

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นที่ให้ค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำ ที่สร้างจากระบบฟิล์มสองระบบได้แก่ (ก) ระบบฟิล์มเงินชั้นเดียว คือ Glass-ZnO-Ag-ZnO และ Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO และ (ข) ระบบฟิล์มเงินสองชั้นคือ Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO-Ag-Ti-ZnO โดยฟิล์มทั้งหมดดังกล่าว ถูกเคลือบบนกระจกสไลด์และกระจกอาคารโดยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีพัลส์แมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง ระบบฟิล์มบางนี้มีสมบัติที่สำคัญ คือ มีการส่งผ่านแสงในช่วงตามองเห็น ( $0.38\text{-}0.78\ \mu\text{m}$ ) และสามารถสะท้อนแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ ( $0.8\text{-}21\ \mu\text{m}$ ) ได้ดี และให้ค่าการปลดปล่อยรังสีในช่วงคลื่นความร้อน ( $0.2\text{-}21\ \mu\text{m}$ ) ต่ำ

การสร้างองค์ความรู้ของฟิล์มบางแต่ละชั้นได้แก่ ฟิล์มซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ฟิล์มเงิน (Ag) และฟิล์มไททาเนียม (Ti) เป็นส่วนสำคัญพื้นฐานของการศึกษานี้เพื่อสามารถพัฒนาระบบฟิล์มดังกล่าวข้างต้นให้มีสมบัติตามต้องการ ในกรณีของฟิล์มซิงค์ออกไซด์ ได้ทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ กำลังไฟฟ้า เวลาเคลือบ และเปอร์เซ็นต์ผสมของก๊าซออกซิเจน ( $\%O_2$  mixture) โดยมีความดันขณะเคลือบอยู่ระหว่าง  $3\text{-}6 \times 10^{-3}$  mbar เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หา ความหนา รูปแบบการจัดเรียงตัวของผลึก สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง การปลดปล่อยรังสี และสีของระบบฟิล์มเคลือบที่ได้ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าในช่วง 30-70 W ฟิล์มจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกบนกระจกตามระนาบ (002) เพียงระนาบเดียว ดัชนีหักเหของฟิล์มมีค่าประมาณ 2.0 ที่ความยาวคลื่น 500 nm นอกจากนี้ยังพบว่าที่ กำลังไฟฟ้า

## T 156075

มากกว่า 50 W คำนี้นักของฟิล์มมีค่าคงที่ตลอดเนื้อฟิล์ม และพบว่า %O<sub>2</sub> mixture มีค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30-40% ที่ให้ค่าการส่งผ่านช่วงตามองเห็น และช่วงอินฟราเรดใกล้มีค่า %T<sub>vis</sub> ≈ 84% และ %T<sub>NIR</sub> ≈ 83% ตามลำดับ และมีขอบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 375 nm หรือมีช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) ที่ 3.31 eV และดูดกลืนที่ช่องว่างพลังงานสมบูรณ์ที่ความหนา ประมาณ 275 nm และมีค่าการปลดปล่อยรังสี (E) ในช่วงความยาวคลื่น 3-30 μm ประมาณ 0.88 ซึ่งใกล้เคียงกับกระจกที่ยังไม่ผ่านการเคลือบ

ในการศึกษาชั้นฟิล์มเงิน พบว่าการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าในช่วง 100-150 W แต่รักษาพลังงานให้คงที่เท่ากับ 3000 J จะพบว่าค่าความต้านทานเชิงพื้นผิว (R<sub>s</sub>) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.59-0.64 Ohm/sq การศึกษาโดยละเอียดของฟิล์มเงินที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 100 W เพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งในระบบฟิล์มเนื่องจากมีความต้านทานเชิงพื้นผิวดำ พบว่าฟิล์มมีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) และเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น %T<sub>vis</sub> และ %T<sub>NIR</sub> มีค่าลดลง แต่ค่าดัชนีกระจกสะท้อนความร้อน (Heat Mirror Index, HMI) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนา 8-20 nm ให้ค่า %T<sub>vis</sub> ≈ 36-63% และ %T<sub>NIR</sub> ≈ 12-48% นอกจากนี้ฟิล์ม Ag ที่ได้ มีค่า E อยู่ในช่วง 0.04-0.15 ค่า R<sub>s</sub> อยู่ในช่วงประมาณ 15-3 Ohm/sq และให้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ประมาณ 6-10 μOhm-cm

