

อุปกรณ์หน่วยความจำสามสถานะที่โค้งงอได้จากอนุภาคนาโนเงิน Flexible Multilevel Memory Devices Based on Silver Nanoparticles

พิมพร อ่อนละอ¹ และ กรกช อ่อนละอ^{2*}

Pimporn Onlaor¹ and Korakot Onlaor²

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

²College of Nanotechnology, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

วันที่ส่งบทความ : 11 มีนาคม 2562 วันที่แก้ไขบทความ : 11 มีนาคม 2563 วันที่ตอบรับบทความ : 13 เมษายน 2563

Received: 11 March 2019, Revised: 11 March 2020, Accepted: 13 April 2020

บทคัดย่อ

อุปกรณ์หน่วยความจำสามสถานะถูกสร้างขึ้นจากอนุภาคนาโนเงิน (Ag NPs) โดยการนำอนุภาคนาโนเงินฝังตัวในพอลิเมอร์ poly (9-vinylcarbazole) (PVK) ในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับพลาสติก จากผลการศึกษาพบว่าสมบัติทางไฟฟ้า (I-V) ของตัวอุปกรณ์หน่วยความจำแสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าสถานะได้สามสถานะคือ สถานะปิด (OFF-state) สถานะเปิด (ON-state) และสถานะกลาง (INTERM-state) ซึ่งอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นประพฤติตัวเป็นหน่วยความจำประเภท non-volatile rewritable memory หรือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเขียนซ้ำได้แบบไม่ลบเลือน โดยมีเงื่อนไขที่เหมาะสมของอัตราส่วนอนุภาคนาโนเงินที่ได้จากการศึกษาคือร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลกระทบและความสามารถในการโค้งงอจึงได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างการโค้งงอ จากผลการทดลองจำนวนรอบในการโค้งงอพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถรักษาสถานะการนำไฟฟ้าในสถานะที่แตกต่างกันได้โดยไม่เสื่อมประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : หน่วยความจำ พอลิเมอร์ อนุภาคนาโนเงิน

Abstract

Multilevel memory devices were achieved using silver nanoparticles (Ag NPs) embedded in poly(9-vinylcarbazole) (PVK) with a structure of ITO/PVK:Ag NPs/Al on plastic substrate. The current-voltage (I-V) curves of the memory devices showed different states of current (OFF-, ON- and INTERM-states). The memory devices exhibited non-volatile rewritable memory characteristics. The optimal Ag NPs concentration was found at 6 wt%.

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: korakot.onlaor@gmail.com

To explore the influence of bending on flexible device performance, the substrates were bended during operation. The number of cycle test showed that the fabricated flexiblemultilevel memory device could retain conductivity in the different states without deterioration.

Keywords: Memory, Polymer, Nanoparticle, Silver

1. บทนำ

เทคโนโลยีหน่วยความจำเป็นเทคโนโลยีที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับโลกในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น สมาร์ทโฟน กล้องถ่ายภาพ คอมพิวเตอร์ และอื่น ๆ [1] ทำให้หน่วยความจำได้เข้ามาเป็นส่วนสำคัญในการเก็บข้อมูลในการทำงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาเทคโนโลยีหน่วยความจำต่อการนำไปใช้ เช่น บัตรอิเล็กทรอนิกส์ ป้ายอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ ซึ่งตัวอย่างที่กล่าวมานี้ส่วนใหญ่มีความต้องการใช้หน่วยความจำที่สามารถโค้งงอได้ ดังนั้นในหลายปีที่ผ่านมาจึงได้มีการศึกษาใหม่ ๆ เกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์หน่วยความจำเกิดขึ้น นั่นคือหน่วยความจำจากสารอินทรีย์และหน่วยความจำจากวัสดุพอลิเมอร์ โดยมุ่งพัฒนาถึงโครงสร้างอย่างง่ายของตัวอุปกรณ์ที่มีต้นทุนต่ำ ตลอดจนกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เช่น วิถีปรีน [2] การพ่นเคลือบ [3] การใช้แม่แบบขนาดนาโน [4] และอื่น ๆ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างบนฐานรองรับพลาสติกได้ และยังสามารถสร้างได้ที่อุณหภูมิห้อง และจากที่ผ่านมามีงานวิจัยในวัสดุที่มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องได้แก่วัสดุประกอบจากการใช้อิออนิกนาโนผสมกับพอลิเมอร์ ในโครงสร้าง โลหะ/ฉนวน/โลหะ [5]-[9] เนื่องจากความหลากหลายของวัสดุทั้งพอลิเมอร์และอนุภาคนาโนที่มีให้เลือกศึกษา

