

คุณสมบัติวัสดุอัจฉริยะอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง ทังสเตนออกไซด์

ELECTROCHROMIC PROPERTIES OF SMART MATERIAL WO₃ THIN FILM

สัญญา คุณขาว

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail : sanya.kh@spu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้นำเสนอฟิล์มบางวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่แสดงปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า จากผลของสนามไฟฟ้าภายนอกอันเนื่องมาจากแรงดันไบอัสเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลไกของสี สิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงทำให้เกิดการเปลี่ยนสี และการให้ไบอัสย้อนกลับจะเป็นการทำให้สีจางลง สำหรับการควบคุมการเกิดสีได้ด้วยการควบคุมการกระตุ้นของการฉีดและการแยกตัวของอิเล็กตรอน และไอออนของโลหะเข้าสู่ชั้นของออกไซด์ ที่จะทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสีกับสารประกอบทังสเตนออกไซด์ (WO₃) WO₃ (colorless) + xM⁺ + xe ↔ MxWO₃ (blue) จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้านกระแสตรงกับสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาพบว่ามีปัจจัยของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อกลไกการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและไอออนบนฟิล์มบางทังสเตนออกไซด์ อีกทั้งการทดสอบด้วยสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความถี่ต่างๆ สามารถยืนยันผลการทดลองทางด้านกระแสตรงอีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของสีที่เป็นไปอย่างช้าเนื่องจากผลของ switching time ที่มีเวลาการเปลี่ยนสถานะที่ต่ำ

คำสำคัญ : อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุอัจฉริยะ กระจก ITO

ABSTRACT

This research has introduced an electrochromic thin film which exhibits electrical phenomena. The effects of an external electric field caused by applied bias result in changes in the mechanism of color. The electrochromic device is to exhibit repeated coloration/bleaching cycles with forward and reverse biases of small voltages. Furthermore, the control of the coloration mechanism can be done by simultaneous injection and extraction of electrons and metal ions (H⁺, K⁺...) into the oxide layer according to the reaction scheme: WO₃ (colorless) + xM⁺ + xe ↔ MxWO₃ (blue). From the dc measurement of electrical properties of the developed electrochromic device, it is found that there are parameter factors that affect the exchanges of electrons and ions on the WO₃

thin film. Also, additional ac measurements at low frequencies support the results of dc measurement. The slow changes of coloration are due to the effects of low delay switching time.

KEYWORDS: electrochromic, smart material, ITO glass

1. คำนำ

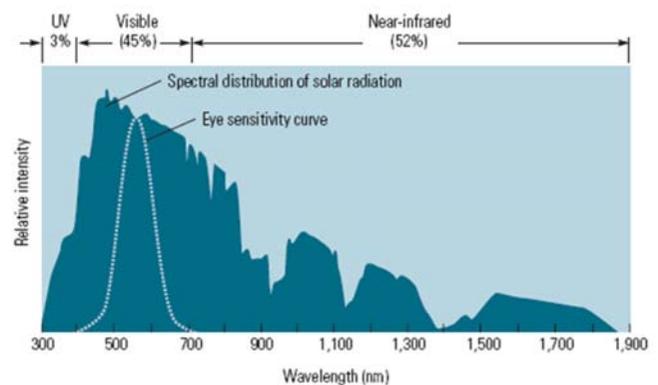
การพัฒนาของกระจกหน้าต่างมีมาอย่างต่อเนื่อง ทั้งรูปแบบและสีสันทันให้เหมาะต่อการใช้งาน โดยได้มีการใช้วัสดุใหม่ๆ เข้ามาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ด้วยการใช้กระจกกรองแสงที่มีการนำวัสดุคุณภาพมาใช้ร่วมกัน ยิ่งไปกว่านั้น กระจกดังกล่าวยังได้ถูกเคลือบด้วยสารที่มีความสามารถสะท้อนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 1 แสดงถึงตัวอย่างอาคารสำนักงานที่มีการใช้กระจกกรองแสงจากดวงอาทิตย์ กระจกกรองแสงที่นำมาใช้กับอาคารในปัจจุบันนี้ไม่สามารถปรับความเข้มของสีได้ตามความเข้มของแสงอาทิตย์เพื่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างอาคารสำนักงานที่มีการใช้กระจกกรองแสงเพื่อลดความเข้มของแสงอาทิตย์

การแผ่รังสีความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นั้นเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนอุณหภูมิประมาณ 5762 เคลวิน(K) โดยรังสีส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่น 0.3 ถึง 3.0 ไมโครเมตร โดยที่ส่วนหนึ่งเป็นรังสีความร้อน (thermal radiation) จะอยู่ในความยาวช่วงคลื่น 0.1 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสั้น และอีกส่วนเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาว ซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่า 3 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นความเข้มของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ โดยที่ตาของมนุษย์จะสามารถมองเห็นได้ในช่วงความยาวคลื่น 0.380 ถึง 0.720 ไมโครเมตร ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นโลก โดยที่ปริมาณของการแผ่รังสีนี้มีอยู่ สามเปอร์เซ็นต์ที่อยู่ในย่านอุลตราไวโอเล็ต นอกเหนือจากนั้นเป็นความยาวใกล้ย่านอินฟราเรด ที่ถูกนำมาใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบกระจกหน้าต่างที่ดี (U. Fischer)

โดยที่เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ Electrochromics (EC) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกระจกหน้าต่างตามบ้านเรือนและอาคารสำนักงาน โดยที่อาศัยคุณสมบัติของการปรับเปลี่ยนความเข้มสีได้ด้วยการจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาดต่ำๆ ที่เป็นผลของการเกิด



รูปที่ 2 ความเข้มของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ปฏิกิริยารีดอกซ์กับส่วนของชั้นอิเล็กโทรโครมิกที่เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์และสารอิเล็กโทรไลต์ ด้วยการแลกเปลี่ยนประจุอิเล็กตรอน โดยความเข้มสีของกระจกที่เพิ่มขึ้นจากแรงดันกระแสตรง และยังสามารถปรับลดความเข้มสีด้วยการให้แรงดันย้อนกลับ อีกทั้งเมื่อไม่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าความเข้มของสีก็ยังคงสภาพอยู่เป็นเวลานานจากผลของสภาพการจำของสี (Wienold J.)