ชั้นฟิล์มบางไททาเนียมมีหน้าที่สำคัญในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มเงินในระหว่างการเคลือบ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ค่า %T<sub>vis</sub> และ %T<sub>NIR</sub> มีค่าลดลง โดยที่ความหนา 1-3 nm ให้ค่า %T<sub>vis</sub> ≈ 88-91% และ %T<sub>NIR</sub> ≈ 91-92% นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่า ความหนาของชั้นฟิล์มไททาเนียมที่มีค่ามากกว่า 0.8 nm เป็นความหนาที่สามารถป้องกันการเกิดออกไซด์บนชั้นฟิล์มเงินในขณะเคลือบได้

จากความรู้ในการเคลือบฟิล์มชั้นต่างๆ เมื่อนำมาใช้สร้างระบบฟิล์ม Glass-ZnO-Ag-ZnO พบว่าระบบฟิล์มไม่แสดงสมบัติการสะท้อนความร้อน เนื่องมาจากขณะเคลือบฟิล์มซึ่งค่อออกไซด์ลงบนฟิล์มเงิน ฟิล์มเงินจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นเงินออกไซด์ทำให้สีของระบบฟิล์มมีลักษณะเป็นหมอกขาวและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลในเวลาต่อมา

กรณีระบบฟิล์ม Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO และ Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO-Ag-Ti-ZnO พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมระบบฟิล์ม คือ (1) ฟิล์ม ZnO ที่กำลังไฟฟ้า 50 W %O<sub>2</sub> mixture 30-40% ที่ความหนาในช่วง 20-45 nm (2) ฟิล์ม Ag ที่กำลังไฟฟ้า 100 W ความหนาในช่วง 8-20 nm และ (3) ฟิล์ม Ti ที่กำลังไฟฟ้า 120 W และมีความหนาอยู่ในช่วง 1-3 nm

การเปลี่ยนแปลงความหนาแต่ละชั้นฟิล์มจะส่งผลต่อรูปแบบการแทรกสอดทางแสงของระบบฟิล์ม ซึ่งทำให้เส้นสเปกตรัมการส่งผ่านและการสะท้อนเปลี่ยนไป โดยที่ระบบฟิล์มเงินสองชั้น จะให้เส้นสเปกตรัมการส่งผ่านและการสะท้อนมีความชันมากขึ้น รูปแบบของการแทรกสอดที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลโดยตรงต่อค่า  $\%T_{VIS}$ ,  $\%T_{NIR}$ , HMI และสีของระบบฟิล์มที่ศึกษา โดยพบว่าเมื่อความหนาของ ZnO หนาขึ้น เส้นสเปกตรัมการส่งผ่านและการสะท้อนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น ส่งผลให้สีของระบบฟิล์มเปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปยังสีเขียว และไปยังสีเหลืองใส ในขณะที่เมื่อความหนาของ Ag หนาขึ้น เส้นสเปกตรัมการส่งผ่านและการสะท้อนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง ส่งผลให้สีของระบบฟิล์มเปลี่ยนจากสีเหลืองใสไปยังสีเขียว และไปยังสีน้ำเงิน และในการศึกษาค่า E พบว่าเมื่อฟิล์ม Ag มีค่าความหนาเพิ่มขึ้นหรือมีระบบฟิล์มเป็นระบบฟิล์มเงินสองชั้นค่า E จะมีค่าต่ำลงเนื่องมาจากการสะท้อนแสงในช่วงอินฟราเรดมากขึ้นทำให้มีการดูดกลืนแสงน้อยลงส่งผลให้ค่า E น้อยลงด้วย

คำสำคัญ: ฟิล์มบาง/ การปลดปล่อยรังสีต่ำ/ การส่งผ่านแสง/ การสะท้อนแสง/ เงิน/ ชิงค์ออกไซด์/  
ไททาเนียม/ สปีดเดอริง

This research was aimed at studying deposition techniques for low emissive multi-layered thin film systems including (a) single silver layer systems of Glass-ZnO-Ag-ZnO and Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO and (b) a double silver layer system of Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO-Ag-Ti-ZnO. These film systems were deposited both on glass slide and window glass by DC pulse Magnetron Sputtering. These films possess significant properties of having high visible transmittance and near-infrared reflectance as well as low infrared emissivity.

