Fowler-Nordheim quantum tunneling and space-charge-limited current were adopted to fit the nonlinearity of the measured J - V relation. For the off-state, it was found that the thermionic emission (TE) has the best fit, as described by Eq. 1 [13]. A linear relation was observed between $\ln I$ and $V^{1/2}$, as show in Fig. 3(a).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

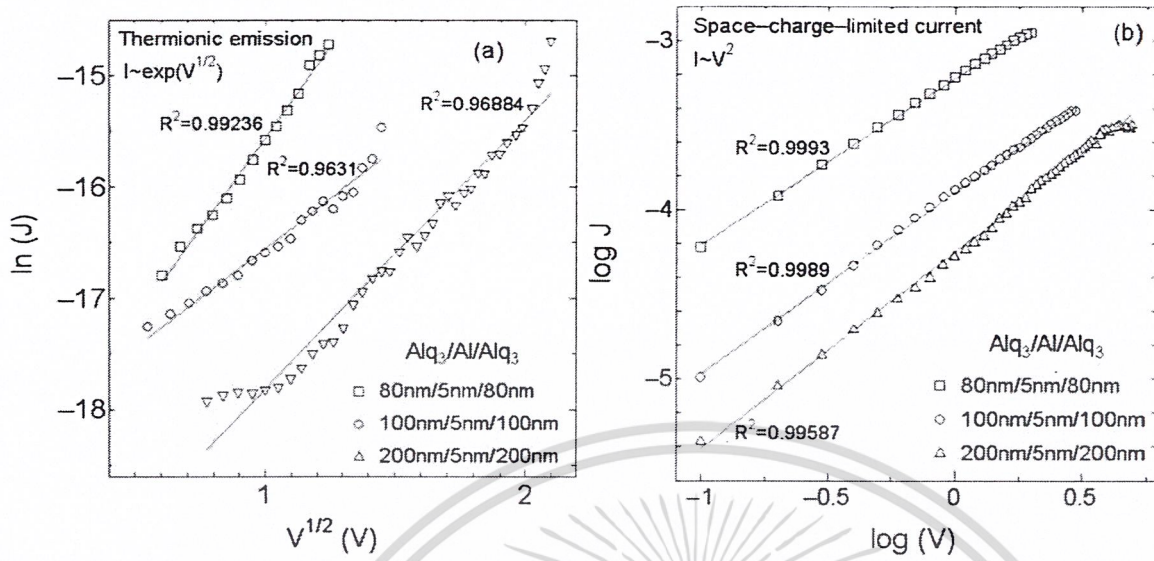


Fig. 3. $J-V$ curves of the $\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3/\text{Al}$ devices in the (a) off-state and (b) on-state. The scatters are experimental data, and the straight lines are the fitting using theoretical models.

The $J-V$ characteristics of organic bistable memory device depend critically on the electronic state at the Al/Alq_3 interface. Charge injection at low applied bias is primarily due to thermal emission of charge carriers over the interface potential barrier when the barrier is not too high for thermal injection [14]. In present study, an asymmetric electrode structure (Al electrodes) is used for the fabrication of the devices. The work function of Al (Alq_3/Al) is 3.3 eV. The energy of the highest occupied molecular orbital (HOMO) and lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) of Alq_3 (Alq_3/Al) are 5.5 and 2.7 eV, respectively. Wang et al. have been reported about the barrier height for electron injection (ϕ) between Alq_3/Al interface [15]. Wherein, T is temperature, ϵ_i is the dynamic permittivity of the Alq_3 , q is the electronic charge, k is Boltzmann constant and d is the film thickness. For in the region of the on-state, the $J-V$ curve can be fitted by the space-charge-limited current (SCLC), as described by Eq. 2 [13]. Wherein, μ is the mobility of carriers. A linear relation was observed between $\log J$ and $\log V$, as show in Fig. 3(b).

$$J \propto T^2 \exp \left[\frac{-(\phi - q\sqrt{qV/4\pi d\epsilon_i})}{kT} \right] \tag{1}$$

$$J \propto \frac{9\epsilon_i\mu V^2}{8d^3} \tag{2}$$

In this case, the concentration of free electrons will be rising due to carrier injection greatly exceeds the equilibrium concentration in the film [16]. The intermediate region of on and off state represents the transition between TE and SCLC behaviors, providing information about the trap distribution in the film. Electron traps formed by defects in middle Al layer, such defects comes from aluminumoxide [17-21]. That can be confirmed by auger electron measurement (not show here) and the AES spectra inform the surface was composed of aluminum and oxygen.

Conclusions

The organic bistable memory devices were demonstrated in this work. It is found that the J - V characteristics of the devices at room temperature showed electrical bistability. When thickness of Alq₃ layer increases the device injection current shows decrease whereas the threshold voltage increases. The SCLC and TE model is proposed to explain the J - V behavior in this organic memory device. The experimental results fit the theoretical prediction quite well.

Acknowledgment

This work has partially been supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of Excellence Network. The authors are grateful to the Thai Microelectronics Center (TMEC), Thailand, for the auger electron spectroscopy measurement.

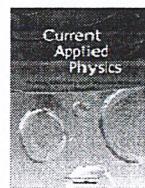
References

- [1] D. I. Son, C. H. You, W. T. Kim, et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 94 (2009), p. 132103.
- [2] K. S. Yook, S. O. Jeon, C. W. Joo, et al., Organic Electronics. Vol. 10 (2009), p. 48–52.
- [3] J. Chen and D. Ma, J. Appl. Phys. Vol. 100 (2006), p. 034512.
- [4] G. Liu, Q.-D. Ling, E.-T. Kang, et al., J. Appl. Phys. Vol. 102 (2007), p. 024502.
- [5] V.S. Reddy, S. Karak, S.K. Ray, et al., Organic Electronics. Vol. 10 (2009), p. 138–144.
- [6] L. Li, Q.-D. Ling, S.-L. Lim, et al., Organic Electronics. Vol. 8 (2007), p. 401–406.
- [7] S. Pyo, L. Ma, J. He, et al., J. Appl. Phys. Vol. 98 (2005), p. 054303.
- [8] J. He, L. Ma, J. Wu, et al., J. Appl. Phys. Vol. 97 (2005), p. 064507.
- [9] S. J. Lee, J.-R. Koo, S. J. Kwon, et al., Microelectronic Engineering. Vol. 85 (2008), p. 2388–2392.
- [10] J. H. Ham, D. H. Oh, S. H. Cho, et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 94 (2009), p. 112101.
- [11] K.S. Yook, J. Y. Lee, S.H. Kim, et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 92 (2008), p. 223305.
- [12] L. Ma, J. Liu, S. Pyo, et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 80 (2002), p. 362.
- [13] Q.-D. Ling, D.-J. Liaw, C. Zhu, et al., Progress in Polymer Science. Vol. 33 (2008), p. 917–978.
- [14] S.M. Sze, Kwok K. Ng, Physics of semiconductor devices, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley-InterScience 2007.
- [15] K.L. Wang, B. Lai, M. Lu, et al., Thin Solid Films. Vol. 363 (2000), p. 17–181.
- [16] Y. Xia, W. He, L. Chen, et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 90 (2007), p. 022907.
- [17] L. Ma, S. Pyo, J. Ouyang, et al., Appl. Phys. Lett. Vol. 82 (2003), p. 1419.
- [18] V. S. Reddy, S. Karak, and A. Dhar, Appl. Phys. Lett. Vol. 94 (2009), p. 173304.
- [19] J.-G. Park, G.-S. Lee and K.-S. Chae, Journal of the Korean Physical Society. Vol. 48 (2006), No. 6, p. 1505.
- [20] L. P. Ma, J. Liu, and Y. Yang, Appl. Phys. Lett. Vol. 80 (2002), p. 2997.
- [21] F. Verbakel, S. C. J. Meskers, and R. A. J. Janssen, Appl. Phys. Lett. Vol. 91(2007), p. 192103.



Contents lists available at ScienceDirect

Current Applied Physics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cap

Electrical bistability of tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃)/ZnSe organic-inorganic bistable device

K. Onlaor^{a,b,*}, B. Tunhoo^{a,b}, T. Thiawong^{a,b}, J. Nukeaw^{a,b}^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, CHE, Ministry of Education, 328 Si Ayutthaya Rd., Bangkok 10400, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 March 2011

Received in revised form

14 June 2011

Accepted 5 July 2011

Available online 12 July 2011

Keywords:

Organic-inorganic nanodevice

Memory device

Conduction mechanism

Bistable device

Memory characteristics

ABSTRACT

We present that the electrical bistability in organic-inorganic bistable devices based on tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃) and zinc selenide (ZnSe) with the tri-layer structure of Alq₃/aluminum (Al)/ZnSe. The current–voltage characteristics of the bistable device exhibit two electrical states as low (OFF state) and high (ON state) conductivity with ON/OFF ratio about four orders of magnitude. The conduction mechanisms in both ON and OFF states were analyzed by theoretical model. In the OFF state, the conduction mechanisms can be explained by thermionic emission model, which the ON state can be described by ohmic conduction model. The retention times of both states are more than 8000 s, and the device can reproduce continuous write-read-erase-read switching cycles. Moreover, for the organic-inorganic bistable device was kept at one year in ambient condition without encapsulation. The device still exhibited the electrical bistable behavior. Consequently, the ZnSe layer may be led to improve the lifetime property of the bistable device which acted as a self-encapsulating layer.

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

During the past decades, several works have been done in the field of organic semiconductor electronic devices such as light emitting diodes, field effect transistors and solar cells [1–3], etc. There have shown great potential towards future technologies. One of their, interest in organic bistable devices (OBDs) has rapidly increased due to promise of a next-generation memory device. The major advantage of OBDs has been studied intensively because of their merits of simple device structure, simple fabrication process, low power and low cost. Thus, there have been many studied about organic bistable devices and most of the works were focused on developing organic bistable devices with a high ON/OFF ratio and a long-term stability [4–8]. Typically, the OBDs have been reported in the organic/metal/organic structures [9–12]. However, in contrast to inorganic semiconductors, organic materials have the slow mobility of carriers and strong chemical interaction between two compounds, which prevents the injection of charges into organic. For the organic-inorganic structures to

combine the comparatively good transport properties of semiconductors is one of the potential candidates to improve the capability of the device [13]. Additionally, it has been reported about the bistable device with organic-inorganic structures that were consisted of organic layer containing nanoparticles or core/shell nanoparticles blended and this device required precise control of synthesis conditions [5,14,15]. Tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃) is a popular organic semiconductor material that widely used in organic electronic applications such as organic light emitting diode (OLED), OBDs, etc. While zinc selenide (ZnSe) is a wide-band-gap inorganic semiconductor that has been well known as blue-green wavelength applications for optoelectronic devices. Additionally, ZnSe can be used as an electron transport layer, buffer layer and cap layer in OLEDs and single quantum well-like structure [16–18]. Besides, reports about the use of ZnSe as the passivation layer had ever been presented also [19]. While considering the electronic properties of the ZnSe [20], it is possible to use the ZnSe layer to improve the bistability property of the OBDs.