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ๆ เกี่ยวกับกระจกหน้าต่างที่มีความเป็นอัจฉริยะ (smart windows) สามารถที่จะปรับตัวเองได้ตามสภาวะแวดล้อม โดยมีคุณสมบัติในการปรับความเข้มสี และการส่งผ่านของแสง ซึ่งการทำงานของกระจกประเภทนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า ซึ่งขึ้นกับกลไกของการเปลี่ยนสถานะจากสารเคมีที่เคลือบอยู่ที่กระจก การพัฒนาวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีอิเล็กโทรโครมิก ด้วยผลของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเมื่อได้รับการจ่ายแรงดัน ทำให้สามารถปรับความเข้มของสีบนกระจก ในการควบคุมการให้แสงผ่านกระจก ด้วยการปรับลดความเข้มของสีที่ชั้นของสารประกอบออกไซด์ เมื่อได้รับการจ่ายแรงดันและการคงสภาพของสีได้เมื่อไม่มีแรงดันไบอัส จากการศึกษาข้างต้นที่ผ่านมาจึงได้ทำการศึกษาเงื่อนไข การสร้างและสมบัติพื้นฐานในการปรับความเข้มสีด้วยสารทังสเตนออกไซด์ WO_3 ที่สามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดตลอดทั้งวันได้อย่างแน่นอน โดยแนวความคิดพิเศษอย่างหนึ่งของการใช้เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบางด้วยการเคลือบสารประกอบทังสเตนออกไซด์ ลงบนกระจกที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อสร้างวัสดุอัจฉริยะอิเล็กโทรโครมิกในการปรับความเข้มของสีด้วยหลักเคมีไฟฟ้า (J. Stefan)

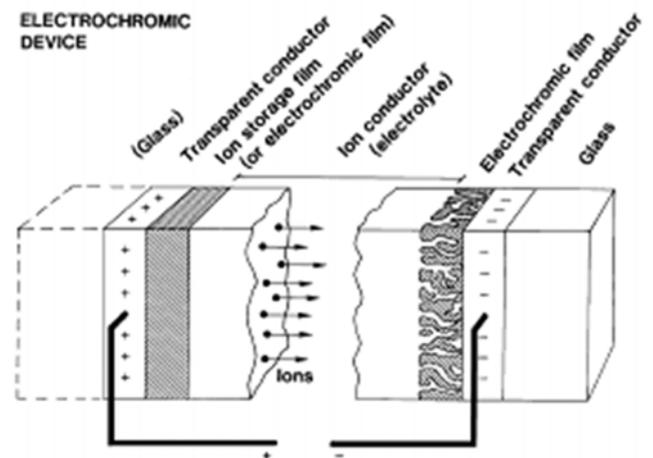
2. ทฤษฎี

จากโครงสร้างการทำงานของสารอิเล็กโทรโครมิก ที่ทำการออกแบบชั้นสารต่างๆ ที่เคลือบลงบนกระจกที่แยกเป็นชั้นตัวนำโปร่งแสง (Transparent Conductor: TC) ที่ซ้อนอยู่ในแนวตั้งขนานกัน ซึ่งมีชั้นของสารวัสดุอิเล็กโทรโครมิก โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารทังสเตนออกไซด์ ชั้นสะสมการนำประจุ (Ion Counter) และชั้น counter electrode โดยชั้นของโลหะโปร่งแสงนั้นจะเป็นชั้นที่มีการต่อสายตัวนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจ่ายแรงดันกระแสตรง การเปลี่ยนสีต้องการความหนาเพียงครั้งเดียวที่ทำให้แสงผ่านเข้าสู่

ด้านใน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์กับสารที่ให้สีจากสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วมาก ในขั้นตอนของการทำงานให้แสงผ่านไปยังตัวอุปกรณ์ สิ่งประดิษฐ์ที่ปรับความเข้มสี จากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะมีการทำงานด้วยการให้แรงดันย้อนกลับ (Reverse bias) พบว่าประจุอิเล็กตรอนจะไหลกลับในทิศทางตรงกันข้ามออกจากส่วนเนื้อสารที่จะมีการเปลี่ยนสี ไปยังส่วนของชั้นที่มีการนำประจุที่เป็นชั้นของอิเล็กโทรไลต์ และกลับเข้าสู่ชั้นที่เก็บประจุอิเล็กตรอน (E. Avendano) ดังนั้นการปรับความเข้มสีสามารถกระทำได้ด้วย การให้แรงดันย้อนกลับที่ส่วนของเนื้อสารสารอิเล็กโทรโครมิกที่เคลือบอยู่บนกระจกโปร่งแสงโดยแสดงในรูปที่ 3 สิ่งประดิษฐ์อิเล็กโทรโครมิกได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อการประยุกต์ใช้เกี่ยวกับกระจกปรับแสง เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะ switching time ค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นการแทนที่ด้วยประจุอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการรีดอกซ์สามารถแสดงได้ดังนี้



ซึ่งสารประกอบไอออนของโลหะ $M^+ = H^+, Li^+, Na^+$ หรือ K^+ และประจุอิเล็กตรอนลบ (e^-) เข้าไปแทนที่ที่อิเล็กตรอน โดยในแต่ละสถานะของสารเคมีที่ใช้ในการกำเนิดการเปลี่ยนสีของชั้นอิเล็กโทรโครมิกกับสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นชั้นของสารละลายเพื่อการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับประจุอิเล็กตรอนของธาตุที่โลหะ



รูปที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์อิเล็กโทรโครมิก

โปร่งแสงที่เคลือบอยู่บนกระจกหรือชั้นของเนื้อวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่เคลือบอยู่บนกระจกที่เคลือบโลหะโปร่งแสง

3. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจก ITO และการเคลือบสารทังสเตนออกไซด์

3.1 การเตรียมแผ่นกระจก

กระจกที่ใช้สำหรับการเคลือบฟิล์มทังสเตนออกไซด์ จะใช้กระจกที่มีการเคลือบโลหะออกไซด์โปร่งแสงที่ทำจากสารประกอบอิตียมทินออกไซด์ Indium Tin Oxide: เรียกว่ากระจก ITO โดยการตัดแผ่นกระจก ITO ให้มีขนาด $3 \times 2 \text{ cm}^2$ และทำความสะอาดชั้นกระจกด้วย acetone และล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (Deionization water) จากนั้นทำให้แห้ง ภายหลังจากการตัดกระจกแล้วให้ทำความสะอาดอีกครั้งแล้ววัดค่าความต้านทานของกระจก โดยด้านที่เคลือบสารอินเดียมทินออกไซด์ จะมีความต้านทานประมาณ 22-25 โอห์ม ส่วนด้านที่เป็นกระจก จะมีความต้านทานสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 4