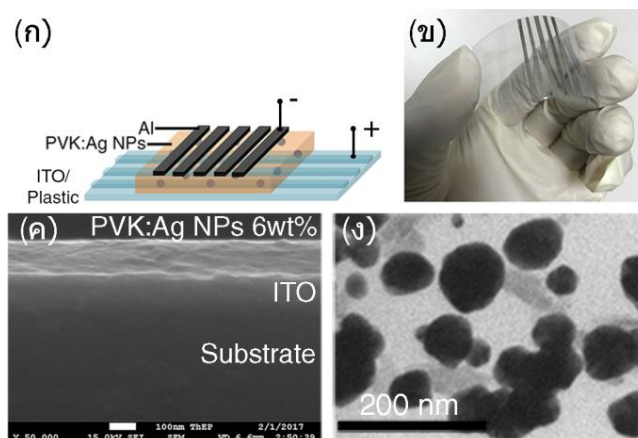
พอลิไวนิลคาร์บาโซล หรือ Poly (9-vinylcarbazole) (PVK) เป็นวัสดุพอลิเมอร์อินทรีย์ มีคุณสมบัติเด่นคือการเคลื่อนที่ของโฮล (hole transport) ซึ่งได้มีการศึกษาทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์ทางด้านออปติคส์ ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิไวนิลคาร์บาโซล มีระดับพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ (HOMO) และระดับพลังงานต่ำที่สุดที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ (LUMO) ประมาณ -5.5 และ -2 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

สำหรับอนุภาคนาโนเงิน (Ag nanoparticles, Ag NPs) เป็นอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่มอนุภาคนาโนโลหะ อนุภาคนาโนเงินปัจจุบันได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนเงินมีคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่น่าสนใจ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์สามารถนำไปใช้สำหรับฆ่าเชื้อ และผลิตเครื่องมือสำหรับการผ่าตัด ทางอุตสาหกรรมใช้อนุภาคนาโนเงินเป็นสารเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำอนุภาคนาโนเงินไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษา และสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำที่เตรียมจากวัสดุประกอบโดยวิธีการหมักเคลือบจากอนุภาคนาโนเงินที่ผสมกับพอลิไวนิลคาร์บาโซล (PVK:Ag NPs) ซึ่งนับเป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถเตรียมได้บนฐานรองรับพลาสติกที่อุณหภูมิห้อง และอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นสามารถโค้งงอได้

2. วิธีการทดลอง

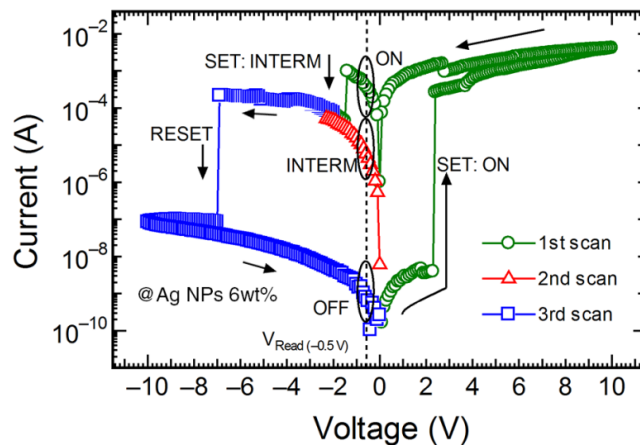
ฐานรองรับพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ polyethylene naphthalate (PEN) ที่เคลือบด้วย ITO จากบริษัท Peccell Technologies จะมีขั้นตอนการทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ฝุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนบนพื้นผิว โดยขั้นตอนการทำความสะอาดเริ่มจากล้างฐานรองรับพลาสติกด้วยน้ำไร้ประจุ เมทานอล และไอโซโพรพานอล ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาทีในแต่ละขั้นตอน หลังจากนั้นเป่าให้แห้ง