In this paper, we report on the growth of the organic-inorganic bistable device with tri-layer structure (Alq₃/Al/ZnSe). The electrical characteristics of the organic-inorganic bistable device were investigated by current–voltage and capacitance-voltage measurements. The conduction mechanisms in the bistable device can be explained by theoretical model.

* 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).

2. Experimental

Chemical powders used in this work were obtained from Aldrich Chem. All layers of the device were deposited by thermal evaporation technique at base pressure about 2×10^{-6} mbar. Prior to deposition, glass substrate was cleaned with a following procedure including sonication in de-ionized water, acetone, methanol, isopropanol for 15 min and dried with nitrogen gas. Schematic diagram of tri-layer structure of the organic bistable device and organic-inorganic bistable device are shown in Fig. 1(a) and Fig. 1(b), respectively. To study the effect of thickness of middle aluminum layer on properties of the organic bistable device, the thickness of middle aluminum layer was varied from 0 nm to 20 nm (at a fixed thickness of Alq₃ at 100 nm). Furthermore, to investigate the organic-inorganic bistable device with the structure of Alq₃/Al/ZnSe by fixed the thickness of Alq₃ and Al layer at 100 nm and 5 nm and varying the ZnSe layer thickness from 50 nm to 150 nm. The film thickness and growth rate of all layers were measured by a quartz thickness controller (Inficon XTC/2). The growth rates of Alq₃, Al middle layer, and ZnSe were controlled at 0.1, 0.01, and 0.1 nm/s, respectively. The substrate temperature was kept at room temperature. The 50 nm thick Al was used as the top and bottom electrode with 2 mm-wide. Therefore, the device had a cross-sectional area of 4 mm². The current–voltage (I–V) and capacitance–voltage (C–V) characteristics were measured by a precision LCR meter (Agilent E4980A) under a dark condition. Surface morphology of the Al middle layer was investigated using an atomic force microscope (SPA400–Seiko) in non-contact mode. The cycling endurance times and the retention measurement were performed by a source meter (Keithley 2410) with the voltages for writing, reading, and erasing at +2 V, +1 V, and –2 V, respectively.

3. Results and discussion

Fig. 2 shows the I–V characteristics for the organic bistable devices with different thickness of the middle Al layer. The characteristics of the device without middle Al layer, is also shown for comparison. For tri-layer devices, when the applied voltage reached a threshold value (curve two), the current abruptly increases by several orders of magnitude, which the value of threshold voltage (V_{Th}) is in the range of +2.1 V to +2.5 V. The ON/OFF current parameters of the organic bistable devices are summarized in Table 1. The maximum ON/OFF current ratio of the 5 nm thick middle Al layer is about 2.09×10^3 at read voltage of +1 V. While the thickness of the Al layer is increased, the ON/OFF current ratio goes down as a consequence of the phenomenon of Al nanoclusters in the Al layer joined with the neighbor of Al nanoclusters [21]. In case of single layer device, the device exhibits bistable properties as shown in the inset of Fig. 2. The ON/OFF current ratio of this device has a small value. That may be resulted from the mechanisms at the interface, which Al nanoparticles are incorporated in organic layer by the migration process during the evaporation of the top electrode or a native oxide layer at the interface between the organic layer and Al electrodes. It was

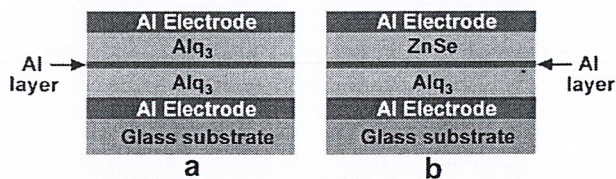


Fig. 1. Schematic illustration of (a) the organic bistable device and (b) the organic-inorganic bistable device.

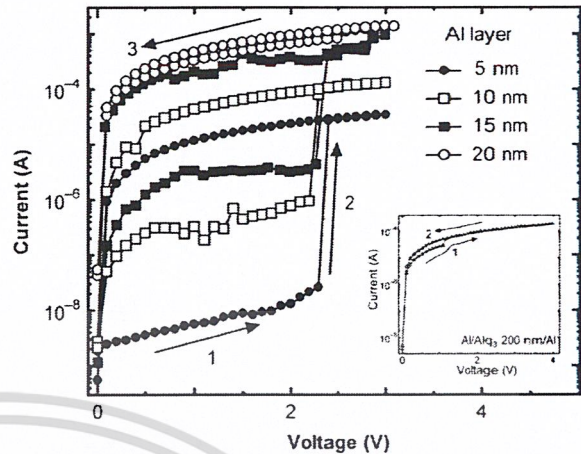


Fig. 2. I–V characteristics of the Alq₃(100 nm)/Al/Alq₃(100 nm) device with different thickness of middle Al layer.

already reported that bistability in organic memories is due to the presence of metal migration and a native oxide layer [21–25]. Tu et al. [26] reported the reproducible bistable resistive switching characteristics of Alq₃ single layer with Al top and bottom electrodes, the switching phenomenon of the memory device is explained on the basis of filament theory. However, the switching behaviors of our devices clearly depend on the thickness of middle Al layer, which is based on a charge stored mechanism [27–32] more than the effect of an interface between the organic layers and Al electrodes, because Al electrodes of both tri-layer and single layer structures are grown in same conditions. It has been experimentally confirmed that the nanoclusters in middle Al layer play an important role in the switching process of the bistable device. The Al nanoclusters consisted of an Al core and the thin oxide shell, which produced by the chemical reaction with residual oxygen gas during the deposition process. Pyo et al. [28] and Reddy et al. [29] have clearly reported an x-ray photoemission spectroscopy (XPS) measurement, which confirmed the formation of oxide shell. The electronic transition of devices had occurred due to the field-induced transfer of charge carriers between Alq₃ to the aluminum core of Al nanoclusters. When the applied electric field is high enough, the electrons on the highest occupied molecular orbital (HOMO) of Alq₃ may gain enough energy, and it can be tunneled through the aluminum oxide shell into the aluminum core and stored at both sides of the Al nanoclusters layer. The stored charge in nanoclusters enabled the adjacent organic layers to undergo a conductance change. Fig. 3 shows the size distribution and the surface morphology of Al nanoclusters middle layer with thickness of 5 nm. It is found that the nanoclusters size varies between about 5 nm and 30 nm. To determine the chemical composition of Al nanoclusters middle layer, an Auger electron spectroscopy (AES) was used, as shown in the inset of Fig. 3. The AES spectra indicating that it was composed of Al and oxygen.

Table 1

Summary of I–V characteristics of Alq₃(100 nm)/Al/Alq₃(100 nm) device with different thickness of middle Al layer.

Thickness (nm)	I_{OFF} (A)	I_{ON} (A)	I_{ON}/I_{OFF}
0	3.80×10^{-5}	4.75×10^{-5}	1.75
5	5.60×10^{-9}	1.17×10^{-5}	2.09×10^3
10	3.22×10^{-7}	4.32×10^{-5}	1.34×10^2
15	3.36×10^{-6}	2.07×10^{-4}	61.60
20	3.29×10^{-4}	4.66×10^{-4}	1.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

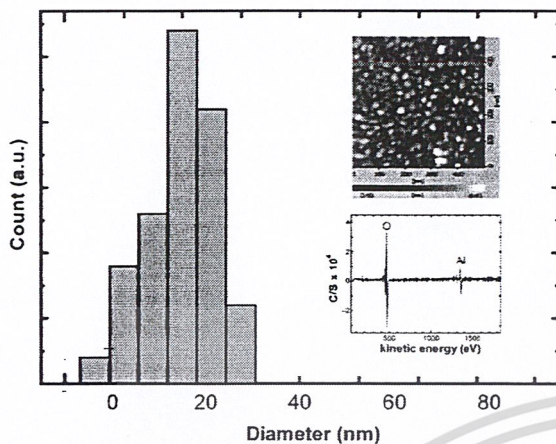


Fig. 3. Size distribution of the middle Al layer of thickness 5 nm. inset: the surface morphology and the AES spectra of the middle Al layer.

The I-V characteristics of the organic-inorganic bistable devices with different thickness of the ZnSe layer are shown in Fig. 4. The ON/OFF current ratios (at +1 V) of the bistable device at the thickness of ZnSe layer 50 nm, 100 nm and 150 nm are 6.47×10^3 , 1.41×10^4 and 2.10×10^3 , respectively. The device exhibited optimal ON/OFF current ratio at 100 nm thick ZnSe layer. Fig. 5 shows the I-V characteristics with applied forward and reverse bias of the structure with 100 nm thick ZnSe layer. At the initial state, curve one shows the OFF state current under applied voltages between 0 V and +2 V which in the range of approximately 0.83 nA–0.54 μ A. At the applied voltage about +2 V (curve two), the current abruptly changed from 0.54 μ A to 0.28 mA, that indicative of a transition from the OFF state to the ON state of the memory device. This transition serves as the writing process in the device. In the ON state, the device remains in high conductivity with current between 5.3 μ A and 0.28 mA (curve three). The ON state could be returned to the OFF state by applying a negative bias around -2 V (curve four and five), which is erasing process. Therefore, the effect of ZnSe layer was proposed to account for the electrical bistable behavior of the organic-inorganic bistable devices. It is well known that both Alq₃ and ZnSe are the electron transport materials. The electronic structure of conduction and valence bands of ZnSe have been reported to be at -4.1 and -6.8 eV [33] below the vacuum

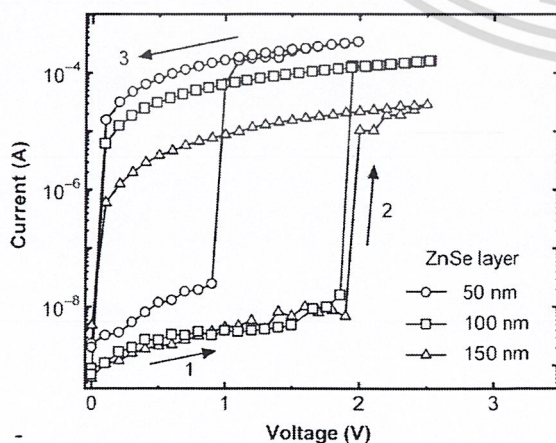


Fig. 4. I-V characteristics of Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe device with different thickness of ZnSe layer.