(ก) แสดงการทดสอบด้านที่เป็นกระจก



(ข) แสดงการทดสอบด้านที่เป็นกระจกเคลือบสาร ITO

รูปที่ 4 แสดงการทดสอบกระจกด้านที่เป็นกระจก และเคลือบสาร ITO

3.2 การเคลือบสารทังสเตนออกไซด์ลงบนแผ่นกระจก

1. ทำการชั่งสารประกอบทังสเตนออกไซด์ ประมาณ 1 กรัม ใส่ลงไปยังใส่ความร้อนทังสเตนแบบหลุม จากนั้นทำการดูอากาศออกจนความดันภายในลดต่ำลงที่ต่ำสุดตามประสิทธิภาพของปั๊มสุญญากาศที่ประมาณ 0.4 ปาสคาล ต่อจากนั้นเริ่มปรับแรงดันกระแสลับที่อุปกรณ์ควบคุมกระแสให้กับใส่ความร้อนทังสเตน โดยในลำดับแรกให้ทำการอุ่นใส่ความร้อนทังสเตนก่อนโดยการปรับแรงดันที่ 100 โวลต์ จาก Auto transformer ให้มีกระแสไหลผ่านใส่ทังสเตนประมาณ 80 แอมป์

จากนั้นให้ปรับแรงดันเพิ่มขึ้นทีละน้อยจนใส่ความร้อนทังสเตนมีสีส้มแดงที่ระดับกระแส 150 แอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้นให้ปิดวาล์วที่ต่อเชื่อมกับปั๊มสุญญากาศ เมื่อกระแสที่ไหลผ่านใส่ทังสเตนที่มีกระแสไหล 150 แอมป์จะทำให้สารประกอบทังสเตนออกไซด์เกิดการระเหยเป็นไอ เมื่อไอระเหยของสารประกอบทังสเตนออกไซด์เริ่มระเหยเป็นไอในระยะแรกให้รอ 30 วินาที จากนั้นให้เปิด shutter ที่ปิดกั้นระหว่างแผ่นกระจก



(ก) แสดงส่วนประกอบของเครื่องสุญญากาศ



(ข) แสดงส่วนเครื่องควบคุมกระแส

รูปที่ 5 แสดงชุดอุปกรณ์การควบคุมกระแส และระบบสุญญากาศ



(ก) แสดงการปรับระดับกับกระแสที่ 100 A



(ข) แสดงการปรับระดับกับกระแสที่ 120 A

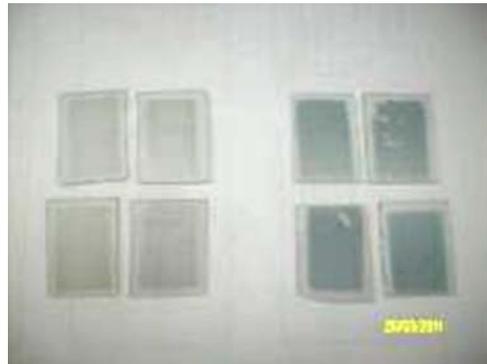


(ค) แสดงการปรับระดับกับกระแสที่ 130 A



(ง) แสดงการปรับระดับกระแสที่ 150 A

รูปที่ 6 แสดงการให้ความร้อนกับผงทั้งสแตนออกไซด์เพื่อให้เกิดการระเหยเป็นไอจับที่กระจก ITO



รูปที่ 7 แสดงกระจก ITO ที่เคลือบ ที่ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น และเยอรมัน

กับไล่ความร้อน ซึ่งไอระเหยของสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ ระเหยขึ้นไปติดยังส่วนของกระจก ITO โดยในขั้นตอนนี้ต้องรักษาระดับกระแสให้คงที่ที่ 150 A จนกระทั่งสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ได้ระเหยจนหมดจึงค่อยๆ ลดกระแสลงเป็นศูนย์ แอมป์ดังแสดง ในรูปที่ 6

2. ภายหลังจากการเคลือบสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์นำเข้าสู่เตาอบโดยการตั้งอุณหภูมิของการอบไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7 หลังจากนั้นค่อยๆ ลดอุณหภูมิลง 50 องศาเซลเซียส ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนเข้าสู่อุณหภูมิกปกติแล้วจึงนำออกจากเตาอบ

3. นำแผ่นกระจกที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์เข้าสู่เตาอบ โดยการตั้งอุณหภูมิการอบไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 8 ต่อจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่อยๆ ลดอุณหภูมิลง 50 องศาเซลเซียส ทุกๆ 1 ชั่วโมง จนเข้าสู่อุณหภูมิกปกติแล้วจึงนำออกจากเตาอบ มาทำการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 แสดงการนำกระจกที่เคลือบสาร แล้วนำเข้าเตาอบ โดยเพิ่มอุณหภูมิที่ละ 50 องศา

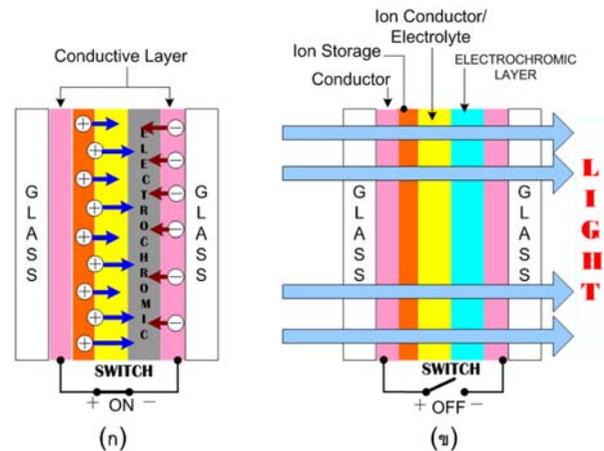


รูปที่ 9 แสดงการนำกระจกที่เคลือบสารที่ผ่านการอบด้วยความร้อนออกจากเตาอบ

4. การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

4.1 การตอบสนองต่อแรงดันไบอัสกระแสตรง

ในการทดสอบคุณสมบัติของการจำของตัวเซลล์ด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า หรือการที่ขั้วนี้ประจุถูกเก็บสะสมซึ่งยังคงอยู่จนกว่าจะมีการให้แรงดันอีกครั้ง ซึ่งผลดังกล่าวเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ย้อนกลับจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเคมีอิเล็กโทรไลต์กับสารประกอบทั้งสเดนออกไซด์ เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของประจุไอออนบวกของไฮโดรเจน หรือประจุบวกจากธาตุอัลคาไลน์ ในโครงสร้างผลึกของออกไซด์ ซึ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรเคมีคจะเป็นกระบวนการย้อนกลับที่จะทำให้สีเกิดการจางลง โดยปกติแล้วระบบโครงสร้างนี้จะทำการสร้างชั้นสารของฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกอยู่บนกระจกโปร่งแสงที่เคลือบฟิล์มโลหะโปร่งแสง เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและมีสารอิเล็กโทรไลต์แทรกอยู่ระหว่างฟิล์มอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งจะเป็นชั้นที่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างกัน โดยเป็นโครงสร้างที่ซ้อนทับกันอยู่บนชั้นฟิล์มตัวนำโปร่งแสง นอกจากนี้การสวิตช์ของกระแสไบอัสย้อนกลับ และไบอัสตรง ที่ไหลผ่านเข้าสู่ตัวนำด้านนอก เป็นเหตุให้ประจุไอออนไหลผ่านเข้าสู่ส่วนกลางของอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นประจุจะเพิ่มขึ้น หรือลดลง เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเนื้อสารของวัสดุอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งจะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนความเข้มของสีบนกระจกได้ดังแสดงในรูปที่ 10 เป็น



รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟิล์มอิเล็กโทรโครมิก (ก) สถานะที่ได้รับการไบอัสฟิล์มอิเล็กโทรโครมิก จะปรับความเข้มสีซึ่งแสงจะไม่สามารถผ่านออกไปได้ (ข) สถานะที่ไม่ได้รับการไบอัส แสงสว่างจะสามารถผ่านเข้าสู่กระจกได้

กระบวนการทำงานกระจกที่ปรับความเข้มแสงได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโครมิกนั้นจะคล้ายคลึงกับเซลล์กึ่งตัวนำของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งขั้วไฟฟ้าส่วนแรกนั้นจะเป็นขั้วตัวนำที่โปร่งแสงหรือมีสีอ่อนๆ ที่จะเป็นสีของสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ ที่ถูกสร้างจากสารประกอบออกไซด์ของทั้งสแตนออกไซด์ โดยการเชื่อมต่อกันด้วยสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ อีกทั้งการที่เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันได้ถูกนำออกจากวงจร แล้วความเข้มของสียังคงสภาพอยู่เป็นเวลานาน ซึ่งในกรณีนี้ทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานกับตัวเซลล์อิเล็กโทรโครมิก

ดังนั้นด้วยการทำการทดสอบปฏิกิริยาเคมีระหว่างกระจก ITO กับกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ โดยสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ โพลีเอทิลีนออกไซด์ และโพลีเอทิลีนอ็อกไซด์ ซึ่งให้การไบอัสเข้ากับแผ่นกระจกทั้งสอง โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุไอออนของธาตุโลหะ หรือจะใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วอิเล็กโทรด แทนกระจก ITO และแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ การกระทำเช่นนี้เพื่อไม่ให้สาร ITO เกิดการเสียหายเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านเนื้อสารทำให้



รูปที่ 11 แสดงการเสียหายของแผ่นกระจก ITO ที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล



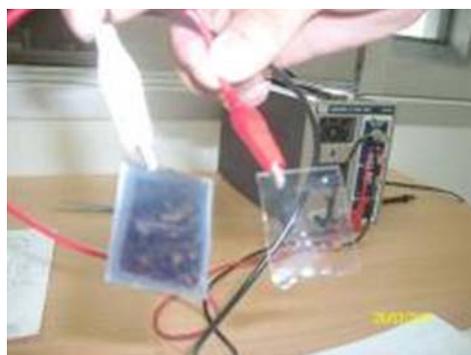
เกิดการล่อนของสาร ITO ที่เคลือบไว้ โดยจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 11

ซึ่งการทดสอบจะใช้สารละลายของโซเดียมคลอไรด์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ จากการทดสอบพบว่าเมื่อเริ่มให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนสีของกระจกที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ มีการเปลี่ยนเป็นสีฟ้า เนื่องจากการสะสมจากแคโทดไอออน M^+ รวมตัวกับอิเล็กตรอนเข้าสู่ชั้นของฟิล์มทั้งสแตนออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 12

เมื่อหยุดให้การไบอัสจะยังคงสภาพของสีนั้นเนื่องจากสภาพของจากจำของประจุไอออนที่เกิดการเปลี่ยนสียังคงสภาพเดิมที่ไม่ได้ถูกนำออกจากชั้นสะสมประจุไอออน ซึ่งเปรียบเสมือนกับการอัดประจุของแบตเตอรี่ โดยในการคงสภาพของสีแสดงให้ทราบว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นสามารถทำให้เกิดกลุ่มของโมเลกุลของสาร M_xWO_3 ซึ่งประกอบด้วยประจุไอออน $M^+ = K^+$ และ Na^+ ที่เป็นโพลีเอทิลีนอ็อกไซด์และโซเดียมอ็อกไซด์ที่เกิดขึ้นจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KNO_3 และ $NaCl$ ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 12 แสดงแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อได้รับการไบอัสจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้า

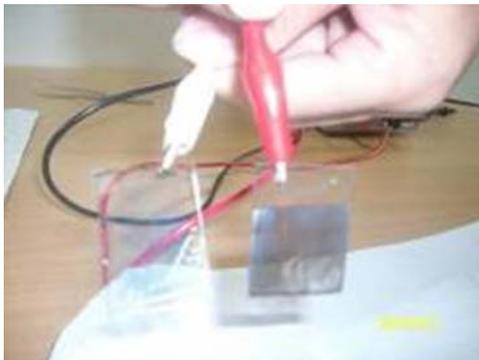


รูปที่ 13 แสดงแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ เมื่อหยุดให้การไบอัสจะยังคงสภาพของสี

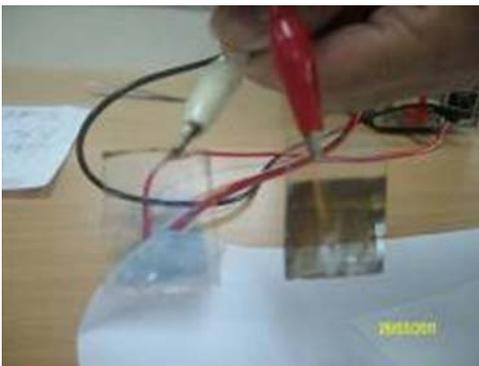
ในลำดับต่อจากนั้นจะเป็นการทดลองให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะพบว่ากระจกที่เคลือบสารทั้งสเดนออกไซด์ที่มีสีฟ้าจะเปลี่ยนกลับเป็นสีน้ำตาล และแผ่นกระจกที่เคลือบสารทั้งสเดนออกไซด์ที่ไม่มีสีจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าแทนอันเนื่องจากการกลับของปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่เป็นกระบวนการย้อนกลับที่ทำให้ประจุไอออนของ Na^+ หรือ K^+ โดยอิเล็กตรอนเหล่านั้นได้ถูกฉีดเข้าไปยังสารประกอบ โลหะออกไซด์ที่เป็นส่วนของชั้นอิเล็กโทรโครมิกที่เป็นสารทั้งสเดนออกไซด์ ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติของการเปลี่ยนความเข้มสีในชั้นของอิเล็กโทรโครมิกดังแสดงในรูปที่ 14

4.2 ลักษณะของความต้องการใช้กำลังงานของกระจกแบบอิเล็กโทรโครมิก

กระจกหน้าต่างแบบอิเล็กโทรโครมิกมีความต้องการใช้กำลังงานไฟฟ้าขนาดต่ำ โดยการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดต่ำคงที่ เพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนสถานะของความเข้มสีให้คงอยู่เสมอ หรือการทำให้ความเข้มสีลดลง สารประกอบโลหะ



