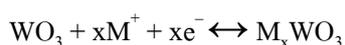
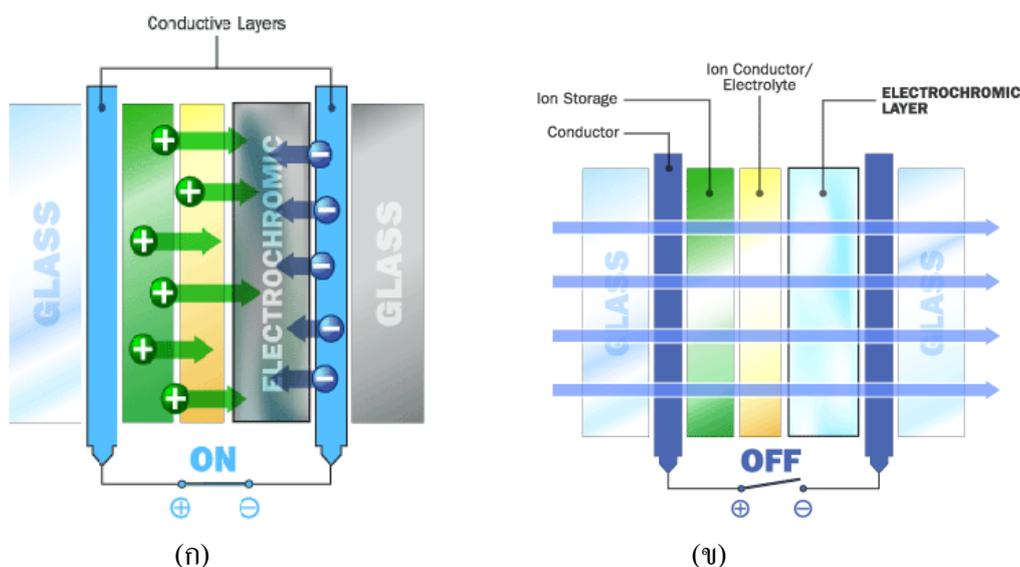


บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการนำเอาสารประกอบออกไซด์และขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง รวมทั้งสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ ด้วยการใช้แรงดันไฟฟ้าในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้า ทำให้สามารถปรับความเข้มของสีในเนื้อสารอิเล็กโทรโครมิกที่เคลือบบนกระจกที่ขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง ดังนั้นการปรับความเข้มสีสามารถกระทำได้ด้วยการให้แรงดันย้อนกลับ จากสารอิเล็กโทรโครมิก ที่เคลือบอยู่บนกระจกโปร่งแสง โดยกระบวนการของอิเล็กโทรโครมิกนั้นเป็นปฏิกิริยาของการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ อิเล็กโทรโครมิก ซึ่งเป็นพื้นฐานของการเปลี่ยนแปลงของสี จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเคมีที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไอออนบวกของไฮโดรเจน หรือ ประจุบวกจากธาตุอัลคาไลน์ ในโครงสร้างผลึกของออกไซด์ ซึ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรโครมิกจะเป็นกระบวนการย้อนกลับที่จะทำให้สีเกิดการจางลง โดยปกติแล้วระบบโครงสร้างของระบบนี้จะเกิดจากการสร้างชั้นสารของฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกอยู่บนกระจกโปร่งแสงที่เคลือบฟิล์มโลหะโปร่งแสงของอินเดียมทินออกไซด์ และมีสารอิเล็กโทรไลต์แทรกอยู่ระหว่างฟิล์มอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งจะเป็นชั้นที่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างกัน โดยเป็นโครงสร้างที่ซ้อนทับกันอยู่บนชั้นฟิล์มตัวนำโปร่งแสง นอกจากนี้การสวิตช์ของกระแสด้านย้อนกลับ และด้านตรงนั้นที่ผ่านเข้าสู่ตัวนำด้านนอก เป็นเหตุให้ประจุไอออนไหลผ่านเข้าสู่ส่วนกลางของอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นประจุจะเพิ่มขึ้น หรือลดลง เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเนื้อสารของวัสดุอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งจะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนความเข้มของสีบนกระจกได้ ในภาพประกอบ 61 เป็นกระบวนการทำงานกระจกที่ปรับความเข้มแสงได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโครมิกนั้นจะคล้ายคลึงกับเซลล์กัลวานิก ซึ่งขั้วไฟฟ้าส่วนแรกนั้นจะเป็นขั้วตัวนำที่โปร่งแสงหรือมีสีอ่อนๆ ในที่นี้จะเป็นสีของสารประกอบออกไซด์ ที่ถูกสร้างจากสารประกอบออกไซด์ของทั้งสแตโนออกไซด์ โดยการเชื่อมต่อกันด้วยสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาเคมีในการแทนที่ของประจุไอออนจากสมการรีดอกซ์สามารถแสดงได้ดังนี้



ซึ่งประกอบด้วย $\text{M}^+ = \text{H}^+, \text{Li}^+, \text{Na}^+$ หรือ K^+ และ ไอออนลบ e^- เข้าไปแทนที่อิเล็กตรอน โดยในแต่ละธาตุของสารเคมีที่เป็นอิเล็กโทรโครมิกกับสารอิเล็กโทรไลต์



ภาพประกอบ 61 แสดงโครงสร้างการทำงานของฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกอยู่บนกระจกโปร่งแสง(ก)สถานะที่ไม่ได้รับการไบอัสแสงสว่างจะสามารถผ่านเข้าสู่กระจกได้ และ(ข)สถานะที่ได้รับการไบอัสฟิล์มอิเล็กโทรโครมิกจะปรับความเข้มสีซึ่งแสงจะไม่สามารถผ่านออกไปได้