Basic knowledge of each layer of the film system, namely ZnO, Ag and Ti, is of importance for this research. Desirable properties of final film product can be achieved based on knowing nature of these films of which the whole film system is composed. For ZnO, deposition power, time and  $\%O_2$  mixture were varied to examine their effects on thickness, crystal orientation, electrical property, optical property, emissivity and color of the film. It was found that the deposition with power in the range of 30–70 W produce films that have only preferred orientation in (002) plane. The film has refractive index of 2.0 at wavelength of 500 nm. With the deposition power greater than 50 W, the film tends to have more uniform refractive index throughout the film layer. It was also found that optimum  $\%O_2$  mixture is in the range of 30–40%. In this range, the films have visible and near infrared

transmittance of about 84% and 83%, respectively. Further analyses reveal that the absorption edge of the film is 375 nm corresponding to the energy gap of 3.31 eV. The perfect absorption is observed at the thickness of 275 nm. The films have infrared emissivity approximately 0.88 mostly identical to uncoated window glass.

Studies of the deposition of silver show that varying the deposition power between 100 and 150 W while maintaining energy constant at 3000 J affects values of sheet resistance varying from 0.59 to 0.64 Ohm/sq. It is slightly increased as power increases. Due to its low sheet resistance, the films deposited at the power of 100 W were further investigated. It was found that the preferred orientation of the film is in (111) plane. As thickness increases, film transmittance and reflectance decrease while heat mirror index (HMI) inversely increases. With the film thickness varying between 8 and 20 nm, visible and infrared transmittance varies in the range of 36–63% and 12–48%, respectively. In addition, the film has a range of values of emissivity as low as 0.04–0.15. Their sheet resistance and resistivity are 3–15 Ohm/sq and 6-10  $\mu$ Ohm-cm.

Titanium film is presented to prevent the silver film from oxidation. Depositing titanium film with the thickness in the range of 1–3 nm produced the film with visible transmittance and near infrared transmittance of 88–91% and 91–92%, respectively. It was found that the optimum thickness is about 0.8 nm where it can prevent the oxidation.

Based on knowledge of the deposition of each film layer, systems of low emissive multi-layered thin film can now be studied. For the system of Glass-ZnO-Ag-ZnO, it was found that the film system does not exhibit a near infrared reflective film. This is due to the oxidation of the silver layer during the deposition process.

Film systems of Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO and Glass-ZnO-Ag-Ti-ZnO-Ag-Ti-ZnO were found to be near infrared reflective film. The optimum conditions for film deposition were the followings: (1) ZnO deposited at the power of 50 W with %O<sub>2</sub> mixture in the range of 30–40% and the thickness of 20–45 nm, (2) Ag film deposited at the power of 100 W with the thickness in the range of 8–20 nm and (3) Ti film deposited at 120 W and with the thickness in the range of 1-3 nm.

---

## TE 156075

The variation of thickness in each film layer affects the appearance of film due to optical interference. This can be experimentally observed from spectral transmittance and reflectance of the film system. This directly resulted in the changes of  $\%T_{\text{VIS}}$ ,  $\%T_{\text{NIR}}$ , HMI and color of the film. As the thickness of ZnO increases, the spectral transmittance and reflectance will shift towards a longer wavelength region. Simultaneously, the color of the film changes progressively from blue to green and finally yellow. Conversely, as Ag film layer increases, the spectral response then shifted towards shorter wavelength region and the color changes from yellow to green and finally blue. The film emissivity depends greatly on the thickness of Ag film layer. For a system with thicker silver layer or a system with double silver layer, the film possesses very low values of emissivity and high reflectance.

Keywords: Thin Film/ Low Emissivity/ Low-E/ Visible Transmittance/ Near-Infrared Reflectance/  
Silver/ Zinc Oxide/ Titanium/ Sputtering