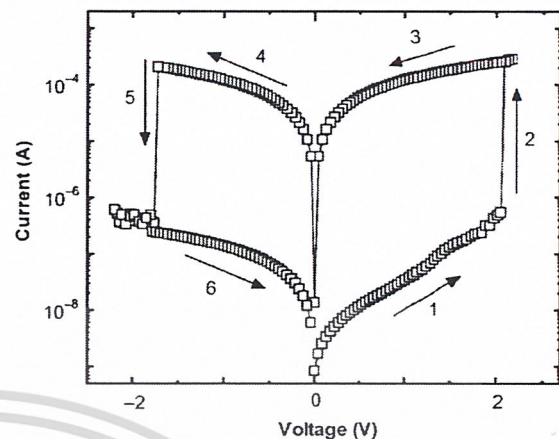


Fig. 5. I-V characteristics of the Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) device.

level. The lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) and highest occupied molecular orbital (HOMO) levels of Alq₃ are at -3.1 and -5.7 eV [1], respectively. From the configuration and the energy band diagrams, when compared with the energy band of Alq₃ and ZnSe material, the LUMO or electron affinity level of Alq₃ is less than the conduction level of ZnSe, whereas the conduction level of ZnSe is close to the work function level of Al electrode more than the LUMO level of Alq₃. Thus, the energy barrier for electron injection from the top electrode into ZnSe layer is smaller than the Alq₃ layer. Hence, when a positive voltage is applied, electrons easily injected from the top Al cathode into the ZnSe layer and transported through to the Al nanoclusters layers. Therefore, the ON/OFF current ratio of the organic-inorganic bistable device is higher than the organic bistable device while the threshold voltage is lower. That is to say, the barrier potential of the interface plays a critical role of carrier injection in the device. After the electrons tunneled through the oxide shell into the Al core and there were captured in the Al core, which corresponds to a low conductivity state of the device. In case of the applied bias had been large enough ($V > V_{th}$), the traps were filled and the device could be changed to a high conductivity state. When a negative voltage was applied, the electron that was captured in the Al nanoclusters will be released into the ZnSe layer and transported to the electrode. Then, the erasing process was performed.

To get more understanding of the conduction mechanism through the device in both ON and OFF states, the conduction mechanism of the organic-inorganic bistable device was also investigated by theoretical charge transport model. The fitting data of the I-V curves for the devices were performed by the thermionic emission (TE) and ohmic conduction model [34–36]. In the region of applied bias voltage between 0 V and +2 V, the I-V curve can be well fitted by the TE conduction mechanism [34–37], the linear dependence of $\ln(I)$ versus $V^{1/2}$ as shown in Fig. 6(a). This suggested that the OFF state current was probably controlled by charge inject from the Al electrode and expressed in the term of measuring current that does not depend on applied voltage [38]. When the device was switched to the ON state, the slope of all curves is close to 1 (coefficient of determination; $R^2 = 0.998$) as shown in Fig. 6(b) and Fig. 6(c). Therefore, the conduction mechanism of the ON state exhibited an ohmic conduction behavior [34]. Thus the ohmic process for the device may be related to the tunneling state which formed by the Al nanoclusters in the Alq₃/ZnSe layer.

To study the effect of temperature on the bistability characteristics in the organic-inorganic bistable device, I-V characteristics at

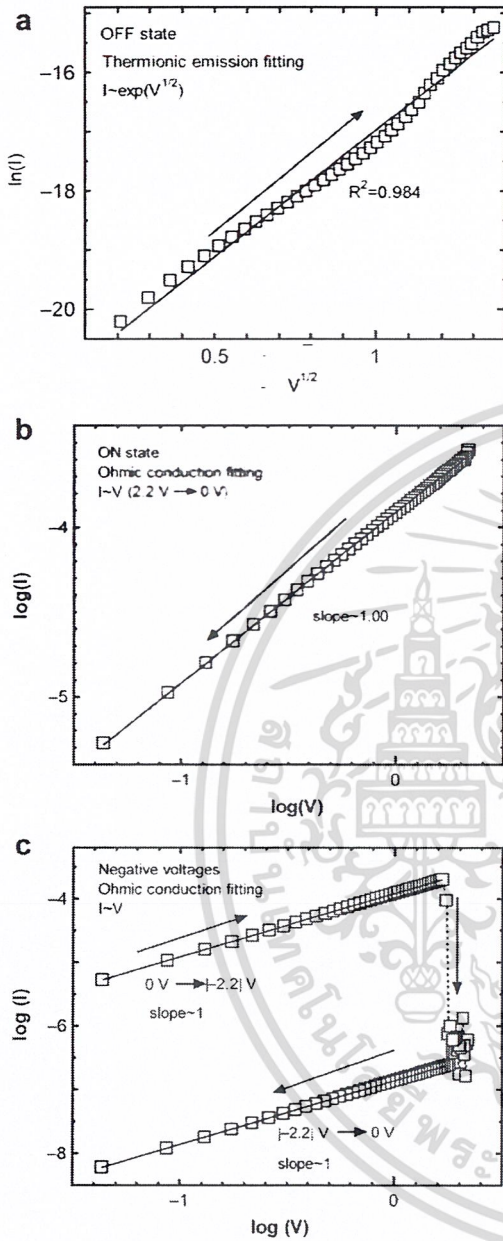


Fig. 6. I-V curves of the Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) device in (a) the OFF state, (b) the ON state and (c) the negative bias on both states. The scatters are experimental data, and the straight lines are the fitting using theoretical models.

different temperatures had performed. Fig. 7 shows the I-V characteristics of the Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) structure at the different temperatures. The current ratio of the device decreases with increasing temperature and the current in the OFF state shows strong temperature dependence while the temperature did not affect to the current in the ON state. The thermally activated conduction may be due to the TE of charge carriers. In the OFF state, the I-V characteristics of the organic-inorganic bistable device depend critically on the electronic state at the metal-semiconductor interface. Charge injection at low applied bias is primarily due to thermal emission of charge carriers over the interface potential barrier when the barrier is not too high for

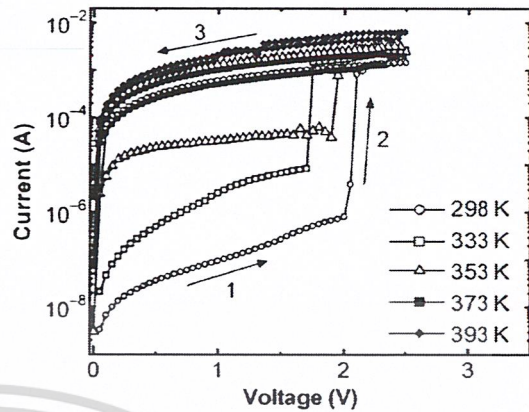


Fig. 7. Temperature dependence of I-V characteristics of the organic-inorganic bistable device based on the Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) structure.

thermal injection. The TE current over the barrier depends on the modified energy barrier which modified by the image force and temperature [38].

The C-V characteristics of the organic-inorganic bistable device are shown in Fig. 8. The device was performed with AC signal voltage at a frequency of 100 kHz and amplitude of 50 mV with forward and reverse bias voltage from 0 V to +2.3 V and +2.3 V to -2.3 V, respectively. At the curve one, the device exhibited constant capacitance values while the applied voltage was less than the V_{Th}. When the voltage exceeded its V_{Th} at +1.8 V, the capacitance of the device rapidly decreased and remained at a constant value. In case of reverse bias, the device capacitance abruptly increased to 15 nF at -1.7 V. These changes of the capacitance occurred at the same switching voltage value in the I-V characteristics. The variation of capacitance in the device might be ascribed to the generated charges and the trapped charges in the Al nanoclusters layer. When the applied voltage was more than V_{Th}, the charge traps in the Al nanoclusters were filled and make it high conductance. Consequently, the capacitance of the device is reduced.

One of the promising applications of the organic-inorganic bistable device is the bistable rewritable memory. That can be represented in terms of stability and the memory retention ability. Fig. 9(a) depicts the currents of the organic-inorganic bistable

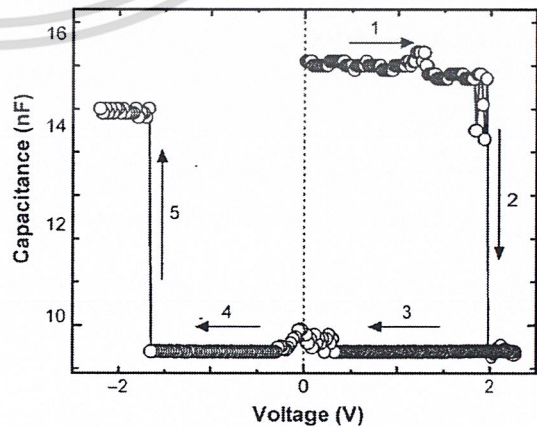


Fig. 8. C-V characteristic of the organic-inorganic bistable device based on the Alq₃(100 nm)/Al(5 nm)/ZnSe(100 nm) structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

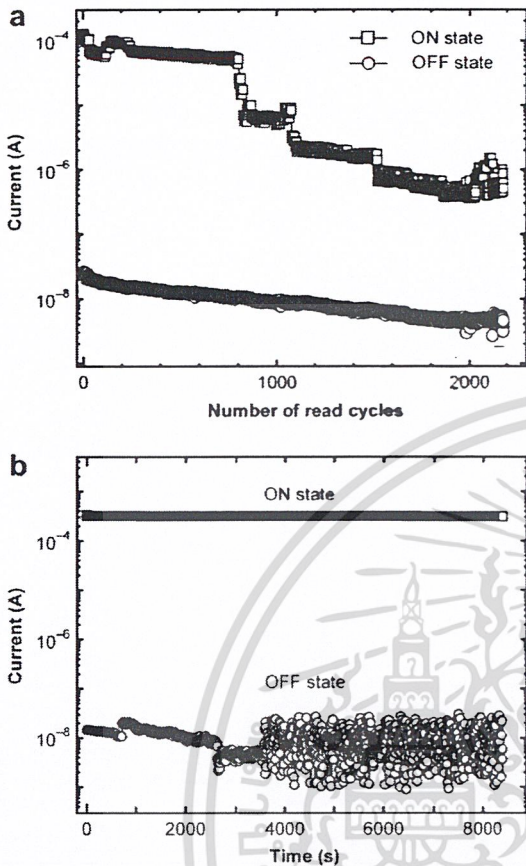


Fig. 9. Electrical behavior of the $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$ device, (a) currents as functions of the number of cycles for the ON and OFF states at a read voltage of +1 V and (b) stability of the device in either ON and OFF state under a constant bias at +1 V.

device as functions of the number of cycles for the ON and the OFF states. The electrical switching properties between the two conductivity states of the device were performed more than 2000 times. The ON current exhibited a few decrease with the increasing number of cycles at the first 800 cycles, and it was still higher than three orders of magnitude than the OFF state current, together with a rewriting capability, and it was quite stable. However, the fluctuation of the ON current appeared after 800 cycles, it may be due to the instability of material or material/electrode interfaces.