สิ่งประดิษฐ์จากวัสดุอิเล็กโทรโครมิกซึ่งเป็นวัสดุประเภทสารออร์แกนิก สารอินออร์แกนิก และสารประกอบโพลิเมอร์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนสี และการให้แสงผ่านเพื่อการมองเห็น ซึ่งเป็นผลจากสนามไฟฟ้า และผลของปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนทั้งการให้หรือส่งอิเล็กตรอน หรือประจุไอออนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนของความเข้มสี ความสำคัญของกระจกที่ได้รับการเคลือบสารอิเล็กโทรโครมิกจะมีความสามารถตอบสนอง หรือ การรับรู้ต่อสภาวะการภายนอก เพื่อผลในการควบคุมการทำงานได้อย่างอัจฉริยะซึ่งเป็นสมบัติของกระจกอัจฉริยะ “Smart window” ในการปรับความเข้มสี และการสะท้อนคลื่นพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ซึ่งทำให้ลดอัตราการขยายตัวทางความร้อนได้ดี เป็นผลให้การใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของระบบการทำงาน of สารละลายประเภทออร์แกนิก (Organic) จะเป็นสารประกอบพวก ไวโวลเจน, แอนทราควิโนเนส, ดิพทราโลโคนินส์ และ เทรทราไทฟูวาเลนส์ ซึ่งในสารประกอบออร์แกนิกจะมีการเกิดสีด้วยผลของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน(oxidation-reduction) ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้สองอย่างซึ่งมีทั้งไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับ โดยองค์ประกอบของไวโวลเจน ในปฏิกิริยาย้อนกลับในลำดับที่สองของการเปลี่ยนความเข้มสีนั้นค่อนข้างมีปัญหา เนื่องจากผลของส่วนของสารที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

นั้นละลายเจือจางอยู่สารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแพร่เข้าไปในส่วนของขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าจ่ายกลับเข้าไปในวงจร อย่างไรก็ตามปัญหาอีกสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อนำแหล่งจ่ายแรงดันออกจากตัวเซลล์กระจกแล้วจะพบว่าบางส่วนของประจุอออนจะเกิดการส่งถ่ายออกมา ทำให้สีที่มีอยู่นั้นจางหายไป ในลักษณะนี้จะไม่มีการจดจำค่าสีไว้คงที่ตลอด ทำให้ตัวเซลล์กระจกต้องทำการจ่ายแรงดันไว้ตลอดเวลาเพื่อให้เกิดการคงสภาพของสีซึ่งในลักษณะนี้เป็นผลที่ไม่ก่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน(Granqvist,2000:201-262)(A.Roos,2005:214-223)

โครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์อิเล็กโทรโครมิก ประกอบด้วยขั้วโลหะโปร่งแสงที่ใช้ในการนำไฟฟ้า และเกิดการจ่ายของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยมีการเคลือบฟิล์มบางของสารโลหะออกไซด์ที่เป็นอิเล็กโทรโครมิก ซึ่งมีประจุอออนบวกเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน และสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการนำประจุอออน เรียงตามลำดับเป็นชั้นเรียงลำดับกัน ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะสร้างขึ้นห้าชั้นความหนา หรือน้อยกว่าก็ได้ เมื่อตัวเซลล์ของกระจกอิเล็กโทรโครมิกได้รับการจ่ายแรงดันจะทำให้ประจุอออน ของ Li^+ หรือ H^+ และอิเล็กตรอนนั้นถูกฉีดเข้าไปยังสารประกอบโลหะออกไซด์ที่เป็นส่วนของชั้นอิเล็กโทรโครมิก เช่นทังสเตนออกไซด์ ก็จะแสดงสมบัติของการเปลี่ยนความเข้มสีในชั้นของอิเล็กโทรโครมิกด้วยลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบงานวิจัยและทำการสร้างโครงสร้างอย่างง่ายของสิ่งประดิษฐ์อิเล็กโทรโครมิกตามขั้นตอนของกระบวนการสร้างแบบการควบคุมด้วยภาชนะหรือห้องสุญญากาศ และการอบเนื้อสารให้มีความเกาะตัวกัน และทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า และวิเคราะห์ผลการทดลอง ด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง

การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้านั้นเพื่อต้องการศึกษากระบวนการของการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า กับชั้นงานที่ทำการสร้างส่วนของชั้นอิเล็กโทรโครมิก เช่นทังสเตนออกไซด์ ที่แสดงสมบัติของการเปลี่ยนความเข้มสีและการคงสภาพของสีเมื่อได้รับการให้แรงดันไปโดยตรงและย้อนกลับซึ่งเป็นการควบคุมการกระตุ้นของการฉีด และการแยกของอิเล็กตรอนและอออน โลหะเข้าสู่ชั้นของออกไซด์ของทังสเตนออกไซด์ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ $NaCl$, KNO_3 และ KOH ที่ความเข้มข้น 0.1M

การตอบสนองต่อแรงดันไบอัสกระแสตรง

ในภาพประกอบ 61(ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างของเซลล์กระจกหน้าต่างอิเล็กโทรโครมิกที่ออกแบบเป็นชั้นเรียงซ้อนกัน ซึ่งประกอบด้วยชั้นของขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่เป็นฟิล์มบางเคลือบบนกระจก ITO ต่อไปเป็นชั้นที่มีการเก็บสะสมประจุ จากนั้นเป็นชั้นของอิเล็กโทรไลต์ หรือชั้นการ

นำอ็อน ซึ่งในลำดับต่อไปเป็นชั้นของสารประกอบออกไซด์ที่เป็นส่วนของอิเล็กโทรโครมิกที่มีการเปลี่ยนความเข้มสี ในลำดับสุดท้ายคือชั้นของขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงเคลือบบนกระจกแล้วทำการฉีกผิวด้านข้างของกระจกให้สนิทเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเนื้อสารที่เคลือบอยู่