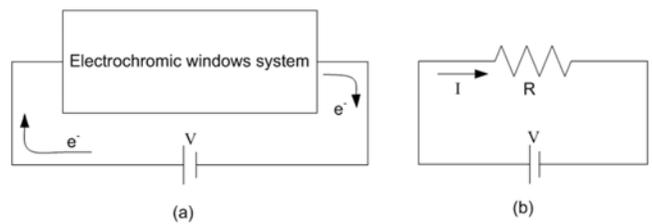
(ก)



(ข)

รูปที่ 14 แสดง (ก) กระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสเดนออกไซด์ก่อนไบอัสย้อนกลับ (ข) ภายหลังจากการได้รับไบอัสย้อนกลับที่มีการสลับด้านการเปลี่ยนสี

ออกไซด์ และสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้สร้างกระจกอิเล็กโทรโครมิกจะมีการเรียงซ้อนทับกัน เมื่อมีการให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ระดับของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสีที่มีความแตกต่างกัน อีกทั้งเมื่อนำแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจรกระจกหน้าต่างอิเล็กโทรโครมิก ยังคงรักษาระดับของความเข้มสี หรือเมื่อให้แรงดันกระแสตรงแบบย้อนกลับ (Reverse bias) ออกจะสามารถเปลี่ยนความเข้มสีให้จางหายไปได้ จากโครงสร้างของกระจกโปร่งแสงอิเล็กโทรโครมิกที่เป็นวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงวงจรสมมูลของกระจกไฟฟ้าอิเล็กโทรโครมิก

เมื่อพิจารณาจากกระจกหน้าต่างอิเล็กโทรโครมิกนั้นก็เปรียบเสมือนวงจรทางไฟฟ้า ที่ตัวกระจกนั้นมีการเคลือบสารอิเล็กโทรโครมิกไว้ ดังนั้นจึงต้องมีความต้านทานเพิ่มขึ้นกับขนาดของพื้นที่หน้าตัดของกระจกดังความสัมพันธ์ของความต้านทานนี้

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือสภาพความต้านทานของเนื้อสาร

l คือความกว้างของแผ่นกระจก

A คือพื้นที่ของเนื้อสารอิเล็กโทรโครมิก

จากสมการตามกฎของโอห์ม แสดงได้ดังนี้

$$V = IR \text{ และกำลังงาน (Power) } P = IV$$

I คือกระแส R คือ ความต้านทานของเนื้อสาร

V คือ แรงดันกระแสตรง เมื่อพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์ข้างต้นจะพบว่า

$$P = (I)^2 (R) = \frac{AV^2}{\rho l} \quad (3)$$

ดังนั้นจากสมการความสัมพันธ์ที่เป็นผลของกำลังงานที่กระจกอิเล็กโทรโครมิกที่เคลือบเป็นฟิล์มบางของสารทั้งสเดนออกไซด์ที่ต้องการนั้นจะขึ้นกับขนาดของพื้นที่ตัดขวางของสารอิเล็กโทรโครมิก

4.3 การตอบสนองต่อแรงดันไบอัสกระแสตรงด้วย ขั้วไฟฟ้าโลหะ

ในขณะที่เริ่มต้นที่ไม่มีการให้แรงดันไฟฟ้ากับกระจก
โปร่งแสงอิเล็กโทรโครมิก พบว่าระดับของความเข้มสีที่เกิดขึ้น
อยู่ในสถานะที่ไม่มีการทำงานของปฏิกิริยา ดังนั้นการเปลี่ยน
ความเข้มสีต้องการความหนาของเนื้อสารเพียงครั้งเดียวที่ทำให้
มีการปรับแสงผ่านเข้าสู่ด้านในของตัวกระจกได้ ดังนั้นการเปลี่ยน
แปลงของกระแสไฟฟ้าหรือการแลกเปลี่ยนไอออนในปฏิกิริยาเคมี
ไฟฟ้าระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์ติดกับสารที่ให้สีจากสารประกอบ
ออกไซด์จะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วมาก อีกทั้งจากปฏิกิริยา
เคมีไฟฟ้าที่มีการทำงานด้วยการให้แรงดันย้อนกลับ Reverse bias
จะพบว่าประจุไอออนจะไหลกลับในทิศทางตรงกันข้าม ออกจาก
ส่วนเนื้อสารที่จะมีการเปลี่ยนสี ไปยังส่วนของชั้นที่มีการนำประจุ
นั่นคือชั้นของอิเล็กโทรไลต์ และกลับเข้าสู่ชั้นที่เก็บประจุไอออน
ดังนั้นสำหรับการใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม (AI) เป็นขั้วอิเล็กโทรดแทน
กระจก ITO และแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์



รูปที่ 16 แสดงสภาพก่อนการให้ไบอัสแรงดันกับกระจก ITO
ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์

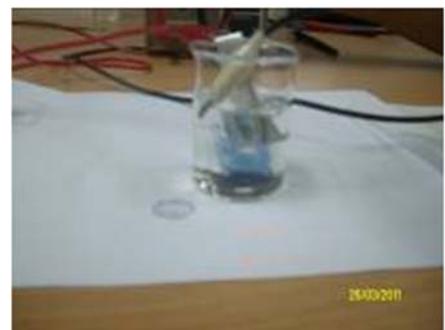


รูปที่ 17 ภายหลังจากการได้รับไบอัส 0-3.5 โวลต์ ที่มีการเปลี่ยนสี
เป็นสีฟ้าเข้ม

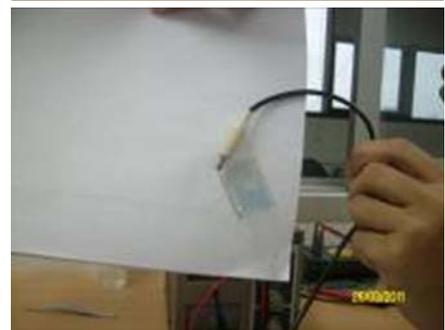
เพื่อไม่ให้สาร ITO ที่เคลือบอยู่บนกระจกเกิดการเสียหายเนื่องจาก
กระแสที่ไหลผ่านเนื้อสารมากทำให้เกิดการล่อนของสาร ITO
ที่เคลือบไว้ ในการทดสอบด้วยการใช้แผ่นโลหะอะลูมิเนียมจะเป็น
ส่วนที่มีการสะสมของประจุไอออนดังแสดงในรูปที่ 16 ในขณะที่
ที่กระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ ได้รับการไบอัสแรงดัน
ในช่วง 0-3.5 โวลต์ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 17 พบว่ามีการเปลี่ยนสี
เพิ่มขึ้นเป็นสีฟ้า และเมื่อหยุดการให้แรงดันไบอัสก็ยังคงสภาพ
ของสีดังเดิม ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 การคงสภาพของสีน้ำเงินบนแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบ
สารทั้งสแตนออกไซด์เมื่อไม่ได้รับการไบอัส