รูปที่ 1. (ก) โครงสร้างของอุปกรณ์บนฐานรองรับพลาสติก (ข) ภาพถ่ายอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับพลาสติกที่สร้างขึ้น (ค) ภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มบาง PVK:Ag NPs และ (ง) ภาพ TEM แสดงลักษณะของอนุภาคนาโนเงิน

หลังจากนั้นทำการเตรียมอุปกรณ์จากเงื่อนไขที่เหมาะสม โดยใส่อนุภาคนาโนเงินลงไปให้อัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก [10] ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับพลาสติกและอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้มีขนาดพื้นที่ทำงานอยู่ที่ 2 mm^2 สำหรับรูปที่ 1 (ค) แสดงภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มบาง PVK:Ag NPs หลังจากทำการหมุนเคลือบบนฐานรองรับพลาสติก และรูปที่ 1 (ง) แสดงลักษณะของอนุภาคนาโนเงินที่กระจายตัวในสารละลาย PVK

3. ผลการทดลองและวิจารณ์



รูปที่ 2. ลักษณะค่ากระแส-แรงดันของอุปกรณ์หน่วยความจำ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับพลาสติกแสดงดังรูปที่ 2 โดยในการวัดค่ากระแสกับความต่างศักย์จะทำการป้อนค่าความต่างศักย์ในช่วง +10 ถึง -10 โวลต์ โดยในส่วนของการวัดค่ากระแสที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไม่แสดงสมบัติของอุปกรณ์หน่วยความจำออกมาให้เห็น (ไม่ได้นำเสนอสแกน) แต่เมื่อมีการใส่อนุภาคนาโนเงินลงไปร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจะสามารถแสดงการเปลี่ยนสถานะการนำไฟฟ้าได้

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าสถานะเริ่มต้นของอุปกรณ์จะมีสถานะความนำทางไฟฟ้าต่ำ (1st scan) ซึ่งก็คือสถานะปิด (OFF-state) ของอุปกรณ์ โดยแสดงทางด้านแรงดันบวกของรูปที่ 2 แต่เมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้ากับอุปกรณ์เพิ่มขึ้นถึงค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มหรือแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage, V_{th} หรือ SET-ON) การฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในตัวอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและทำให้อุปกรณ์เปลี่ยนเป็นการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น อุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นจะยังคงรักษาสถานะความนำสูงไว้ได้ถึงแม้จะลดแรงดันกลับถึง 0 โวลต์ สำหรับการป้อนแรงดันด้านลบ จะพบว่าจากแรงดัน 0 ถึง -10 โวลต์ ค่าความนำจะยังคงถูกรักษาไว้จนกระทั่งให้แรงดันจนถึงค่าแรงดันเปลี่ยนสถานะกลาง (SET-INTERM) หลังจากนั้นหากมีการป้อนแรงดันลบอีกครั้ง (2nd scan) ค่าความนำจะอยู่ที่สถานะกลาง (intermediate state: INTERM) และเมื่อมีการป้อนแรงดันที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าเปลี่ยนสถานะปิดของอุปกรณ์ ค่าความนำจะเปลี่ยนจากสถานะ INTERM กลับไปเป็นสถานะ OFF-state อีกครั้ง (3rd scan)

สำหรับกลไกที่ทำให้แสดงความเป็นหน่วยความจำได้นั้นอธิบายได้จาก เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านแรงดันบวก อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปในชั้น PVK:Ag NPs ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปจะยังไม่สามารถทำให้เกิดกระแสไหลได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกดักจับในชั้นของ PVK:Ag NPs จากสถานะดักจับ (Trap states) ที่เกิดขึ้นระหว่างระดับพลังงานที่ต่างกันของ PVK และ Ag NPs ทำให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงขั้วไฟฟ้าอีกด้านหนึ่งได้ จึงทำให้เกิดสถานะความนำไฟฟ้าต่ำ