ในการทดสอบคุณสมบัติของการจำในตัวเซลล์จากปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่มีอยู่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า หรือการที่ชั้นประจุถูกเก็บสะสมซึ่งจะยังคงอยู่จนกว่าจะมีการให้แรงดันอีกครั้ง ผลดังกล่าวเพื่อเป็นการย้อนกลับปฏิกิริยารีดอกซ์ นั้นหมายถึงการที่เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันได้ถูกนำออกจากวงจรแล้วความเข้มของสียังคงสภาพอยู่เป็นเวลานาน ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานกับตัวเซลล์อิเล็กโทรโครมิก ด้วยการทำการทดสอบปฏิกิริยาเคมีระหว่างกระจก ITO กับกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ โดยสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ NaCl (0.1M) โพแทสเซียมไนเตรท KNO_3 (0.1M) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ KOH (0.1M) ซึ่งให้การไบอัสเข้ากับแผ่นกระจกทั้งสอง โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนอ็อน หรือจะใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วอิเล็กโทรด แทนกระจก ITO และแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ การกระทำเช่นนี้เพื่อไม่ให้สาร ITO เกิดการเสียหายเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านเนื้อสารทำให้เกิดการล่อนของสาร ITO ที่เคลือบไว้ โดยจะมีสีเป็นสีน้ำตาลดังแสดงในภาพประกอบ 62 ซึ่งการทดสอบจะใช้สารละลายของโซเดียมคลอไรด์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ จากการทดสอบจะพบว่าเมื่อเริ่มให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนสีของกระจกที่เคลือบสารมีการเปลี่ยนเป็นสีฟ้าดังแสดงในรูป 63

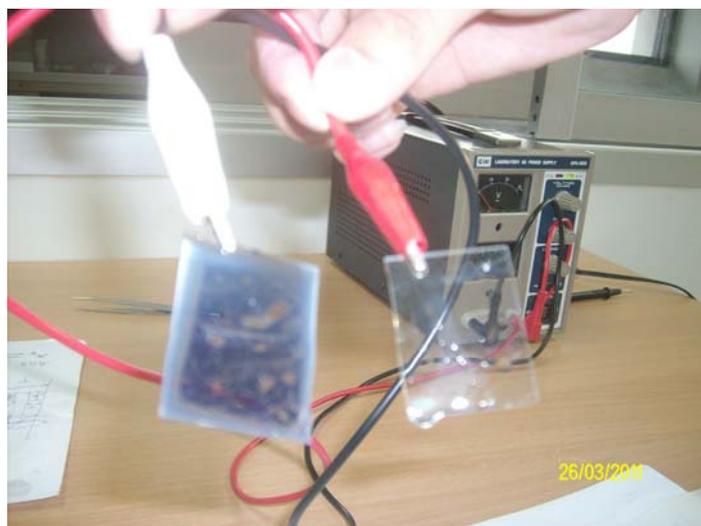


ภาพประกอบ 62 แสดงการเสียหายของแผ่นกระจก ITO ที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล



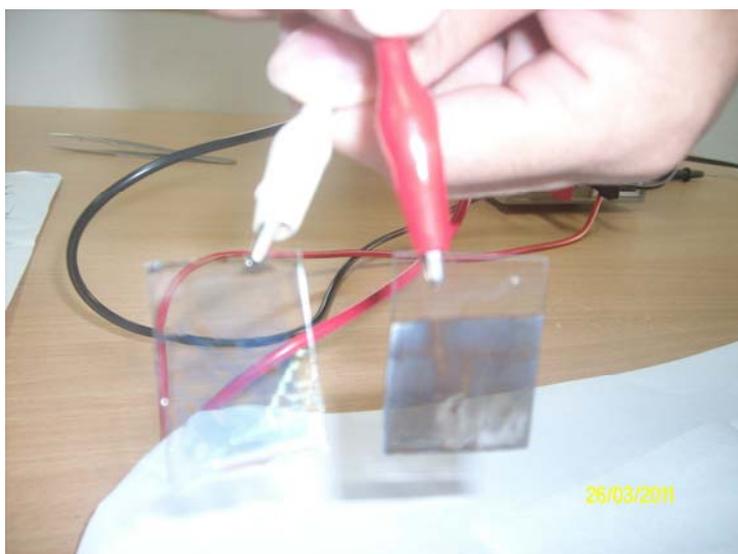
ภาพประกอบ 63 แสดงแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์
เมื่อได้รับการ ไบอัสจะมีการเปลี่ยนเป็นสีฟ้า

เมื่อหยุดให้การไบอัสแผ่นกระจกที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ นั้นจะยังคงสภาพของสีไว้นั้น หมายถึงสภาพของจากจำของประจุไอออนที่เกิดการเปลี่ยนสียังคงสภาพเดิม โดยในการคงสภาพของสีนี้ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นสามารถทำให้เกิดกลุ่มของโมเลกุลของสาร M_xWO_3 ซึ่งประกอบด้วย ประจุไอออน $M^+ = K^+$ และ Na^+ ที่เป็นโพแทสเซียมไอออนและโซเดียมไอออนที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KNO_3 และ $NaCl$ ดังแสดงในรูปภาพประกอบ 64

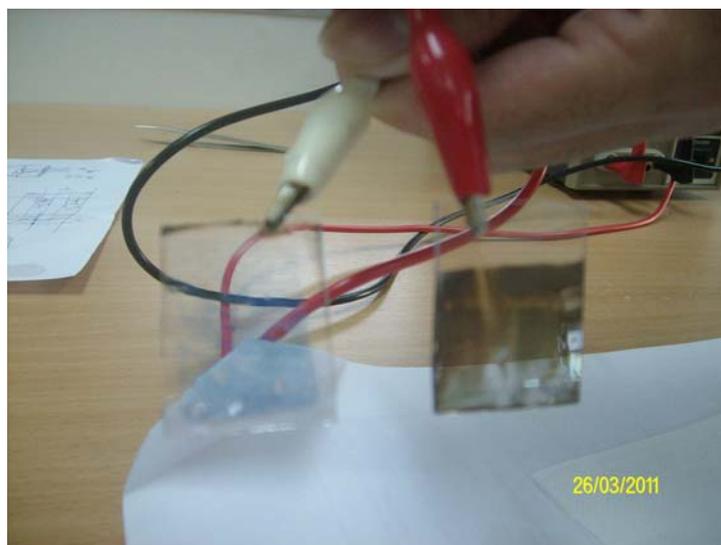


ภาพประกอบ 64 แสดงแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์เมื่อหยุดให้การไบอัสจะยังคงสภาพเป็นน้ำเงิน

ในลำดับต่อจากนั้นจะเป็นการทดลองให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะพบว่ากระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ที่มีสีฟ้าจะเปลี่ยนกลับเป็นสีน้ำตาล และแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ที่ไม่มีสีจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าแทนนั้นหมายถึงมีการกลับของปฏิกิริยารีดอกซ์ ที่เป็นแบบย้อนกลับ ทำให้ประจุไอออนของ Na^+ , K^+ หรือ H^+ โดยอิเล็กตรอนเหล่านั้นได้ถูกฉีดเข้าไปยังสารประกอบโลหะออกไซด์ที่เป็นส่วนของชั้นอิเล็กโทรโครมิก เช่นทังสเตนออกไซด์ ก็จะแสดงสมบัติของการเปลี่ยนความเข้มสีในชั้นของอิเล็กโทรโครมิกดังแสดงในภาพประกอบ 65



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 65 แสดง(ก)กระจก ITO ที่เคลือบสาร WO_3 ก่อนไบอัสย้อนกลับ

(ข)ภายหลังการได้รับไบอัสย้อนกลับที่มีการสลับด้านการเปลี่ยนสี

การตอบสนองต่อแรงดันไบอัสกระแสตรงด้วยขั้วไฟฟ้าโลหะ

สำหรับการใช้แผ่นขั้วอะลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วอิเล็กโทรดแทนกระจก ITO และแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ เพื่อไม่ให้สาร ITO ที่เคลือบอยู่บนกระจกเกิดการเสียหายเนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านเนื้อสารมากทำให้เกิดการล่อนของสาร ITO ที่เคลือบไว้ในการทดสอบด้วยการใช้แผ่นโลหะอะลูมิเนียมจะเป็นส่วนที่มีการสะสมของประจุออดนดังแสดงในภาพประกอบ 66 ในขณะที่กระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ได้รับการไบอัสแรงดันในช่วง 0-3 โวลต์ พบว่ามีการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นเป็นสีฟ้า และเมื่อหยุดการให้แรงดันไบอัสก็ยังคงสภาพของสีดั้งเดิม ซึ่งแสดงได้ดังภาพประกอบ 67 และในทางกลับกันเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับระหว่างขั้วอะลูมิเนียม กับแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์ ซึ่งเป็นการทำให้สภาพการเปลี่ยนสีลดลงดังในภาพประกอบ 68



(ก)

ภาพประกอบ 66 แสดงสภาพก่อนการให้ไบอัสแรงดันกับกระจก ITO ที่เคลือบสารทั้งสแตนออกไซด์

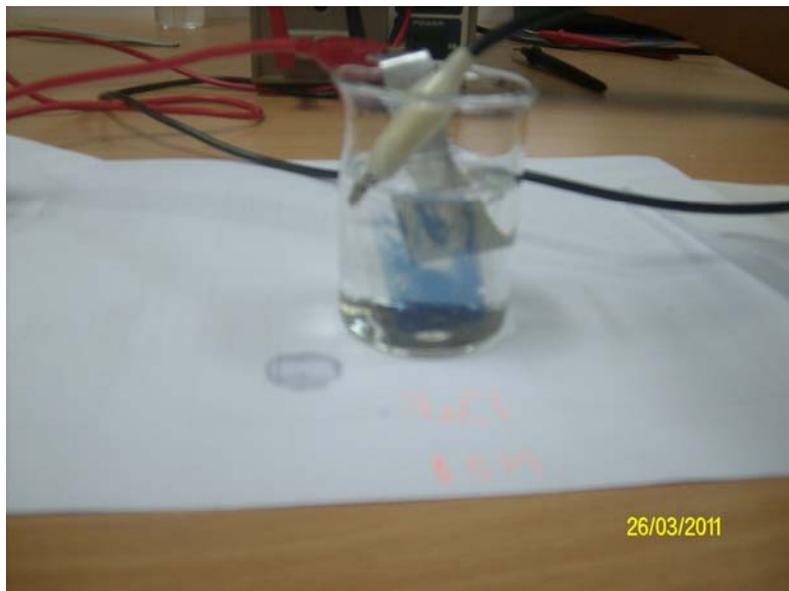


(ก)

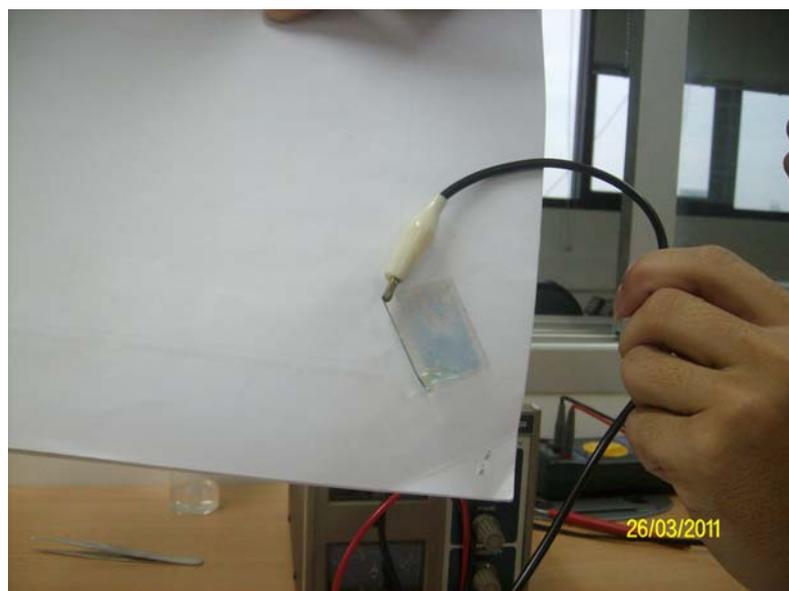


(ข)

ภาพประกอบ 67 (ก) ภายหลังจากได้รับไบอัส 0-3V ที่มีการเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าเข้มขึ้น (ข) การคงสภาพของสีน้ำเงินบนแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ เมื่อไม่ได้รับการไบอัส



(ก)

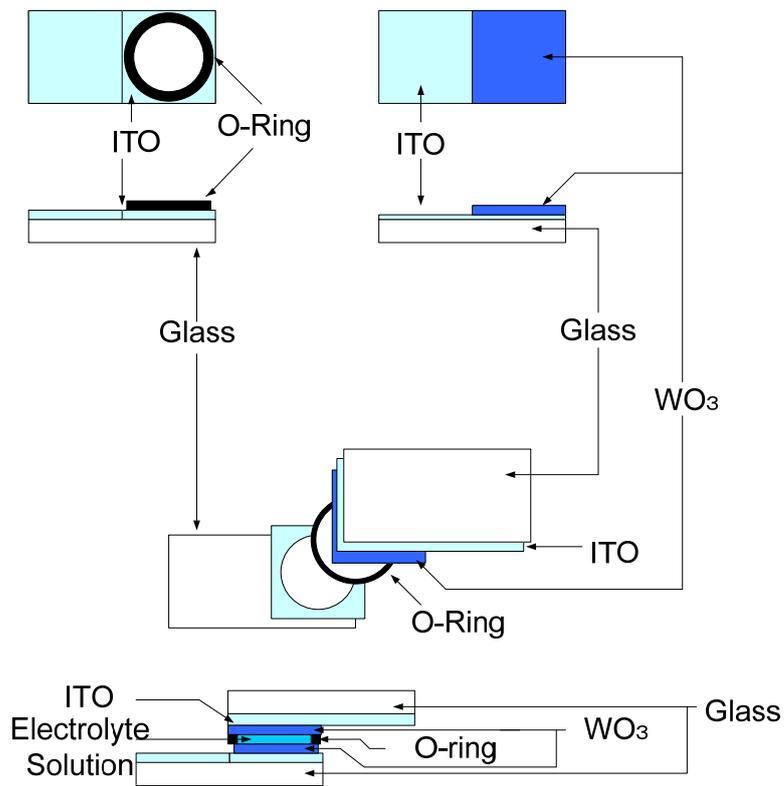


(ข)

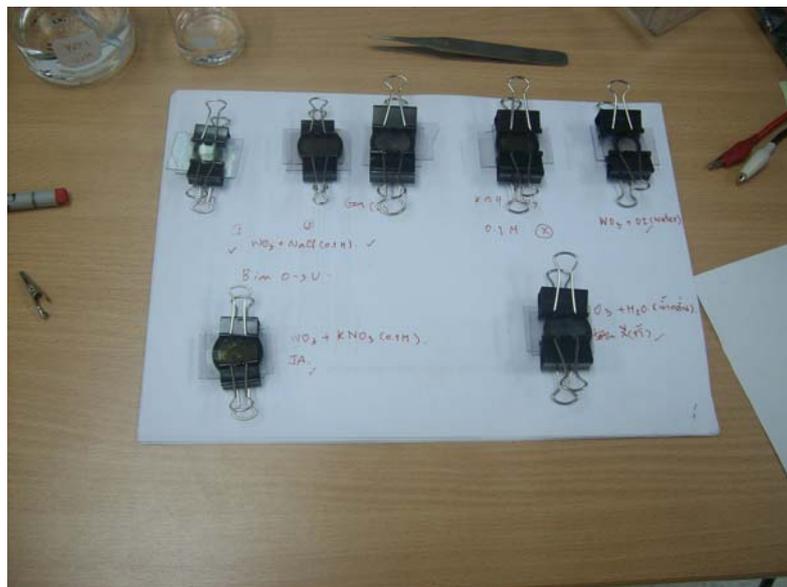
ภาพประกอบ 68 (ก)การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับกระจก ITO ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ ที่มี
การเปลี่ยนสีลดลง (ข) การเปลี่ยนสีบนแผ่นกระจก ITO ที่เคลือบทังสเตนออกไซด์ ที่สภาพการเปลี่ยนสี
ลดลง

การทดสอบโครงสร้างแบบซ้อนทับ

เทคโนโลยีการสร้างกระจกอิเล็กทรอนิกส์โครมิกสามารถสร้างได้ โดยการใช้กระจกแผ่นเรียบทำการเคลือบชั้นตัวนำโปร่งของโลหะออกไซด์ด้วยการใช้เทคนิคการเคลือบแบบไอระเหย (Evaporation) ลงบนกระจกแผ่นเรียบขนาดใหญ่ จากนั้นจะเป็นชั้นของสารวัสดุอิเล็กทรอนิกส์โครมิก โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารทังสเตนออกไซด์ จากนั้นจะเป็นชั้นสะสมการนำประจุ Ion Conductor(IC) หรือชั้นของอิเล็กทรอนิกส์โพลีที่มีไอออนสำหรับการนำไฟฟ้าประมาณ 10^{-3} - 10^{-6} โหมห์ต่อเซ็นติเมตร(s/cm) ประจุไอออนที่สะสมอยู่จะถูกใช้ในการกำเนิดสีโดยจะให้ประจุโปรตรอนจากธาตุไฮดรอกซิลไอออน ซึ่งมีประจุไอออนบวกของไฮโดรเจน(H^+) หรือ โซเดียมไอออน (Na^+) ในการทดสอบจะใช้สารจำพวก Liquid electrolyte ที่เป็นสารอิเล็กทรอนิกส์โพลีที่เป็นของแข็งที่สามารถทำการเคลือบเป็นฟิล์มได้ และชั้นฟิล์มบางโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า นั่นคือชั้นของอิเล็กทรอนิกส์โครมิกเช่นเดียวกัน โดยที่ขั้วด้านหนึ่งจะเป็นขั้วแอโนด และอีกด้านหนึ่งจะเป็นคาโทดที่มีการเกิดสี และการจางหายไปของสีทั้งสองด้านในขณะที่ได้รับการจ่ายแรงดัน ดังนั้นจากแนวทางนี้ได้มีการปรับใช้สารอิเล็กทรอนิกส์โครมิกในการเพิ่มความหนาแน่นของสีได้ โดยการออกแบบให้สารอิเล็กทรอนิกส์โครมิกเคลือบอยู่ทั้งสองด้านให้มีความแตกต่างกันในลักษณะซ้อนทับกัน ภายหลังจากการทดสอบกระจกเคลือบโลหะโปร่งแสง ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ กับสารละลายอิเล็กทรอนิกส์โพลีชนิดต่างๆสำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์ แล้วจึงทำการออกแบบตัวอย่างโครงสร้างเพื่อใช้ในการทดสอบดังภาพประกอบ 69 แสดงชิ้นงานต้นแบบที่ทำการประกอบติดตั้งเข้ากันเป็นแบบซ้อนทับหรือแบบแซนด์วิช โดยโครงสร้างนี้จะใช้กระจกเคลือบโลหะโปร่งแสง ที่ได้รับการเคลือบทั้งสเตนออกไซด์ แล้วใช้ยางรูปวงแหวน (O-ring) จัดวางไว้ที่ผิวด้านบนเพื่อใช้เป็นส่วนบรรจุสารอิเล็กทรอนิกส์โพลี โดยสารอิเล็กทรอนิกส์โพลีที่ใช้ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ $NaCl(0.1M)$ โพแทสเซียมไนเตรท $KNO_3(0.1M)$ และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $KOH(0.1M)$ จากนั้นทำการฉีกส่วนของกระจกเคลือบโลหะโปร่งแสง ที่เคลือบสารทังสเตนออกไซด์ เมื่อประกอบเสร็จก็สามารถนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยที่ชิ้นงานที่ประกอบแล้วจะทำการฉีกด้วยตัวหนีบเพื่อไม่ให้สารอิเล็กทรอนิกส์โพลีไหลออกจากภายในของยาง O-ring ซึ่งเป็นสถานะที่ยังไม่ได้รับการจ่ายแรงดันจะไม่เกิดการเปลี่ยนสีดังภาพประกอบ 70 แสดงชิ้นงานต้นแบบที่ขณะที่ยังได้รับการจ่ายแรงดันจะมีการเปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้น การทดสอบโครงสร้างที่เตรียมขึ้นด้วยการให้แรงดันกระแสตรงและย้อนกลับ ที่ช่วงแรงดันไบอัสตรง 0-3.6 โวลท์จะพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของสีตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัส ดังภาพประกอบ 71 สำหรับการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับขั้วคาโทดจะเป็นการทำให้สีที่แผ่นกระจกเคลือบโลหะโปร่งแสง ที่มีสารทังสเตนออกไซด์จางลง ดังภาพประกอบ 72 จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ในขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับที่เป็นการแสดงถึงการเกิดขึ้นของสี และการจางหายของสี



ภาพประกอบ 69 ลักษณะการจัด โครงสร้างของกระบอกอิเล็กโทรโครมิกที่เรียงกันเป็นชั้น



ภาพประกอบ 70 แสดงต้นแบบที่เตรียมสำหรับการทดสอบทางไฟฟ้า

(ก) แรงดัน ไบอัส 0 V และกระแส 0 μ A(ข) แรงดัน ไบอัส 1.025 V และกระแส 37.63 μ A(ค) แรงดัน ไบอัส 2.0178V และกระแส 114.64 μ A(ง) แรงดัน ไบอัส 2.5399V และกระแส 363.69 μ A

(จ) แรงดัน ไบอัส 3.0301 V และกระแส 1.7463mA



(ฉ) แรงดัน ไบอัส 3.291 V และกระแส 1.1172mA



(ช) แรงดัน ไบอัส 3.523 V และกระแส 2.2273mA



(ฐ) แสดงการคงสภาพของสีเมื่อไม่มีแรงดัน ไบอัส

ภาพประกอบ 71 แสดงการเพิ่มขึ้นของกระแสและสีที่เข้มขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสตรงที่เพิ่มขึ้น



(ก) แรงดัน ไบอัส 0.0728 V และกระแส 313.07 μA (ข)แรงดัน ไบอัส 0.661 V และกระแส 281.93 μA



(ค) แรงดันไบอัส 1.0115 และกระแส 227.85 μA (ง)แรงดันไบอัส 1.8057V และกระแส 201.25 μA



(จ) แรงดันไบอัส 2.366 V และกระแส 224.15 μA (ฉ)แรงดันไบอัส 2.9989 V และกระแส 535.1 μA



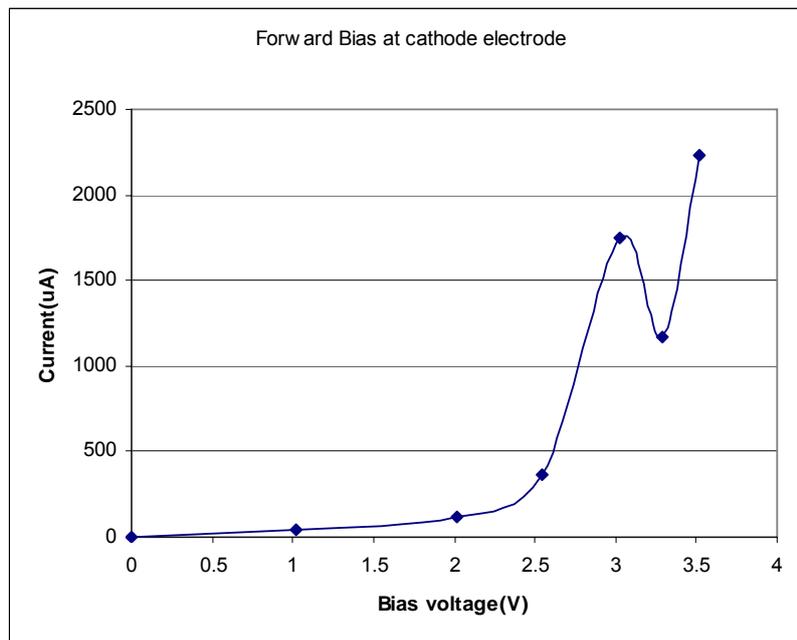
(ช)แรงดันไบอัส 3.2241V และกระแส 1.0145 mA (ฃ) แรงดันไบอัส 3.527 V และกระแส 2.2696mA

ภาพประกอบ 72 แสดงการลดลงของกระแสและสีที่จางลงเมื่อแรงดันไบอัสกลับที่ขั้วคาโทดลดลง

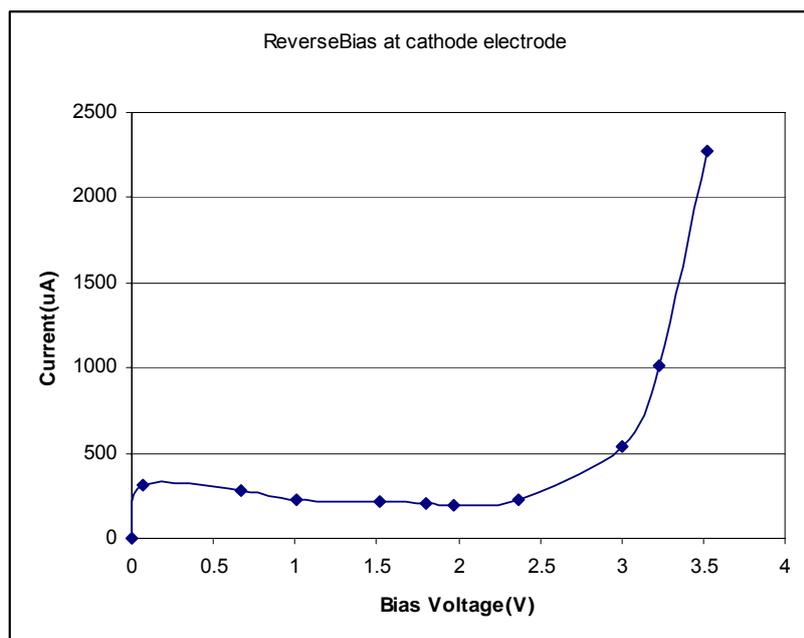
จากภาพประกอบ 73(ก) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของกระแส กับแรงดัน โดยขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรงเพิ่มขึ้นในช่วง 0-3.5 โวลต์ พบว่ามีการปรับเปลี่ยนสีของของสารอิเล็กโทรโครมิกที่ประกอบด้วยส่วนของสารประกอบทั้งสองชนิดออกไซด์มีการเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเข้มเพิ่มขึ้นโดยสังเกตได้จากปริมาณของกระแสที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ในช่วง 0-2.5 โวลต์ จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันนี้จะเป็นช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยถ้าสังเกตจากการเปลี่ยนสีในช่วงแรงดันดังกล่าวจะพบว่ากระแสมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยแบบเป็นเชิงเส้น ซึ่งเมื่อผ่านช่วงแรงดันตั้งแต่ 2.5-3.5 โวลต์พบว่ากระแสมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นโดยการเปลี่ยนสีเริ่มปรากฏให้เห็นจนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือช่วงของการเกิดสี “Coloring”

สำหรับภาพประกอบ 73(ข) เป็นการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับกับชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ ในขณะที่ให้แรงดันไบอัสตรงในช่วงแรงดัน 0-3.5 โวลต์ โดยการกลับขั้วแรงดันไบอัสที่ขั้วอิเล็กโทรด จะพบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สภาพของปฏิกิริยาเคมีระหว่าง (WO_3) และอิเล็กตรอนที่เก็บอยู่ที่ขั้วของแผ่นกระจกที่มีการนำไฟฟ้าเข้าสู่ชั้นของแถบพลังงานของแถบการนำไฟฟ้าของสารอิเล็กโทรโครมิกซึ่งเป็นการลดการดูดซับโมเลกุลของ H_xWO_3 (blue) เป็นผลให้เกิดการจางของสีซึ่งเปรียบเสมือนปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยารีดอกซ์ จากผลการทดลองพบว่าขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนั้นเมื่อการเปลี่ยนสีลดลงนั้นมีกระแสไม่ลดต่ำลงเป็นศูนย์เหมือนกันกับขณะที่ให้ไบอัสตรง ซึ่งเป็นผลของสภาพการจำของสี หรืออาจจะเกิดจากสภาพของเนื้อผลึกระหว่างสารทั้งสองชนิดออกไซด์กับสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ หรือระหว่างสารเคลือบโลหะโปร่งแสง

จากขั้นตอนกระบวนการเคลือบทั้งสองชนิดนี้ พบว่าการเกาะติดของเนื้อสารไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากการดูดอากาศของปั๊มสุญญากาศนั้นไม่สามารถกระทำได้ที่ 10^{-4} Pa ทำให้การจับเกาะติดของทั้งสองชนิดออกไซด์กับเนื้อสาร ITO ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น จึงควรมีการอบกระจก ITO ที่ได้รับการเคลือบสารประกอบทั้งสองชนิด เป็นการทำให้อายุการใช้งานของสารทั้งสองชนิดกับเนื้อสารเคลือบโลหะโปร่งแสง ดีขึ้นด้วยการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 73 (ก) แสดงกระแสกับแรงดัน ไบอัสตรงกับขั้วคาโทดของแผ่นกระจก ITO+WO₃

(ข) แสดงกระแสกับแรงดันไบอัสย้อนกลับกับขั้วคาโทดของแผ่นกระจก ITO+WO₃

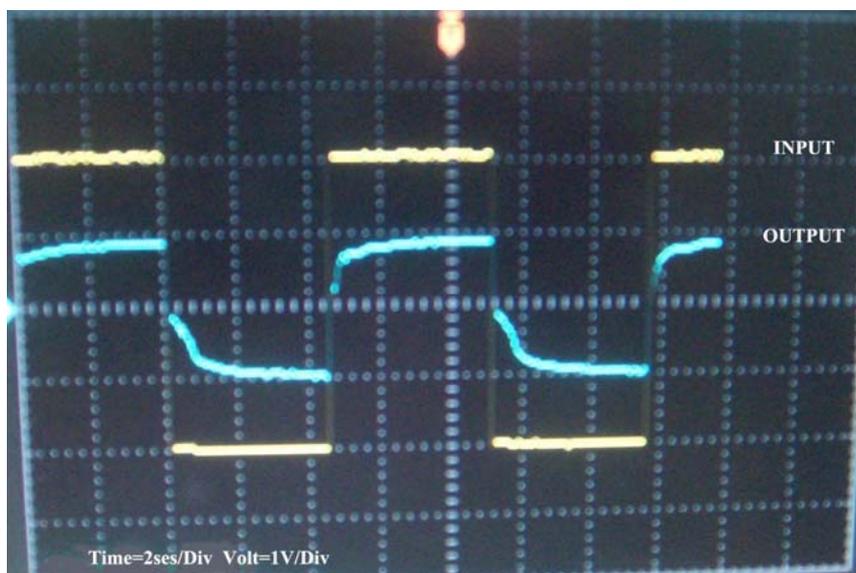
การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ

การตอบสนองของสัญญาณกระแสสลับ

การทดสอบสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับเป็นการให้แรงดัน ไซนัสตรงและย้อนกลับสลับกันที่ความถี่ต่างๆ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองทางด้านกระแสตรง ซึ่งการให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจะเป็นการพิจารณาถึงการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาหรือการแลกเปลี่ยนอออนซึ่งในที่นี้พบว่าความสามารถของการปรับเปลี่ยนสีมีสภาพการเปลี่ยนของสีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ด้วยการให้แรงดัน ไซนัสจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ Function generator ด้วยสัญญาณพัลส์ที่คาบเวลา 2 sec ขนาดแรงดัน input: $V_{in} = 4V_{p-p}$ จากภาพประกอบได้แสดงถึงลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ให้กับตัวอย่างชิ้นงาน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้นในขณะที่ได้รับสัญญาณพัลส์ด้านบวก และจะมีการเปลี่ยนสีลดลงเมื่อสัญญาณพัลส์อยู่ที่ด้านลบ ซึ่งสัญญาณเอาท์พุทที่ปรากฏแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อแรงดัน ไซนัสเพิ่มขึ้น และลดลงตามค่าคงตัวของเนื้อสารดังแสดงในภาพประกอบ 74 โดยที่สัญญาณเอาท์พุทมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น อีกทั้งในการทดลองที่คาบเวลาที่ต่ำกว่านี้ หรือที่ความถี่สูงจะไม่สามารถพบการเปลี่ยนแปลงของสีได้เนื่องจากผลของ switching time ของสารอิเล็กโตรโครมิกดังแสดงในภาพประกอบ 75 ไม่สามารถตอบสนองที่ความถี่สูงได้อย่างรวดเร็ว นั้นหมายถึงความสามารถของประยุกต์ใช้ของวัสดุอิเล็กโตรโครมิกจึงไม่เหมาะที่จะเป็นวัสดุที่เป็นอุปกรณ์แสดงผลเหมือนกับจอ LCD แต่จะมีความเหมาะสมในการเป็นอุปกรณ์ปรับความเข้มแสงที่เหมือนกับ màn ปรับแสง



ภาพประกอบ 74 แสดงการเปลี่ยนสีของแผ่นกระจก $ITO + WO_3$ ที่ได้รับการไบอัสกระแสสลับ



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

ภาพประกอบ 75 สัญญาณอินพุตกระแสสลับและสัญญาณเอาต์พุตจากสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์โทรโครมิก

สรุป

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากทั้งสแตนออกไซด์และสารอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นของเหลวโดยมีชั้นฟิล์มบางโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า ที่เป็นชั้นของอิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกัน เมื่อให้แรงดันไบอัสทำให้ความเข้มสีเพิ่มขึ้นและเมื่อให้ไบอัสย้อนกลับก็จะเป็นการปรับลดความเข้มสีลง และยังมีสภาพการจำของสีเมื่อไม่ได้รับแรงดันไบอัส โดยที่ประจุอินออนจะไหลกลับในทิศทางตรงกันข้ามออกจากส่วนเนื้อสารที่จะมีการเปลี่ยนสี ไปยังส่วนของชั้นที่มีการนำประจุ นั่นคือชั้นของอิเล็กทรอนิกส์ และกลับเข้าสู่ชั้นที่เก็บประจุอินออน ที่เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ สำหรับการเปลี่ยนสถานะ switching time มีการเปลี่ยนสถานะที่ต่ำ