Moreover, the memory retention ability was performed by leaving device in the ON and OFF state under ambient conditions. The stability of the organic-inorganic bistable device under stress was evaluated for a continuous applied bias. After a constant voltage of +1 V has been applied to the device in the OFF and ON state, the current was recorded at different times as shown in Fig. 9(b). In the OFF state, the device retained its conductivity and did not undergo the transition to the ON state. In addition, the similar test was performed on the device in the ON state. It has been found that the significant degradation of the devices in either the ON and OFF state can't be observed until 8000 s. The device demonstrated good retention of the ON state.

Furthermore, it is interesting to note that the bistability property of the organic-inorganic bistable device still exhibited when the device was kept at the ambient condition without encapsulation for one year. The I-V characteristic of this device is shown in Fig. 10 (a). It is noteworthy that a shift of the position of minimum

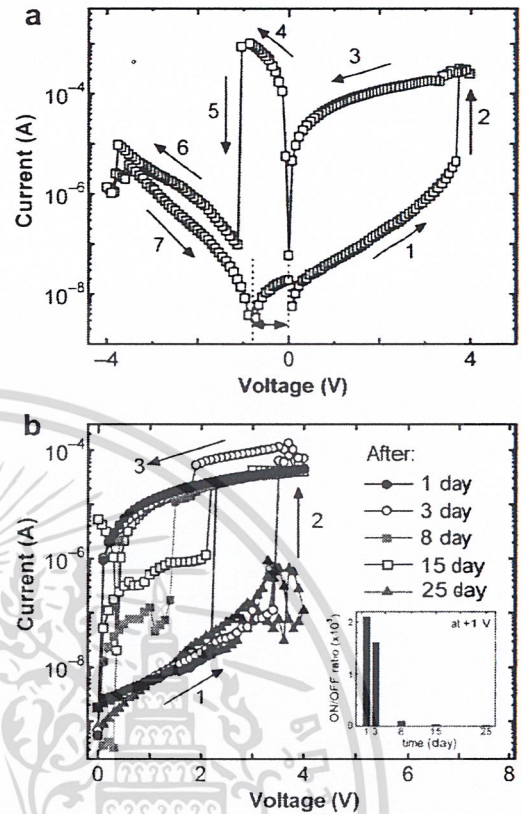


Fig. 10. (a) I-V characteristics of the $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{ZnSe}(100 \text{ nm})$ device after kept at ambient condition for one year and (b) I-V characteristics of the $\text{Alq}_3(100 \text{ nm})/\text{Al}(5 \text{ nm})/\text{Alq}_3(100 \text{ nm})$ device after kept at the ambient condition.

current in the OFF state from positive voltage to negative voltage that might be due to the non-uniform distribution of space charges contained in the device. However, this shift disappeared when the reverse bias sweep. Moreover, the I-V characteristics for the organic bistable device after kept at the ambient condition without encapsulation, as shown in Fig. 10(b). The inset of Fig. 10(b) shows dramatically decreasing of ON/OFF current ratio after a few days. It is found that the ON/OFF current ratio decreases rapidly after 3 days, and the bistable properties were not observed after 25 days. Typically, Alq_3 is one of the most successful small organic molecules ever utilized in organic semiconductor devices such as OLEDs, OBDS, etc. But although it has been investigated extensively as far as its chemical and physical properties are concerned. A film of Alq_3 is very sensitive to the atmospheric environment, and its properties degrade in a matter of hours if it left unprotected [39]. For the organic-inorganic bitable device with the top layer of a ZnSe inorganic film, the ZnSe layer can be acted as an encapsulation layer of Alq_3/Al -layer to protect the device from the atmospheric environment. Therefore, the organic-inorganic structure showed the important characteristics of the bistable device for a candidate of the practical memory device.

4. Conclusion

The effect of the Al nanoclusters layer on the performance of $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{Alq}_3$ organic bistable device was investigated, that was observed the bistability depend on the thickness of Al nanoclusters layer. The electrical behavior of the organic-inorganic bistable device with the structure of $\text{Alq}_3/\text{Al}/\text{ZnSe}$ has been revealed. The

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

device exhibited two distinctive states of conductivity with the maximum ON/OFF current ratio about 1.41×10^4 at low reading voltage and the write-read-erase-read sequence results exhibited the switching characteristics of the device. To understand the behavior in the device, the conduction mechanism in the OFF state can be proposed by the thermionic emission model. In case of the ON state, the ohmic conduction model dominated carrier transportation. Moreover, the conduction mechanisms of the device were confirmed by temperature dependent current–voltage characteristics. The influence of ZnSe layer on properties of the device was observed. That can be ascribed by due to the conduction energy level of ZnSe is close to the work function of Al electrode. Therefore electrons easily injected and transported through to the Al nanoclusters layers. In addition, the reliability of the organic-inorganic bistable device can be demonstrated by kept the device at the ambient condition without encapsulation with one year. However, the devices still exhibited bistable behavior. So, the inorganic ZnSe top layer may be led to improve the lifetime property of the device, which acted as a self-encapsulating layer.

Acknowledgement

This work has partially been supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of Excellence Network. The authors are grateful to the Thai Microelectronics Center (TMEC), Thailand, for the auger electron spectroscopy measurement. The supports from Thailand Toray Science Foundation are gratefully acknowledged.

References

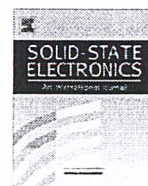
- [1] C.M. Chen, M.H. Chung, T.E. Hsieh, B.R. Huang, H.E. Hsieh, F.S. Juang, Y.S. Tsai, M.O. Liu, J.L. Lin, *Material Science Eng. B* 153 (2008) 100.
- [2] Y. Liu, W. Hu, W. Qiu, Y. Xu, S. Zhou, D. Zhu, *Sens. Act. B* 80 (2001) 202.
- [3] J.D. Myers, T.-K. Tseng, J. Xue, *Org. Electronics* 10 (2009) 1182.
- [4] J.W. Seo, J.W. Park, K.S. Lim, J.H. Yang, S.J. Kang, *Appl. Phys. Lett.* 93 (2008) 223505.
- [5] J.H. Ham, D.H. Oh, S.H. Cho, J.H. Jung, T.W. Kim, E.D. Ryu, S.W. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 112101.
- [6] G. Liu, Q.D. Ling, E.T. Kang, K.G. Neoh, *J. Appl. Phys.* 102 (2007) 024502.
- [7] B. Mukherjee, M. Mukherjee, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 173510.
- [8] S.H. Kim, K.S. Yook, J.Y. Lee, J. Jang, *Appl. Phys. Lett.* 93 (2008) 053306.
- [9] D. Tondelier, K. Lmimouni, D. Vuillaume, *Appl. Phys. Lett.* 85 (2004) 5763.
- [10] S.J. Lee, J.R. Koo, S.J. Kwon, Y.K. Kim, *Microelectron. Eng.* 85 (2008) 2388.
- [11] J. He, L. Ma, J. Wu, Y. Yang, *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 064507.
- [12] K.S. Yook, S.O. Jeon, C.W. Joo, J.Y. Lee, S.H. Kim, *J. Jang, Org. Electronics* 10 (2009) 48.
- [13] V.M. Agranovich, D.M. Basko, G.C. La Rocca, F. Bassani, *Synth. Met.* 116 (2001) 349–351.
- [14] D.I. Son, C.H. You, W.T. Kim, J.H. Jung, T.W. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 132103.
- [15] F. Li, D.I. Son, H. Moe Cha, S.M. Seo, B.-J. Kim, H.J. Kim, J.H. Jung, T.W. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 90 (2007) 222109.
- [16] Y. Jiang, S. Yang, F. Teng, Z. Xu, Y. Hou, X. Xu, *J. Luminescence* 122–123 (2007) 617–619.
- [17] W. Pecharapa, A. Keawprajak, N. Kayunkid, S. Rahong, W. Yindeesuk, *J. Nucl. Mater. Sci. Eng. B* 123 (2005) 163.
- [18] J. Nukeaw, K. Upprakhot, S. Rahong, B. Tunhoo, W. Yindeesuk, *Physica E* 21 (2004) 1070–1073.
- [19] N. Chand, W.S. Hobson, J.F. de Jong, P. Parayanthal, U.K. Chakrabarti, *Electron Lett.* 32 (1996) 1595.
- [20] M.G. Mason, C.W. Tang, L.-S. Hung, P. Raychaudhuri, J. Madathil, D.J. Giesen, L. Yan, Q.T. Le, Y. Gao, S.-T. Lee, L.S. Liao, L.F. Cheng, W.R. Salaneck, D.A. dos Santos, J.L. Bredas, *J. Appl. Phys.* 89 (2001) 2756.
- [21] V.S. Reddy, S. Karak, S.K. Ray, A. Dhar, *Org. Electronics* 10 (2009) 138.
- [22] H.Y. Jeong, J.Y. Kim, T.H. Yoon, S.Y. Choi, *Curr. Appl. Phys.* 10 (2010) e46–e49.
- [23] P.T. Lee, T.Y. Chang, S.Y. Chen, *Org. Electronics* 9 (2008) 916.
- [24] W. Tang, H. Shi, G. Xu, B.S. Ong, Z.D. Popovic, J. Deng, J. Zhao, *Adv. Mater.* 17 (2005) 2307.
- [25] K.S. Yook, J.Y. Lee, *Thin Solid Films* 517 (2009) 5573.
- [26] C.H. Tu, Y.S. Lai, D.L. Kwong, *IEEE Electron Device Lett.* 27 (5) (2006) 354–356.
- [27] L. Ma, S. Pyo, J. Ouyang, Q. Xu, Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.* 82 (2003) 1419.
- [28] S. Pyo, L. Ma, J. He, Q. Xu, Y. Yang, *J. Appl. Phys.* 98 (2005) 054303.
- [29] V.S. Reddy, S. Karak, A. Dhar, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 173304.
- [30] L.P. Ma, J. Liu, Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 2997.
- [31] J.G. Park, G.S. Lee, K.S. Chae, Y.J. Kim, T. Miyata, *J. Kor. Phys. Soc.* 48 (2006) 1505.
- [32] L.D. Bozano, B.W. Kean, M. Beinhoff, K.R. Carter, P.M. Rice, J.C. Scott, *Adv. Funct. Mater.* 15 (2005) 1933.
- [33] Y. Wenge, X. Zheng, T. Feng, Y. Shengyi, Q. Lei, Q. Chong, Q. Shanyu, X. Xurong, *Displays* 25 (2004) 61.
- [34] M.A. Lampert, P. Mark, *Current Injection in Solids*. Academic, New York, 1970.
- [35] K.C. Kao, W. Hwang, in: B.R. Pamplin (Ed.), *Electrical Transport in Solids, International Series in the Science of Solid State*, vol. 14, Pergamon, New York, 1981, pp. 64–144.
- [36] Q.D. Ling, D.J. Liaw, C. Zhu, D.S.H. Chan, E.T. Kang, K.G. Neoh, *Prog. Polym. Sci.* 33 (2008) 917.
- [37] K. Onlaor, S. Khantham, B. Tunhoo, T. Thiawong, J. Nukeaw, *Adv. Mater. Res.* 93–94 (2010) 235–238.
- [38] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, second ed. Wiley, New York, 1981.
- [39] G. Baldacchini, T. Baldacchini, A. Pace, R.B. Podec, *Electrochemical Solid-State Lett.* 8 (10) (2005) J24–J26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Solid-State Electronics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/sse