(ก)

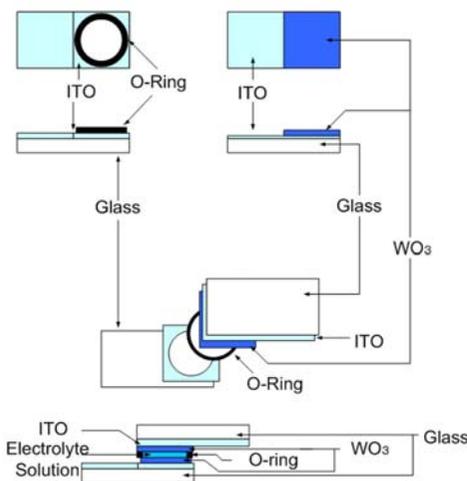


(ข)

รูปที่ 18 (ก) การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับกระจก ITO
ที่เคลือบ สารทั้งสแตนออกไซด์ ที่มีการเปลี่ยนสีลดลง
(ข) การเปลี่ยนสีบนแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสาร
ทั้งสแตนออกไซด์ที่สภาพการเปลี่ยนสีลดลง

ในทางกลับกันเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับระหว่างขั้วอะลูมิเนียม กับแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ ซึ่งทำให้สภาพการเปลี่ยนสีลดลงดังแสดงในรูปที่ 19

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างกระจกอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกสามารถ โดยการใช้กระจกแผ่นเรียบทำการเคลือบชั้นตัวนำโปร่งของโลหะออกไซด์ ลำดับต่อจากนั้นจะเป็นชั้นของสารวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิก ที่ใช้สารทังสเตนออกไซด์ จากนั้นจะเป็นชั้นสะสมการนำประจุอินทรีย์หรือชั้นของอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิก ที่มีอิมมูนสำหรับการนำไฟฟ้าประมาณ $10^{-3} - 10^{-6}$ โหมห์ต่อเซ็นติเมตร (s/cm) ประจุอินทรีย์ที่สะสมอยู่จะถูกใช้ใน การกำเนิดสีโดยจะให้ประจุโปรตรอนจากสารละลายที่ใช้ในการทดสอบในที่นี้จะใช้โซเดียมคลอไรด์ NaCl โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ KOH หรือโพแทสเซียมไนเตรท KNO_3 ซึ่งมีประจุอินทรีย์บวกของโซเดียม (Na^+) หรือ โพแทสเซียม (K^+) ที่เป็นสารอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกที่เป็นของเหลว และชั้นฟิล์มบางโลหะโปร่งแสงเป็นขั้วไฟฟ้า โดยที่ขั้วด้านหนึ่งจะเป็นขั้วแอโนดที่เป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกเช่นเดียวกัน และอีกด้านหนึ่งจะเป็นคาโทดที่มีการเกิดสี และการจางหายไปของสีทั้งสองด้านในขณะที่ได้รับการจ่ายแรงดัน ดังนั้นจากแนวทางนี้ได้มีการปรับใช้สารอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกนี้ โดยการออกแบบให้สารอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกเคลือบอยู่ทั้งสองด้านในลักษณะซ้อนทับกันแล้วทำการทดสอบกระจก ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์กับสารละลายอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกชนิดต่างๆ สำเร็จ ตามวัตถุประสงค์ด้วยการออกแบบตัวอย่างโครงสร้างเพื่อใช้ในการทดสอบดังแสดง



รูปที่ 20 การจัดโครงสร้างของกระจกอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกที่เรียงกันเป็นชั้น

ในรูปที่ 20 แสดงชิ้นงานต้นแบบที่ทำการประกอบติดตั้งเข้ากันเป็นแบบซ้อนทับหรือแบบแซนดิวิช โดยโครงสร้างนี้จะใช้กระจกที่ได้รับการเคลือบทังสเตนออกไซด์ แล้วใช้อย่างรูปวงแหวน (O-ring) จัดวางไว้ที่ผิวด้านบนเพื่อใช้เป็นส่วนบรรจุสารอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกที่เป็นสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมไนเตรท และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

จากนั้นทำการผนึกส่วนของกระจกที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์สองชิ้นเข้าด้วยกัน จากนั้นก็สามารถนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยที่ชิ้นงานที่ประกอบแล้วจะทำการผนึกด้วยตัวหนีบเพื่อไม่ให้สารอิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิกรั่วไหลออกจากภายในของ O-ring ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยในสภาวะนี้จะยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ นั้นเปรียบเหมือนกันในสภาวะที่ไม่ได้รับการจ่ายแรงดันก็จะไม่เกิดการเปลี่ยนสี

การทดสอบโครงสร้างที่เตรียมขึ้นด้วยการให้แรงดันกระแสตรงและย้อนกลับ ที่ช่วงแรงดันไบอัสตรง 0 - 3.5 โวลต์ จะพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของสีตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส



(ก)



(ข)

รูปที่ 21 (ก) แสดงต้นแบบที่เตรียมสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า (ข) ชิ้นงานทดสอบ

ดังแสดงในรูปที่ 22 สำหรับการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับขั้วแคโทด จะเป็นการทำให้สีที่แผ่นกระจก ITO ที่มีสารทั้งสเดนออกไซด์จางลง ดังแสดงในรูปที่ 23 จากการนำผลของการให้แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับมาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ในขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับที่เป็นการแสดงถึงการเกิดขึ้นของสี และการจางหายของสี ดังแสดงในรูปที่ 24

จากผลการทดสอบทางด้านการให้แรงดันกระแสตรง นำผลการทดสอบมาทำการเขียนกราฟดังรูปที่ 24(ก) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดัน โดยขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรง เพิ่มขึ้นในช่วง 0-3.5 โวลต์ พบว่ามีการปรับเปลี่ยนสีของสารอิเล็กโทรโครมิตที่ประกอบด้วยส่วนของสารประกอบทั้งสเดนออกไซด์ มีการเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเข้มเพิ่มขึ้นโดยสังเกตได้จากปริมาณของกระแสที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในช่วง 0-2.5 โวลต์ จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันนี้จะในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์