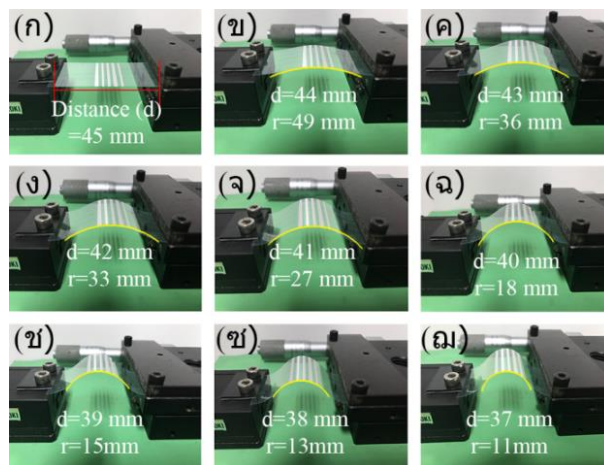
เมื่อแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ระดับพลังงานจะเกิดการโค้งงอ (bending of energy band) ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า Al เข้าไปในชั้น PVK:Ag NPs และถูกดักจับได้ง่ายยิ่งขึ้น หลังจากนั้นเมื่อให้แรงดันไปจนถึงตำแหน่ง SET-ON จะทำให้สถานะดักจับเต็ม จึงทำให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่เป็นอิสระจากสถานะดักจับและสามารถเคลื่อนที่จนเกิดกระแสไหลได้ ซึ่งก็คือกระบวนการเขียนข้อมูลในอุปกรณ์หน่วยความจำ และจะเข้าสู่สถานะ ON

หลังจากที่อุปกรณ์เข้าสู่สถานะ ON อุปกรณ์จะยังคงสถานะดังกล่าวไว้ถึงแม้ว่าจะลดแรงดันลงเนื่องจากสถานะดักจับนั้นเต็มไปด้วยอิเล็กตรอนจึงทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า Al สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้โดยสะดวก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเป็นคุณสมบัติของ non-volatile memory หรืออุปกรณ์หน่วยความจำที่สามารถเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้โดยไม่ต้องมีกระแสไฟฟ้าเลี้ยงวงจร

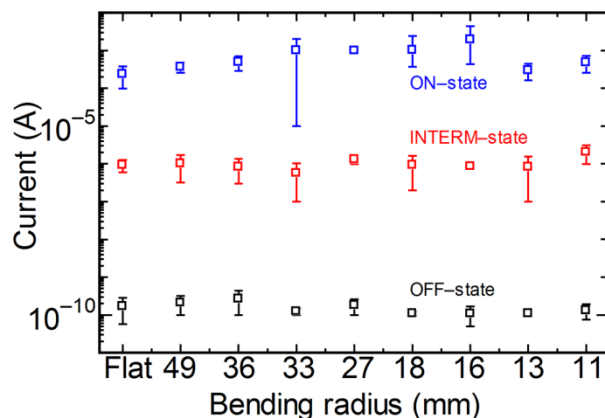
ในขณะที่อุปกรณ์ถูกป้อนแรงดันด้านลบ ในสถานะนี้อุปกรณ์จะยังคงรักษาสถานะ ON ไว้เนื่องจากสถานะดักจับจะมีอิเล็กตรอนเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านลบเพิ่มขึ้น ตัวอุปกรณ์จะถูกเปลี่ยนจากสถานะ ON ไปเป็นสถานะ INTERM เนื่องจากมีการปล่อยอิเล็กตรอนที่ดักจับไว้ออกมา หลังจากนั้นหากอุปกรณ์ถูกป้อนแรงดันลบเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดัน RESET ตัวอุปกรณ์จะเกิดการเปลี่ยนสถานะอีกครั้งจากสถานะ INTERM กลับไปเป็นสถานะ OFF เป็นผลเนื่องจากอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากชั้นดักจับโดยสมบูรณ์ [10]-[13]

เพื่อยืนยันความสามารถในการโค้งงอของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น จึงทำการนำอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับพลาสติกไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้การโค้งงอที่ระยะการโค้งงอแตกต่างกัน สำหรับการหาความสัมพันธ์โค้งงอ แสดงดังรูปที่ 3 (ก-ฉ)

รูปที่ 3 แสดงการทดสอบการโค้งงอฐานรองรับ โดยอ้างอิงจากระยะของขอบอุปกรณ์ด้านหนึ่งถึงขอบอุปกรณ์อีกด้านหนึ่ง (d) จากนั้นทำการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์แบบต่อเนื่องที่แรงดัน -0.5 V จากระยะ $d=45$ mm (flat) [รูปที่ 3 (ก)] และลดลงไปจนถึงระยะ $d=37$ mm แสดงดังรูปที่ 3 (ฉ) โดยในแต่ละระยะการโค้งงอจะทำการวัดค่าความสัมพันธ์โค้งงอ (r) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเครียด โดยมีความสัมพันธ์คือ เมื่อระยะ d ลดลงจะทำให้ระยะ r ลดลง



รูปที่ 3. การหาความสัมพันธ์โค้งงอสำหรับการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์หน่วยความจำ



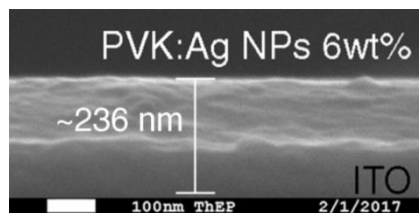
รูปที่ 4. ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของอุปกรณ์หน่วยความจำบนฐานรองรับที่โค้งงอได้ ทดสอบโดยการงอที่มีการเพิ่มระยะการโค้งงอ

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์หน่วยความจำยังคงแสดงความสามารถในการเปลี่ยนสถานะออกมาได้เป็นอย่างดีแม้ว่าจะอยู่ในสถานะการโค้งงอของฐานรองรับ โดยแสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยที่มาจากการทดสอบของอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน 5 ตัว และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามยังคงเห็นการกระจายตัวของค่ากระแสเกิดขึ้น โดยน่าจะมีสาเหตุหลักมาจากความเครียดเชิงกลที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์มจากการโค้งงอ โดยเฉพาะคุณสมบัติของซิลิโคนอลูมิเนียมที่มีความแข็งแต่เปราะ

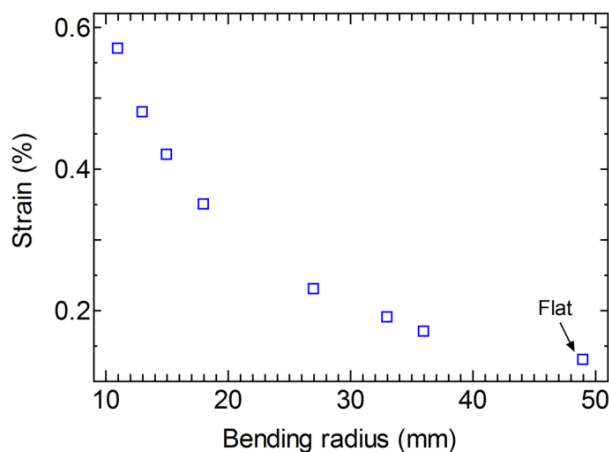
จากข้อมูลรัศมีการโค้งงอที่ได้ จะถูกนำมาคำนวณหาค่าความเครียดจากการโค้งงอ แสดงดังสมการที่ 1 [12]-[13]

$$\text{strain} = \frac{(\text{substrate thickness}) + (\text{total film thickness})}{2 \times (\text{bending curvature radius of the substrate})} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ Strain คือ ค่าความเครียด หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นความสามารถที่อุปกรณ์ทนได้เมื่อมีการโค้งงอ Substrate thickness คือ ความหนาของฐานรองรับ Total film thickness คือ ความหนาของชั้นฟิล์มบางรวมทั้งหมด (ITO, PVK และ Al) และ Bending curvature คือ รัศมีความโค้งขณะเกิดการโค้งงอ



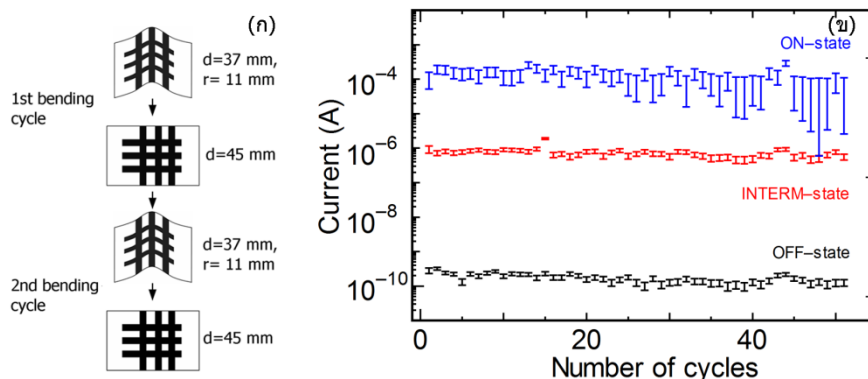
รูปที่ 5. ค่าความหนาของชั้น ITO และ PVK:Ag NPs



รูปที่ 6. ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์ระหว่างโค้งงอ

จากสมการที่ (1) จะต้องทราบความหนาของชั้นฟิล์มบางที่สร้างขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นขั้วไฟฟ้า Al มีความหนาคงที่ 100 nm จากระบบตรวจวัดความหนาของระบบประเหยสารด้วยความร้อนที่มีค่าความผิดพลาด ± 0.1 nm ในขณะที่ความหนาของฐานรองรับ คือ 0.125 mm (ข้อมูลจากผู้ผลิต : Peccell Technologies) โดยความหนาของขั้วไฟฟ้า ITO และชั้น PVK:Ag NPs แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งมีค่าประมาณ 236 nm ดังนั้นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการโค้งงอที่ได้จากสมการที่ 1 ได้ถูกแสดงดังรูปที่ 6

จากข้อมูลร้อยละความเครียดที่เกิดจากการโค้งงอ จะอยู่ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 0.57 ซึ่งอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นยังคงสามารถแสดงสมบัติที่แตกต่างกันทั้งสามสถานะได้ จะพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าร้อยละของความเครียดคือค่าความโค้งงอ โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นพบว่าค่าร้อยละของความเครียดจะอยู่ในช่วง 0.5-1.2 [11]



รูปที่ 7. (ก) ลักษณะการตรวจวัดสมบัติการโค้งงอแบบนักรอบ และ (ข) เสร็จรภาพต่อการเปลี่ยนสถานะของตัวอุปกรณ์ในการทำซ้ำภายหลังจากการโค้งงอ (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากอุปกรณ์ 3 ตัว)

จากผลการทดสอบความสามารถในการโค้งงอของฐานรองรับที่ระยะแตกต่างกัน (รัศมีความโค้งแตกต่างกัน) ทำให้ทราบความสามารถของระยะในการโค้งงอ ดังนั้นในการทดสอบขั้นต่อไปจะเป็นการทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของตัวอุปกรณ์ภายหลังการโค้งงอ โดยนำมาทำการทดสอบที่ระยะ $d=37$ mm หรือที่รัศมีความโค้งงอ 11 mm ที่ได้แสดงในรูปที่ 3 (ฉ) ซึ่งเป็นระยะมากที่สุดที่อุปกรณ์ยังคงสามารถแสดงสมบัติของหน่วยความจำออกมาได้ โดยขั้นตอนการนับจำนวนครั้งแสดงดังรูปที่ 7 (ก)

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะของอุปกรณ์ในแต่ละรอบของการโค้งงอมีการให้ค่ากระแสของแต่ละสถานะที่ใกล้เคียงกัน โดยจากการทำการโค้งงอซ้ำ 50 รอบ จากอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน 3 ตัว พบว่าอุปกรณ์หน่วยความจำที่สร้างขึ้นสามารถแสดงสถานะที่แตกต่างกันทั้งสามสถานะได้อย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 7 (ข) โดยจะพบว่าเมื่อจำนวนครั้งการโค้งงอเพิ่มขึ้นค่ากระแสที่อ่านได้จากแต่ละสถานะจะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสาเหตุหลักคือ ความเครียดที่เกิดขึ้นกับชั้นฟิล์ม และความเครียดที่เกิดขึ้นจะส่งผลมากที่สุดต่อชั้นของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ดังนั้นเมื่อเกิดจุดบกพร่องของขั้วไฟฟ้าและชั้นฟิล์มจึงทำให้การรับส่งอิเล็กตรอนเสื่อมถอยลงเป็นเหตุให้ค่ากระแสที่แต่ละสถานะจะลดลง [12]

4. สรุปผลการทดลอง

สามารถสร้างอุปกรณ์หน่วยความจำแบบสามสถานะในโครงสร้าง ITO/PVK:Ag NPs/Al บนฐานรองรับพลาสติก จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสามสถานะได้ อุปกรณ์มีความสามารถในการโค้งงอมากที่สุดอยู่ที่ระยะรัศมีความโค้ง 11 mm โดยทั่วไปความสามารถในการโค้งงอมักจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ทำงาน แต่อย่างไรก็ตามจากการทดสอบภายหลังการโค้งงอ อุปกรณ์ยังคงแสดงสมบัติการอ่าน-เขียนซ้ำของสถานะ ON OFF และ INTERM ได้ตลอดช่วงการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถที่จะพัฒนาไปสู่อุปกรณ์หน่วยความจำได้

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เลขที่สัญญา A118-0260-080) และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมสำหรับอุปกรณ์ระดับนาโน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Meena, J.S., Sze, S.M., Chand, U. and Tseng, T.Y. 2014. Overview of emerging nonvolatile memory technologies. *Nanoscale Research Letters*, 9, 526.
- [2] Lian, K., Li, R., Wang, H., Zhang, J. and Gamota, D. 2010. Printed flexible memory devices using copper phthalocyanine. *Materials Science and Engineering B*, 167, 12-16.
- [3] Ali, S., Bae, J., Choi, K. H., Lee, C. H., Doh, Y. H., Shin, S. and Kobayashi, N. P. 2015. Organic non-volatile memory cell based on resistive elements through electro-hydrodynamic technique. *Organic Electronics*, 17, 121-128.

- [4] Son, J.Y., Shin, Y.H., Kim H. and Jang, H. M. 2010. NiO resistive random access memory nanocapacitor array on graphene, 4(5), 2655-2658.
- [5] Dao, T. T., Tran, T. V., Higashimine, K., Okada, H., Mott, D., Maenosono, S. and Murata, H. 2011. High-performance nonvolatile write-once-read-many-times memory devices with ZnO nanoparticles embedded in polymethylmethacrylate. *Appl. Phys. Lett.*, 99, 233303.
- [6] Li, F., Kim, T. W., Dong, W. and Kim, Y. H. 2009. Nonvolatile memory devices based on ZnO/polyimide nanocomposite sandwiched between two C₆₀ layers. *Thin Solid Films*, 517, 3916-3918.
- [7] Ham, J. H., Oh, D. H., Cho, S. H., Jung, J. H., Kim, T. W., Ryu, E. D. and Kim, S. W. 2009. Carrier transport mechanisms of nonvolatile write-once-read-many-times memory devices with InP-ZnS core-shell nanoparticles embedded in a polymethyl methacrylate layer. *Appl. Phys. Lett.*, 94, 112101.
- [8] Prime, D. and Paul, S. 2009. Overview of organic memory devices. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 367, 4141-4157.
- [9] Mamo, M. A., Machado, W. S., van Otterlo, W. A. L., Coville, N. J. and Hümmelgen, I. A. 2010. Simple write-once-read-many-times memory device based on a carbon sphere-poly(vinylphenol) composite. *Organic Electronics*, 11, 1858-1863.
- [10] Onlaor, K., Thiwawong , T. and Tunhoo, B. 2018. Multilevel conductance switching and carrier transport mechanisms of memory devices based on an ITO/PVK:Ag nanoparticles/Al structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 880-886.
- [11] Onlaor, K., Thiwawong , T. and Tunhoo, B. 2016. Bi-stable switching behaviors of ITO/EVA:ZnO NPs/ITO transparent memory devices fabricated using a thermal roll lamination technique. *Organic Electronics*, 31, 19-24.
- [12] Chung, I., Cho, K., Yun, J. and Kim, S. 2012. Flexible resistive switching memory devices composed of solution-processed GeO₂:S films. *Microelectronic Engineering*, 97, 122-125.
- [13] Onlaor, K., Thiwawong , T., Tunhoo, B. and Nukeaw, J. 2013. Electrical properties and switching mechanisms of flexible organic-inorganic bistable devices. *Appl Phys A*, 112, 495-500.