Electrical bistable properties of copper phthalocyanine at different deposition rates

K. Onlaor*, B. Tunhoo, P. Keeratithiwakorn, T. Thiwawong, J. Nukeaw

Electronics and Control System for Nanodevice Research Laboratory, College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Bangkok 10520, Thailand
 Thailand Center of Excellence in Physics, Commission on Higher Education, Ministry of Education, 328 Si Ayutthaya Road, Bangkok 10400, Thailand

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 September 2011

Received in revised form 7 January 2012

Accepted 9 January 2012

Available online 4 February 2012

The review of this paper was arranged by
 Dr. Y. Kuk

Keywords:

CuPc

Organic memory

Memory device

Conduction mechanism

ABSTRACT

Organic bistable memory device is a next-generation of the electrical memory unit. In this paper, we report about the influence of structural properties on electrical bistable behavior of copper phthalocyanine organic memory device. Copper phthalocyanine (CuPc) layer was prepared by thermal evaporation technique at different deposition rates. When the deposition rate is increased, the film crystalline decreases and the surface morphology gradually changes from large flat grain to fine grain structure. Structural parameters such as the crystalline size of CuPc films and dislocation density can be calculated from XRD spectra. Moreover, the effect of deposition rate of CuPc layer on the bistable properties can be performed by current–voltage characteristics, retention measurement, impedance spectroscopy and temperature dependence measurement. The conduction mechanism in both ON and OFF states of the bistable device was analyzed by theoretical model, which can be proposed as a possible trap center of the carrier trapping and de-trapping process by structural defects in CuPc layer. Furthermore, the reliability issue such as cycling endurance and data retention is presented.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Recently, several works have been done in the field of organic semiconductor electronic devices such as light-emitting diodes, field-effect transistors and solar cells [1–3], etc. There have shown great potential towards future technologies. One of the promising organic devices is the organic memory device. The electrical bistable phenomenon of the metal–insulator–metal (MIM) diodes with organic material as the insulator layer has been first reported by Gregor in 1968 [4]. Interest in the organic bistable device (OBD) has rapidly increased due to promise of a next-generation memory device. The major advantage of OBD has been studied intensively because of their merits of simple device structure, simple fabrication process, low power and low cost. The basic feature of an OBD is to exhibit bistable behavior having two different conduction states at the same applied voltage. During the device operation, when applied voltage exceeds a certain value. The device suddenly switched from a low conductivity state to a high conductivity state, with a conductivity difference of several orders of magnitude. Since then similar phenomena have been observed in a variety of organic materials and device structures [5–7], including both polymer and small-molecule MIM devices [8,9], donor–acceptor complex devices [10] and nanoparticle blend device

[11]. In addition, several mechanisms have been proposed to explain the conductance switching such as formation of conducting filaments [8,12], formation of charge transfer complexes [13] charge-trapping-defect states inside the band gap [14] and change of molecular orientation [15]. However, the switching mechanism is still a matter of debate.

Phthalocyanine (Pc) is a class of organic semiconductor with alternate single–double bond structure. Metallophthalocyanines (MPcs) are planar phthalocyanine organic molecules associated with one metal atom in the molecule's center, and typically, the central atom is one in the first row of transition metals such as copper, cobalt and iron. The core structure of the MPc macrocycle was formed by four isoindole units, which endows the molecule with a two-dimensional conjugated π electron system [16]. The MPcs are found to exhibit conductive properties. Therefore, an attempt has been made to use the MPcs in electronic devices such as organic-light emitting diodes (OLED) [17] and organic solar cells [18]. CuPc is a member of MPcs family with the central atom as Cu^{2+} . CuPc is a dark-blue material. The CuPc has been interested for its gas sensing property [19] and the schottky diode solar cells [3]. Many of these applications are based on the electrical properties and detailed understanding of the some requires an accurate knowledge of molecular as well as crystal structures. Dependence of crystal structure becomes more significant if the compound exists in more than one crystalline modification. Depending on the preparation parameters, the phthalocyanine films have been reported being composed of many different polymorphs [20,21].

* Corresponding author at: College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

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

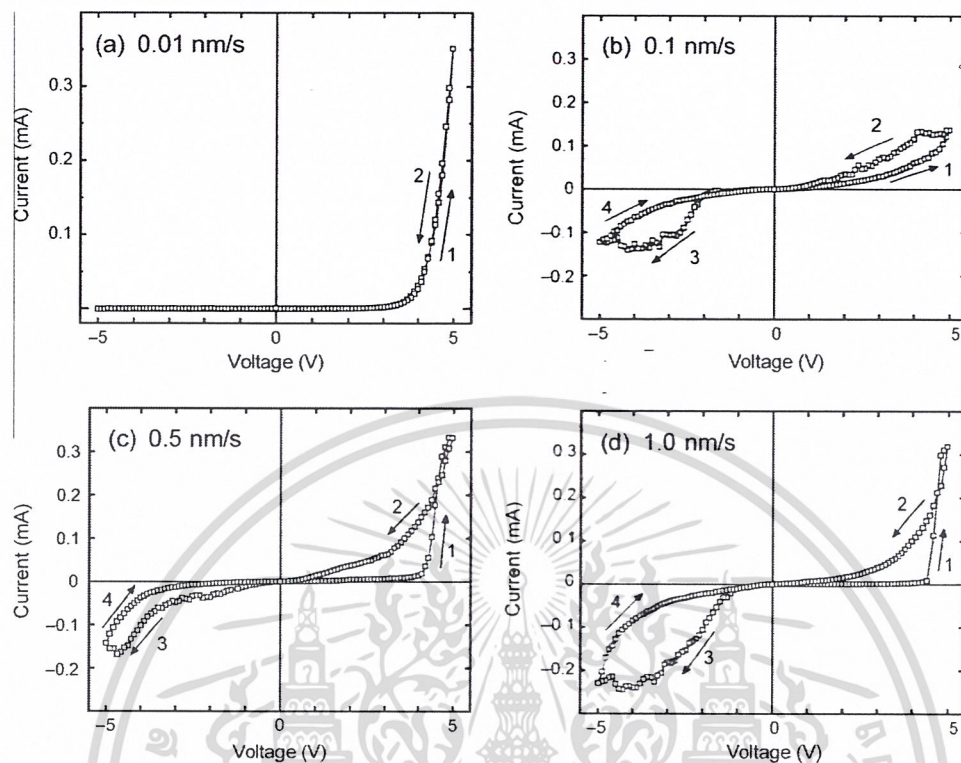


Fig. 1. I–V characteristics of CuPc bistable device with different deposition rate of CuPc layer at (a) 0.01 nm/s, (b) 0.1 nm/s, (c) 0.5 nm/s and (d) 1.0 nm/s.

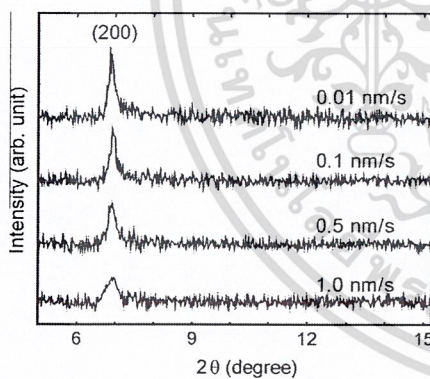


Fig. 2. XRD patterns of CuPc films deposited on glass substrate at fixed film thickness of 100 nm for deposition rate of 0.01 nm/s, 0.1 nm/s, 0.5 nm/s and 1.0 nm/s.

Table 1
Structural parameters (crystalline size, dislocation density and lattice microstrain) of the CuPc films deposited at different deposition rates with fixed film thickness of 100 nm.

Deposition rate (nm/s)	D (nm)	d (10 ¹⁴ lin m ⁻²)	e (10 ⁻³ lin ⁻² m ⁻²)
0.01	67.70	2.18	2.28
0.1	59.22	2.85	2.61
0.5	39.22	6.50	3.94
1.0	26.41	14.34	5.86

Here, we report on the fabrication of the CuPc bistable device with MIM structure at different deposition rate of CuPc layer. The electrical characteristics of the CuPc bistable devices were

investigated by current–voltage measurement. The influence of deposition rate on the structural properties of the CuPc films can be observed with X-ray diffraction pattern and surface morphology measurement.

2. Experimental

The CuPc bistable device was glass/ITO/CuPc/aluminum (Al) structure. Indium tin oxide (ITO) conducting glass with sheet resistance of 10 Ω/□ is used as a substrate. Prior to loading into evaporation chamber, substrates were cleaned using ultrasonic bath of deionize water, acetone, methanol, isopropanol for 15 min and dried with nitrogen gas, respectively. The CuPc powder used in this work was purchased from Aldrich Chem. Co. (purity >97%) and used without films adopted in this study are prepared by thermal evaporation technique with a base pressure of 2 × 10⁻⁶ mbar for both substrates. The deposition rates and thickness of CuPc films were controlled and measured by a thickness controller (Inficon, XTC2). The deposition rate was varied with 0.01 nm/s, 0.1 nm/s, 0.5 nm/s and 1.0 nm/s, respectively, while the thickness of CuPc films was fixed at 100 nm. For ITO/CuPc/Al devices structure, a 100 nm aluminum top electrode with 2 mm × 2 mm was prepared on CuPc layer by thermal evaporation. Therefore, the device had an area of 4 mm². The device fabrication has been done in a 10 k-class clean room. The crystalline structure of CuPc films was studied using X-ray diffraction (XRD) technique (Bruker, D8 Explorer) with Cu Kα radiation source (λ = 0.1542 nm). Surface morphology of CuPc films was investigated using an atomic force microscope (AFM), (SEIKO, SPA400), in non-contact mode. A precision LCR meter (Agilent, E4980A) was used to measure the current–voltage characteristics, impedance characteristics and to monitor the current during the temperature-dependent measurement under a dark condition. For the retention abilities and read/write cycles

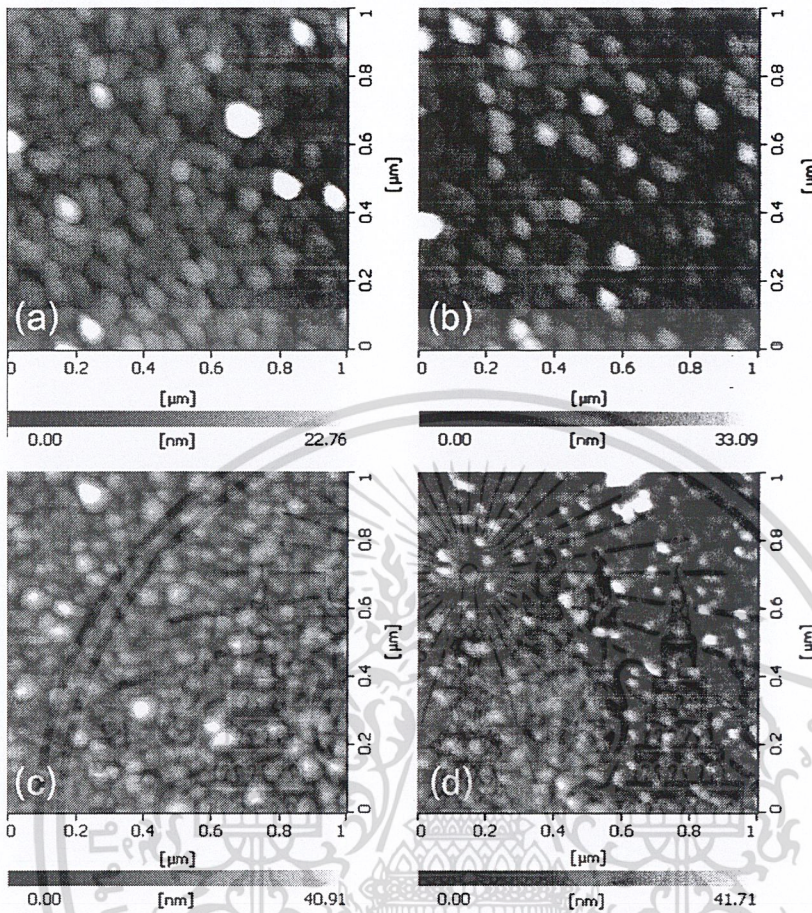


Fig. 3. AFM image of CuPc films at fixed thickness of 100 nm for different deposition rate of (a) 0.01 nm/s, (b) 0.1 nm/s, (c) 0.5 nm/s and (d) 1.0 nm/s.

measurement, a Keithley 2410 was used, which was controlled by the computer program.

3. Results and discussion

Fig. 1 shows the current–voltage (I – V) characteristics for the CuPc bistable device with different deposition rate of CuPc layer. The curve was swept by applying a bias voltage to the bottom electrode (ITO) and grounding the top electrode (Al) with the variations of voltage across the device in a cyclical manner from 0 V to 5 V, 5 V to -5 V and -5 V to 0 V. In case of deposition rate of CuPc layer at 0.01 nm/s, the bistable properties were not observed as shown in Fig. 1a. Interestingly, the I – V curve also shows hysteretic for deposition rate of 0.1 nm/s, 0.5 nm/s and 1.0 nm/s as shown in Fig. 1b–d, respectively. At the initial state, the device initially had low conductivity state (OFF state). When the applied voltage reached a threshold value, the current abruptly increases, which the value of threshold voltage (V_{th}) about +4.5 V, as shown in Fig. 1c and d. The voltage was then swept from +5 V to 0 V, and the different high conductivity state (ON state) emerged. The ON state was retained until the applied voltage reached -5 V. After that, the CuPc bistable device switches OFF to its low conducting state. The devices with high deposition rate clearly show electrical hysteresis behavior, an essential feature of a bistable memory device. The ON/OFF current ratio of the device increases with increasing deposition rate of CuPc layer. This indicates that the storage capability of the device is significantly enhanced with an increase

in the deposition rate. The conductance switching was observed with a maximum ON/OFF ratio ~ 100 at the reading bias of +3 V for the CuPc layer prepared at deposition rate of 1.0 nm/s.

For further analysis, XRD spectra were evaluated. XRD spectra of the CuPc films at the different growth rates are shown in Fig. 2. XRD pattern exhibits a polycrystalline nature, with the major diffraction peak indexed and compared with the standard data in the JCPDS-ICDD. The peak was observed at $2\theta = 6.95^\circ$, which corresponds to the α -phase monoclinic CuPc in the (200) plane [22]. As the deposition rate increases the position of the diffraction peak is not changed, which confirm that the CuPc films have the same crystalline structure. However, the intensity of peak decreases with increasing the film deposition rate, whereas the full width at the half maximum (FWHM) increases. The increase of FWHM can be explained by the increase in the concentration of lattice imperfections, due to the decrease in the crystalline size. Table 1 shows the calculated value of the crystalline size from XRD spectra (D), dislocation density (δ) and strain (ϵ) for different deposition rate of CuPc layer. The crystalline size from XRD spectra (D) was calculated using the Scherrer equation [23],

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

where β is FWHM, k is constant (with a value of 0.94), λ is wavelength of the X-ray radiation and θ is the Bragg angle. The dislocation density (δ) defined as the length of dislocation lines per unit value of crystal, that was evaluated using Williamson and Smallman's formula [24],

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

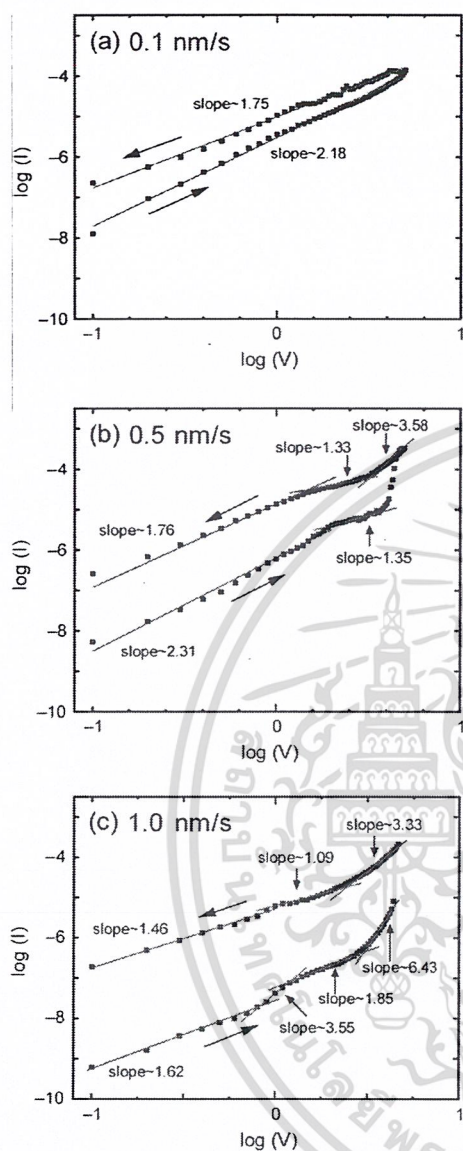


Fig. 4. Comparisons of electrical bistability of CuPc bistable device with different deposition rate of CuPc layer at (a) 0.1 nm/s, (b) 0.5 nm/s and (c) 1.0 nm/s in log–log scale.

$$\delta = \frac{1}{D^2}. \quad (2)$$

The strain function (ε) in the films was calculated using the relation [23],

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda}{D \cos \theta} - \beta \right) \left(\frac{1}{\tan \theta} \right). \quad (3)$$

One can see from Table 1, the crystalline size from XRD was observed to decrease, while the dislocation density and the strain increased with increasing deposition rate. Typically, stress also occurs in the film due to the lattice misfit. Nevertheless, the stress has two components: thermal stress arising from the difference in the expansion coefficient of the film and substrate, and internal stress due to the accumulating effect of the crystallographic flaws built into the films during deposition. The average stress of the deposited films was found to be compression in nature. This compressive stress is due to the grain boundary effect, which is

predominant in polycrystalline films [25]. Moreover, the deposition rate is an important growth parameter for crystalline structure and morphology of the organic films; different deposition rates result from completely different morphology of the CuPc films.

The AFM images of CuPc films prepared at different deposition rates were investigated. AFM is one of effective ways for the surface analysis due to its high resolution and powerful analysis software. Fig. 3 shows the comparison of surface morphology of CuPc films formed on the glass substrate. It is known that a very low deposition rate of organic molecules generally results in the much larger grain size [26]. Similarly, the CuPc film prepared at deposition rate of 0.01 nm/s is found to consist of large crystal grains, as shown in Fig. 3a. When the deposition rate is increased, the size of crystal decreases and the morphology of the films gradually changes from that of large-grains to fine-grains as shown in Fig. 3b–d. To perform a quantitative comparison of the crystalline size between AFM and XRD, the crystalline size from AFM was estimated directly from AFM images by image processing software. The CuPc films from AFM images at the deposition rate 0.01, 0.1, 0.5 and 1.0 nm/s have the crystalline size 66.89, 58.51, 40.68 and 28.27 nm, respectively. The changes of crystalline size from AFM measurement are corresponding with the crystalline size from XRD spectra in Table 1. It is established that metal atoms can migrate inside the organic layer during the evaporation of a top electrode, and such an interdiffusion increases if the surface of organic film shows a larger grain size [27]. Actually, the metal migration is one of the mechanisms to explain the resistive switching behaviors [28]. However, the switching behaviors of our devices clearly occurred on a high deposition rate of CuPc layer. Thus, the switching mechanism of the CuPc bistable device might be mainly caused by other mechanisms, which will be discussed later.

To explain the switching characteristics, the conduction mechanisms of the CuPc bistable devices with different deposition rate were also investigated. Fig. 4a–c plot I – V curves, which switching from OFF state to ON state in the positive voltage region, on logarithmic scales in the ITO/CuPc(0.1 nm/s)/Al, ITO/CuPc(0.5 nm/s)/Al and ITO/CuPc(1.0 nm/s)/Al devices, respectively. The relations for all devices have the rather similar gradient. Accordingly, the current depends linearly on the square of voltage, which corresponds to Child's law. When the applied voltage reaches to a V_{th} (+4.5 V), the current increases rapidly as clearly shown in Fig. 4b and Fig. 4c. The conduction behavior in this system is consistent with the space charge limited current (SCLC) mechanism [29]. The later gradient in the OFF state may indicate the further filling of the traps on the deep level [29,30]. The above observations demonstrate that the conductive switching behavior of the CuPc bistable devices involve the bulk trap-controlled SCLC mechanism as previously reported in various organic and inorganic materials [30,31]. Therefore, the carrier transport could be ascribed to a field-induced arrangement of structural defects [14,32,33]. Structural defects such as oxygen vacancies, dislocations and grain boundaries, which are inevitable for the polycrystalline CuPc layer, act as trap centers for charge carriers and cause the trap-controlled SCLC transport behavior. Grain boundaries and dislocations make it easy for the point defects to diffuse in a high electric field. It is also found that the ON/OFF current ratio increases when the dislocation density increases by increasing deposition rates, as shown in Fig. 4a–c. For the case of $V < V_{th}$, some carriers are injected and trapped in CuPc layer, which corresponds to a low conductivity state of the device. In case of the applied bias had been large enough ($V > V_{th}$), the traps were filled and the device could be changed to a high conductivity state. When a negative voltage was applied, the trapped carriers are released and neutralized by injected holes and electrons. Then, the erasing process was performed. That is to say, the defect in the CuPc layer plays a critical role of carrier trapping and de-trapping in the device.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

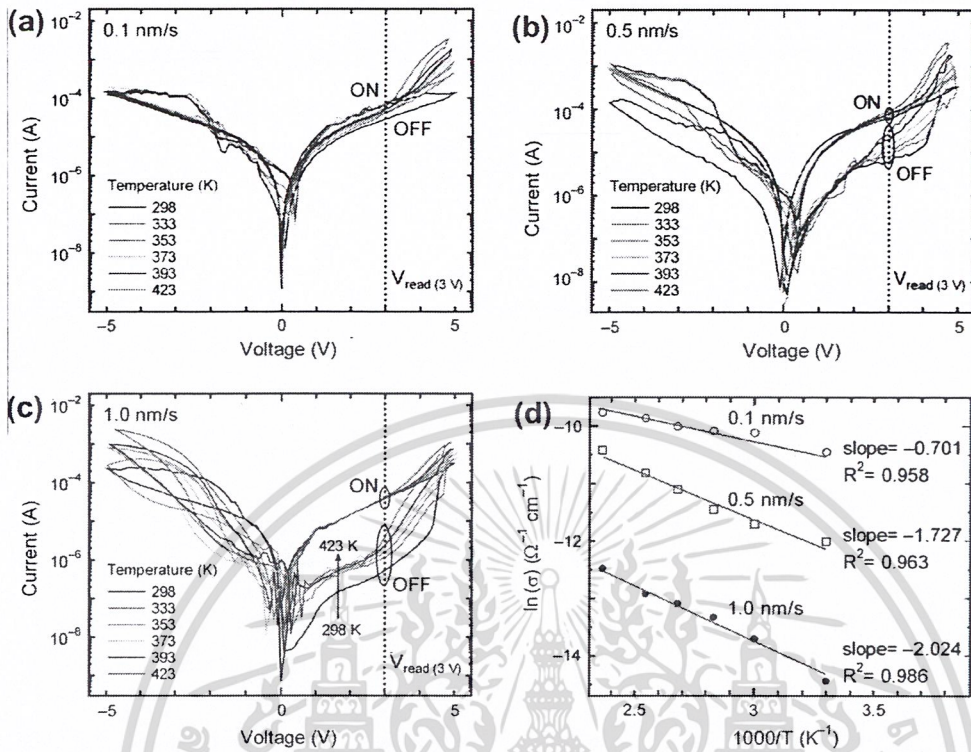


Fig. 5. Log I - V curves of CuPc bistable device at different temperatures; deposition rate of CuPc layer at (a) 0.1 nm/s, (b) 0.5 nm/s and (c) 1.0 nm/s. (d) The conductivity as a function of reverse temperature of the device operated in OFF state at +3 V bias.

Further investigation of the transport mechanism is obtained from temperature-dependent measurement with different deposition rate. The I - V characteristics of the device were performed at various temperatures from room temperature to 423 K, as shown in Fig. 5a–c. These measurements were actually performed to confirm the semiconductor nature of the state. The current of both states increases with increasing temperature, whereas the current ratio of the device decreases due to the current in the OFF state shows strong temperature dependence. To investigate the mechanisms of the memory characteristics caused from the trapping center density in the CuPc layer, the conductivity of the CuPc bistable device in the OFF state was measured with various temperatures. The activation energy (E_a) of the trapping centers could be determined from the Arrhenius equation expressed as followed [34];

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4)$$

where the σ is the conductivity, σ_0 is the conductivity at 0 K, k is the Boltzmann's constant (8.617×10^{-5} eV/K), and T is the absolute temperature. Fig. 5d shows the Arrhenius plot which was obtained from the calculation of the current value at +3 V bias. The activation energy of the trapping centers of the CuPc bistable device at the deposition rate of CuPc layer 0.1 nm/s, 0.5 nm/s and 1.0 nm/s are 0.060 eV, 0.148 eV and 0.174 eV respectively, was obtained from the slope of the conductivity versus inverse temperatures. The thermally activated conduction in the OFF state of CuPc bistable memories confirms that the material CuPc behaves semiconductor like [35]. These findings together with the nonlinear I - V curves indicate a thermally activated hopping between isolated states as the dominating mechanism for conduction in the device. This result indicates that the current in the OFF state is not simply due to conduction by metallic filaments, or tunnel transport, unlike what is observed for polymer-based metal/polymer/metal cells [8].

Generally, the metallic filaments resulting from local fusing, migrating or sputtering of electrodes through the films [8,12,36,37] and the metallic conduction nature of the state is increasing resistance with increasing temperature [12]. Thus, experimental results supported that the memory characteristics of the CuPc bistable devices were determined by the induced traps could be caused by defects in the CuPc active layer.

In addition, we measured impedance spectra of the both ON and OFF states of the CuPc bistable device prepared at deposition rate of 1.0 nm/s. The complex ac impedance measurements were done in Z - θ mode for a varying frequency (f), from 20 Hz to 1 MHz with an ac drive bias of 50 mV. A constant dc bias was applied at read voltage (+3 V) before and after writing voltage (+5 V), superimposed on the ac bias. Cole–Cole plots of the measurements are depicted in Fig. 6, showing semicircles that can be described by

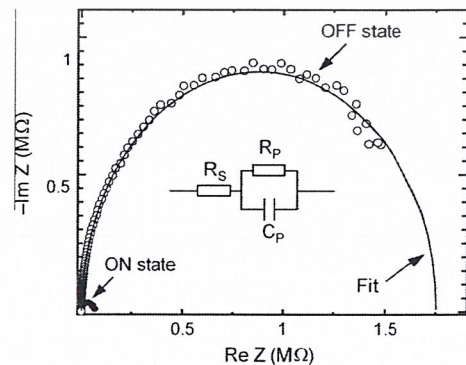


Fig. 6. Impedance spectroscopy (Cole–Cole plot) of ON and OFF state of CuPc bistable device measure at room temperature with a bias of +3 V. Scatters are the measured data and lines are the fits with the equivalent circuit given in the inset.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

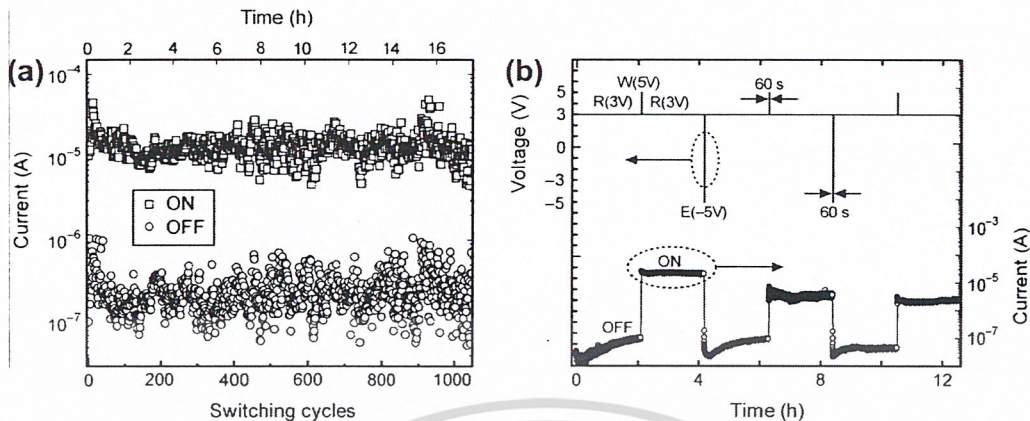


Fig. 7. (a) Switching reliability of CuPc bistable device for a “write–read–erase–read” sequence. (b) Demonstration of data readout in a write once/continuous read and an erase once/continuous read operation (write/erase pulse width = 60 s, retention time >2 h).

equivalent circuit shown in the inset. In the RC circuit, R_S corresponds to the series resistance; R_p and C_p are the resistance and capacitance of the device. The values of R_p in the ON and OFF state are 6.75×10^4 and 1.75×10^6 , respectively. The different semicircles, about a factor of 26, which are similar to the differences measured in the I – V characteristics. This shows that the memory effect is due to resistive switching.

One of the promising applications of the CuPc bistable device is the bistable rewritable memory. Therefore, programming cycle endurance measurement was performed for the ON and OFF states by applying repetitive write–read–erase–read cycles at room temperature in darkness. The voltage pulses of the writing, the erasing, and the reading processes are +5 V (30 s), –5 V (30 s), and +3 V (0.3 s), respectively. We have achieved over 1000 switching cycles in the CuPc bistable device at deposition rate of 1.0 nm/s, as shown in Fig. 7a. The current in the ON state at the reading pulse is observed at about 10^{-5} A, whereas the current in the OFF state currents at the reading pulse are between 10^{-6} A and 10^{-8} A. However, the fluctuations of both states are appeared throughout switching cycles, it may be due to the instability of material. Moreover, one of the key requirements for memory application device is the retention ability. Reliability of the stored conductivity state is studied for once write–erase/continuous readout. The width of write/erase pulse is increased to 60 s for the stability of readout. Fig. 7b shows the time dependence of the current corresponding to the OFF and ON states, which show an exponential increase especially after switching to the OFF state. That might be due to a participation of slow solid state electrochemical processes. However, the results show that both states are stable for at least 2 h. Therefore, the CuPc single layer structure showed the important characteristics of the bistable device for a candidate of the practical memory device.

4. Conclusions

The effect of the structural of CuPc films on the performance of ITO/CuPc/Al bistable device was investigated, that was observed the bistability depend on the deposition rate of CuPc layer. The device exhibited two distinctive states of conductivity with the maximum ON/OFF current ratio ~ 100 at reading voltage of +3 V. The structural properties of CuPc films have been revealed. The degree of crystallinity and the grain sizes of the CuPc are found to decrease with increasing deposition rate, whereas the dislocation density and strain increased. The carrier transport could be ascribed to a field-induced arrangement of structural defects in CuPc layer. To

understand the behavior in the device, the conduction mechanism in the device can be proposed by the SCLC model. Using the Arrhenius equation, the energy level of the induced trapping centers caused by the defects in the CuPc layer was calculated. Reliability studies for once write–erase/continuous read operation and write–read–erase–read endurance are presented. It is shown that the stored conductivity state is rather stable and can be reproduced. The cycling endurance number of ON/OFF switching for the CuPc bistable device is above 1000.

Acknowledgments

This work has partially been supported by the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Center of Excellence Network. The supports from Thailand Toray Science Foundation are gratefully acknowledged.

References

- [1] Fukagawa H, Watanabe K, Tokito S. *Org Electron* 2009;10:798.
- [2] Liu Y, Hu W, Qiu W, Xu Y, Zhou S, Zhu D. *Sens Actuat B* 2001;80:202.
- [3] Rajaputra Suresh, Sagi Gayatri, Singh Vijay P. *Sol Energy Mater Solar Cells* 2009;93:60.
- [4] Gregor LV. *Thin Solid Films* 1968;2:235.
- [5] Lee Po-Tsung, Chang Tzu-Yueh, Chen Szu-Yuan. *Org Electron* 2008;9:916.
- [6] Reddy VS, Karak S, Ray SK, Dhar A. *Org Electron* 2009;10:138.
- [7] Tang MH, Zeng ZQ, Li JC, Wang ZP, Xu XL, Wang GY, et al. *Sol-State Electron* 2011;63:100.
- [8] Colle Michael, Buchel Michael, de Leeuw Dago M. *Org Electron* 2006;7:305.
- [9] Lee SJ, Koo JR, Kwon SJ, Kim YK. *Microelectron Eng* 2008;85:2388.
- [10] Salaoru I, Paul S. *Thin Solid Films* 2010;519:559.
- [11] Ham JH, Oh DH, Cho SH, Jung JH, Kim TW, Ryu ED, et al. *Appl Phys Lett* 2009;94:112101.
- [12] Choi BJ, Jeong DS, Kim SK, Rohde C, Choi S, Oh JH, et al. *J Appl Phys* 2005;98:033715.
- [13] Potember RS, Poehler TO, Cowan DO. *Appl Phys Lett* 1979;34:405.
- [14] Beck A, Bednorz JG, Gerber Ch, Rossel C, Widmer D. *Appl Phys Lett* 2000;77:139.
- [15] Bandyopadhyay A, Pal AJ. *Appl Phys Lett* 2004;84:999.
- [16] Senthilarasu S, Hahn YB, Soo-Hyoung Lee. *J Appl Phys* 2007;102:043512.
- [17] Ikushima AJ, Kanno T, Yoshoda S, Maeda A. *Thin Solid Films* 1996;273:35.
- [18] Kim JY, Bard AJ. *Chem Phys Lett* 2004;383:11.
- [19] Siviero F, Coppede N, Pallaro A, Taurino AM, Toccoli T, Siciliano P, et al. *Sens Actuat B* 2007;126:214.
- [20] Semthilarasu S, Hahn YB, Lee SH. *J Mater Sci – Mater Electron* 2008;19:482.
- [21] Tunhoo B, Nukeaw J. *Mater Res Inno* 2009;13:145–8.
- [22] Bao Z, Lovinger AJ, Dodabalapur A. *Appl Phys Lett* 1996;69:3066.
- [23] Venkatachalam S, Mangalaraj D, Narayandass Sa K. *Phys B* 2007;393:47.
- [24] Williamson GB, Smallman RC. *Philos Mag* 1956;1:34.
- [25] Hamm FA, Van Norman E. *J Appl Phys* 1948;19:1097.
- [26] Lin J, Ma D. *J Appl Phys* 2008;103:024507.
- [27] Durr AC, Schreiber F, Kelsch M, Carstjanen HD, Dosch H, Seeck OH. *J Appl Phys* 2003;93:5201.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] Jeong HY, Kim JY, Yoon TH, Choi SY. *Curr Appl Phys* 2010;10:e46–9.
- [29] Lampert MA, Mark P. *Current inject solids*. New York: Academic; 1970.
- [30] Wang Q, Shang DS, Wu ZH, Chen LD, Li XM. *Appl Phys A: Mater Sci Process* 2007;86:357.
- [31] Ma D, Hummelgen IA, Jing X, Hong Z, Wang L, Zhao X, et al. *J Appl Phys* 2000;87:312.
- [32] Szot K, Speier W, Bihlmayer G, Waser R. *Nat Mater* 2006;5:312.
- [33] Park WJ, Shin HS, Ahn BD, Kim GH, Lee SM, Kim KH, et al. *Appl Phys Lett* 2008;93:083508.
- [34] Bambery KR, Fleming RJ, Holboll JT. *J Phys D: Appl Phys* 2001;34:3071.
- [35] Reis a FT, Mencaraglia D, Ould Saad S, Seguy I, Oukachmih M, Jolinet P, et al. *J Non-Crystal Solids* 2004;338–340:599–602.
- [36] Hwang W, Kao KC. *J Chem Phys* 1974;60:3845.
- [37] Dearnaley G, Morgan DV, Stoneham AM. *J Non-Crystal Solids* 1970;4:593.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกรกช อ่อนละอ
วัน เดือน ปีเกิด	14 มิถุนายน 2528 ที่จังหวัดกาญจนบุรี
ที่อยู่	180 หมู่ 11 ตำบลหนองขาว อำเภот่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี 71110
ประวัติการศึกษา	2546 มัธยมศึกษา โรงเรียนวิสุทธิรังษี จังหวัดกาญจนบุรี 2550 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาเอก สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัย นาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 โดยได้รับทุนการศึกษา จากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ

- **K. Onlaor**, S. Khantham, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Charge Transfer Mechanism in Organic Memory Device*”, **Advanced Materials Research**, 93-94 (2010) 235-238. (SCOPUS)
- **K. Onlaor**, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Electrical bistability of tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃)/ZnSe organic-inorganic bistable device*”, **Current Applied Physics**, 12 (2012) 331-336. (IF 2010: 1.740)
- **K. Onlaor**, B. Tunhoo, P. Keeratithiwakorn, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Electrical bistable properties of copper phthalocyanine at different deposition rates*”, **Solid-State Electronics**, 72 (2012) 60-66. (IF 2010: 1.438)

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับชาติ

- **K. Onlaor**, A. Chanhom, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Organic bistable memory device*”, **Thai Journal of Physics Series 5** (2010) 407-409.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- **K. Onlaor**, A. Chanhom, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Organic bistable memory device*”, **Siam Physics Congress (SPC 2009)**, 19-21 March 2009, Phetchburi, Thailand.
- **K. Onlaor**, S. Khantham, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Charge Transfer Mechanism in Organic Memory Device*”. **Functionalized and Sensing Materials (Fusem 2009)**, 7-9 December 2009, Bangkok, Thailand.
- **K. Onlaor**, B. Tunhoo, T. Thiwawong and J. Nukeaw, “*Conduction Mechanisms in Organic-Inorganic Bistable Memory Device*”. **Siam Physics Congress (SPC 2012)**, 9-12 May 2012, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้