(ก) แรงดันไบอัส 0 V และกระแส 0 μ A



(ข) แรงดันไบอัส 1.025 V และกระแส 37.63 μ A



(ค) แรงดันไบอัส 2.0178V และกระแส 114.64 μ A



(ง) แรงดันไบอัส 2.5399V และกระแส 363.69 μ A



(จ) แรงดันไบอัส 3.0301 V และกระแส 1.7463mA



(ฉ) แรงดันไบอัส 3.291 V และกระแส 1.1172mA



(ช) แรงดันไบอัส 3.523 V และกระแส 2.2273mA



(ซ) แสดงการคงสภาพของสีเมื่อไม่มีแรงดันไบอัส

รูปที่ 22 แสดงการเพิ่มขึ้นของกระแสและสีที่เข้มขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสตรงที่แคโทดเพิ่มขึ้น

โดยถ้าสังเกตจากการเปลี่ยนสีในช่วงแรงดันดังกล่าวจะพบว่ากระแสมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อผ่านช่วงแรงดันตั้งแต่ 2.5-3.5 โวลท์พบว่ากระแสมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นโดยการเปลี่ยนสีเริ่มปรากฏ ให้เห็นจนเป็นสีน้ำเงินเข้มในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือช่วงของการเกิดสี "Coloring"

สำหรับรูปที่ 24 (ข) เป็นการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับชิ้นงาน ที่ทดสอบที่แรงดันไบอัสในช่วงแรงดัน 0-3.5 โวลท์ โดยการกลับขั้วแรงดันไบอัสที่ขั้วอิเล็กโทรด พบว่าเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สภาพของปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบ

ทั้งสแตนออกไซด์ และอิเล็กตรอนที่เก็บอยู่ที่ขั้วของแผ่นกระจกที่มีการนำไฟฟ้าเข้าสู่ชั้นของแถบพลังงานของแถบการนำไฟฟ้าของสารอิเล็กโทรโครมิกซึ่งเป็นการลดการดูดซึมโมเลกุลของ M_xWO_3 (blue) เป็นผลให้เกิดการจางของสี "Bleaching" ซึ่งเปรียบเสมือนปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งขณะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีการเปลี่ยนสีลดลงและกระแสไม่ลดต่ำลงเป็นศูนย์เหมือนกันกับขณะที่ให้ไบอัสตรง ซึ่งเป็นผลของสภาพการจำของสี หรือสภาพฮิสเทอรีซิส Hysteresis จากสภาพการจำนี้เองของประจุอินและอิเล็กตรอนที่อยู่กับสารประกอบทั้งสแตน



(ก) แรงดัน ไบอัส 0.0728 V และกระแส 313.07 μA



(ข) แรงดัน ไบอัส 0.661 V และกระแส 281.93 μA



(ค) แรงดัน ไบอัส 1.0115 V และกระแส 227.85 μA



(ง) แรงดัน ไบอัส 1.8057V และกระแส 201.25 μA



(จ) แรงดัน ไบอัส 2.366 V และกระแส 224.15 μA



(ฉ) แรงดัน ไบอัส 2.9989 V และกระแส 535.1 μA

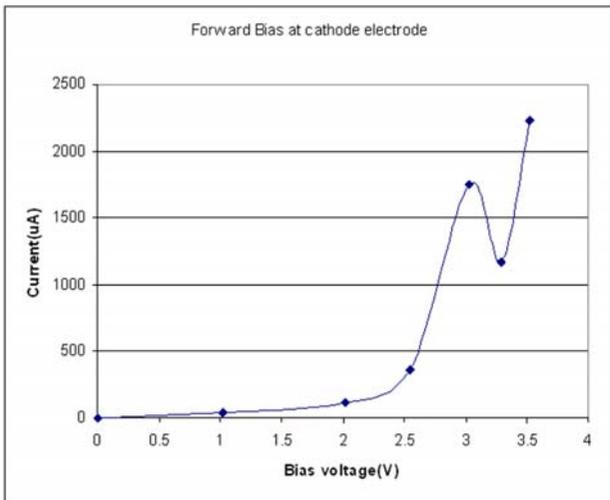


(ช) แรงดัน ไบอัส 3.2241V และกระแส 1.0145mA

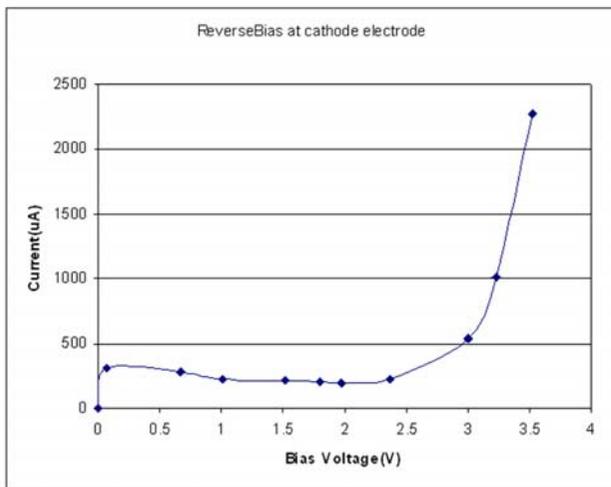


(ซ) แรงดัน ไบอัส 3.527 V และกระแส 2.2696mA

รูปที่ 23 แสดงการลดลงของกระแสและสีที่จางลงเมื่อแรงดันไบอัสกลับที่ขั้วแคโทดลดลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 24 (ก) แสดงกระแสกับแรงดันไบอัสตรงกับขั้วคาโทดของแผ่นกระจกอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ (ข) แสดงกระแสกับแรงดันไบอัสย้อนกลับกับขั้วคาโทดของแผ่นกระจกอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์

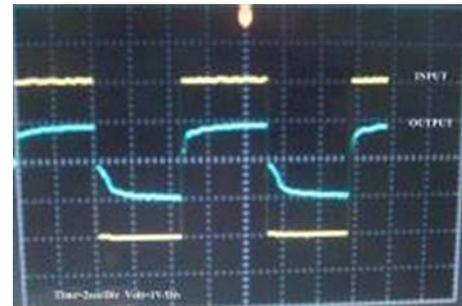
ออกไซด์ ที่เปรียบเสมือนกับการอัดประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ ลักษณะเช่นนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นมาใหม่ ในรอบถัดไปที่ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานมากหรือการใช้แรงดันที่น้อยกว่าเดิม

4.3 ลักษณะการตอบสนองด้านกระแสลับที่ความถี่ต่ำ

การทดสอบสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับด้วยการให้แรงดันไบอัสตรงและย้อนกลับสลับกันที่ความถี่ต่ำๆ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองทางด้านกระแสตรง ซึ่งจะเป็นการพิจารณาถึง



(ก)



Voltage = 1V / Div : Time : 2sec / Div

(ข)

รูปที่ 25 (ก) แสดงการเปลี่ยนสีของแผ่นกระจกอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ที่ได้รับการไบอัสกระแสสลับ (ข) แสดงสัญญาณกระแสสลับอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตจากแผ่นกระจกอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์

การตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาหรือการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าความสามารถของการปรับเปลี่ยนสีมีสภาพการเปลี่ยนของสีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ

ดังนั้นการกำหนดให้แรงดันไบอัสมีการเปลี่ยนแปลงตามคาบเวลาโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ Function generator เป็นสัญญาณรูปคลื่นพัลซที่มีคาบเวลา 2 วินาที ขนาดแรงดัน input: $V_{in} = 4V_{p-p}$ จากรูปที่ได้แสดงถึงลักษณะของสัญญาณพัลซที่ให้กับตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้น ในขณะที่ได้รับสัญญาณพัลซที่ด้านบวก และจะมีการเปลี่ยนสีลดลง เมื่อสัญญาณพัลซอยู่ที่ด้านลบ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ปรากฏ แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่าคงตัวเวลาของเนื้อสารดังแสดงในรูปที่ 25(ก) โดยที่สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น

อีกทั้งในการทดลองที่คาบเวลาที่ต่ำกว่านี้ หรือที่ความถี่สูงจะไม่สามารถพบการเปลี่ยนแปลงของสีได้เนื่องจากผลของ switching time ที่ต่ำของสารอิเล็กโทรโครมิกดังแสดงในรูปที่ 25(ข) ไม่สามารถตอบสนองที่ความถี่สูงได้อย่างรวดเร็ว นั้นหมายถึงความสามารถของประยุกต์ใช้ของวัสดุอิเล็กโทรโครมิกจึงไม่เหมาะที่จะเป็นวัสดุที่เป็นอุปกรณ์แสดงผลเหมือนกับจอ LCD แต่จะมีความเหมาะสมในการเป็นอุปกรณ์ปรับความเข้มแสงที่เหมือนกับ màn ปรับแสง

5. สรุป

วัสดุอิเล็กโทรโครมิกที่สร้างจากสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ และสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของเหลวโดยมีชั้นฟิล์มบางโลหะโปร่งแสงที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่ เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงทำให้ความเข้มสีเพิ่มขึ้น และเมื่อให้ไบอัสย้อนกลับก็จะเป็นการปรับลดความเข้มสีลง และยังมีสภาพการจำของสีเมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส โดยที่ประจุอออนจะไหลกลับในทิศทางตรงกันข้ามออกจากส่วนเนื้อสารที่จะมีการเปลี่ยนสี ไปยังส่วนของชั้นที่มีการนำประจุ นั่นคือชั้นของอิเล็กโทรไลต์ และกลับเข้าสู่ชั้นที่เก็บประจุอออนที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ สำหรับการเปลี่ยนสถานะ Switching time มีการเปลี่ยนสถานะที่ต่ำ จึงเหมาะต่อการประยุกต์เป็นกระจกปรับแสงอัจฉริยะ

6. ปัญหาและแนวทางการพัฒนา

จากการสร้างฟิล์มบางของทั้งสแตนออกไซด์ที่ได้พบว่าฟิล์มบางทั้งสแตนที่ได้ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากกระบวนการสร้างไม่สามารถลดระดับความดันให้ลดต่ำถึง 10^{-3} Pa ซึ่งทำให้สภาพบรรยากาศภายในถึงสูญญากาศมีก๊าซอื่นๆ เจือปนและส่วนของขั้วต่อของขั้วไฟฟ้าและส่วนของขั้วต่อเครื่องอุปกรณ์เซ็นเซอร์ อาจจะมีการรั่วซึมทำให้การฟุ้งกระจายของไอระเหยจากสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ไม่มีการกระจายตัวลงบนผิวนองกระจกได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งการเกาะตัวของสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ยังไม่เชื่อมกับเนื้อสาร ITO ซึ่งเป็นผลของการควบคุมความร้อนขณะที่ทำการปรับระดับกระแสเข้าสู่ให้ความร้อนทั้งสแตน เมื่อทำการเผาสารประกอบทั้งสแตนออกไซด์ให้ระเหยเป็นไอ ดังนั้นแนวทางแก้ไขจะต้องทำการออกแบบส่วนของขั้วต่อขั้วไฟฟ้าและขั้วต่อต่างให้ปราศจากการรั่วซึม และควรมีการใช้ปั๊มสูญญากาศที่มีสมบัติ

การดูดอากาศที่ต่ำมากๆ จึงจะเหมาะสม นอกจากนี้การใช้สารอิเล็กโทรไลต์ควรใช้สารละลายที่อยู่ในรูปของเจล Solution Gel หรือทำให้อยู่ในรูปของ Dry film electrolyte ที่ต้องใช้เทคนิคที่สูงและเครื่องมือการทดสอบจำเพาะ

แนวทางของการพัฒนาต้นแบบวัสดุอิเล็กโทรโครมิกนี้จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการสร้าง และการทดสอบการคงสภาพของสาร และการส่งผ่านของแสง และการปรับความเข้มขึ้นของการละลายอิเล็กโทรไลต์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ต้องขอขอบอาจารย์เพ็ญประภา สุวรรณะ อาจารย์ประจำหมวดวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ อาจารย์ประจำสำนักศึกษาทั่วไปที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือการเตรียมสารเคมีเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ต้องขอขอบคุณ ดร.รัชนิพร พุคยาภรณ์ พุกกะมาน อธิการบดีมหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยศรีปทุมทุนอุดหนุนงานวิจัยสำหรับบุคลากรภายในปีการศึกษา 2552

7. เอกสารอ้างอิง

- E. Avendano, L. Berggren, G.A. Niklasson , C.G. Granqvist, A. Azens. 2005 "Electrochromic materials and devices: Brief survey and new data on optical absorption in tungsten oxide and nickel oxide films" *Thin solid film*. Vol. 496, October 3, 30-36.
- J. Stefan E. M. Svensson and Claes G. Granqvist. 1987. "Optical properties of electrochromic hydrated nickel oxide coatings made by rf sputtering" *Applied optics*. Vol. 26, No.8. April, 1554-1556.
- U. Fischer, T. Hä usler, H. Rogaß , M. Rottmann, A. Kraff, K.- H. Heckner.2003. "Heat Transport and Thermal Expansion of Electrochromic Glazing systems with Voltage Controlled Transmission due to Solar Irradiation" *Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties*, June 22-27. Boulder, Colorado, U.S.A

Wienold, J. 2003 "Switchable façade technology".
Building integration-Final report. **Report number:**
swift-wp3-ise-jw-030616, Fraunhofer Institute for
Solar Energy Systems, Heidenhofstr. 2,D-79110
Freiburg. <http://www.eu-swift.de/>



>> **ดร.สัญญา คุณขาว**

สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยโตโก ประเทศญี่ปุ่น ปี 2548 ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2540 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเศรษฐศาสตร์เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2531 และวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ปี 2534

ปัจจุบันทำงานที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม