

เซนเซอร์แสงของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่เตรียมด้วยเผาผนึกสาร
Light sensor of TiO_2 doped Al_2O_3 thin films by using sintering

ศานิตย์ สุวรรณวงศ์* กฤษณะ สีใส และ อาทิตย์ หูเต็ม

Sanit Suwanwong*, Kitsana Seesai, and Artit Hutem

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Physics Division, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University

Email: sanit.suw@pcru.ac.th

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเมื่อฉายแสงลงบนผิววัสดุเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุสารกึ่งตัวนำ TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงที่ดี ส่วน Al_2O_3 มีความโปร่งใสยอมให้แสงผ่านได้ เมื่อทำการฉายแสงลงบนพื้นผิวจะทำให้เกิดออกซิเจน ที่พื้นผิวหลุดออกเป็นผลให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy) นำไปสู่การนำไฟฟ้าที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 5% โดยโมล ที่เผาผนึกสารที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 °C และทำการเคลือบฟิล์มบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค spin coating จากนั้นทำการศึกษาลักษณะของเฟสของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD พบว่าเมื่อทำการเผาผนึกสารที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีระนาบของ TiO_2 เพิ่มขึ้น และจากภาพถ่ายเทคนิค SEM จะเห็นว่าขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องผลของเทคนิค XRD ที่พบพีคที่มีความแหลมคมมากขึ้น จากนั้นทำการตรวจวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม พบว่าความต้านทานไฟฟ้าฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่มีการเจือ Al_2O_3 เมื่อทำการศึกษาผลของแสงต่อความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มโดยการฉายแสงอาทิตย์จำลองที่มีความเข้ม 1000 W/m^2 ลงบนพื้นผิวของฟิล์ม สลับกับการปิดแสง พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อได้รับแสง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปิดแสง โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีค่าน้อยกว่าตอนเริ่มต้น และความต้านทานมีค่าลดลงเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวเมื่อได้รับแสงจำนวนหลายครั้ง สำหรับฟิล์ม 900 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมากที่สุด ดังนั้นฟิล์มของ TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 จึงสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์แสงได้

คำสำคัญ: TiO_2 Al_2O_3 เผาผนึกสาร ความต้านทานไฟฟ้า เซนเซอร์แสง

ABSTRACT

The change in electrical resistivity, when exposed to light, is one of the important properties of semiconductor materials. TiO_2 is a semiconductor with high electrical resistivity and a good photocatalyst. Al_2O_3 is transparent. When light is projected onto its surface, the oxygen at the surface will be released, causing an oxygen vacancy which makes good electrical conductivity. In this study, TiO_2 films doped with Al_2O_3 at 5% by mole were sintered at 900, 950 and 1000°C and coated on electric conductive glass by spin coating technique. Then, the phase characteristics of the samples were studied using the XRD technique. It was found that at higher temperatures, the planes of TiO_2 and Al_2O_3 increased. SEM images also showed the larger particle size which corresponds to the results from the XRD technique that showed higher peaks. After that, the resistivity of the films was measured, and the results showed that the electrical resistivity of TiO_2 films doped with Al_2O_3 was lower than those without Al_2O_3 . The effects of light on electrical resistivity of the films were studied by switching light with 1000 W/m^2 intensity from solar simulator on and off on the surface of the films. The findings showed that the electrical resistance of the films decreased when exposed to the light and increased when the light was off. The increased electrical resistivity at later times was less than that at the beginning, and the resistivity dropped to saturation point after multiple exposures. The thin film at 900°C was exhibited the greatest resistance range, so TiO_2 film doped with Al_2O_3 is suitable for the fabrication of light sensors.

Key Words: TiO_2 , Al_2O_3 , Sintering, Resistance, Light sensor

บทนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีสมบัติทางไฟฟ้า (Nagabharana, R.M. et al., 2020) ที่ต้องการความต้านทานไฟฟ้าสูง โดยมีลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งสีขาว มีความโปร่งใส มีสมบัติไดอิเล็กทริก และทางแสง (Bensouici, F et al., 2017) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง นอกจากนี้ TiO_2 ถูกนำไปศึกษาวิจัยและพัฒนากันอย่าง

แพร่หลายในรูปฟิล์มบาง (Khan, M.I. et al., 2016) ทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นวัสดุที่มีความแข็ง น้ำหนักเบา มีความหนาแน่นน้อย นำไฟฟ้าได้ดี มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่ำ (Sengwa, R.J. & Choudhary, S., 2017) นำความร้อนได้ดี และตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทางเคมีที่ดี จึงนิยมนำมาใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น ส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อนำ Al_2O_3 เติมลงใน TiO_2 ทำให้มีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดีขึ้น ซึ่งใช้ในการตรวจจับแสง (Elsayed, A.M., et al., 2021) เนื่องจากเมื่อฉายแสงบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดที่ช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancy) (Li, H. et al., 2015) ซึ่งเป็นผลให้อิเล็กตรอนสะสมเพิ่มขึ้น (Chen, S., et al., 2018) จึงทำให้นำไฟฟ้าได้ดี เหมาะกับการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์แสง

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่ 5% โดยโมล จากนั้นนำไปเผาผนึกสารที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 °C แล้วตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยการถ่ายภาพจากเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) จากนั้นทำเป็นสารกึ่งเจลด้วยการผสมกับ Polyethylene glycol 400 (PEG) เพื่อนำมาเคลือบเป็นฟิล์มบนกระจก นำไฟฟ้าด้วยเทคนิค spin coating แล้วนำไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีการฉายแสงและปิดแสงอาทิตย์จำลอง เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์แสงของฟิล์มฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสาร TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

นำสาร TiO_2 และ Al_2O_3 (ยี่ห้อ LobaChemie Pvt., Ltd.) มาผสมตามสัดส่วนโดยโมล เป็น 95:5 โดยโมล ตามลำดับ โดยวิธีการบดสารแบบแห้ง และใช้เม็ด ZrO_2 ช่วยในการบดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งสารที่ผสมแล้วออกเป็น 3 ส่วน แล้วนำไปเผาผนึกสารที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ได้แก่ 900 950 และ 1000 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก็จะได้สาร TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 แบบผง

จากนั้นนำ TiO_2 และ TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 °C อย่างละ 2 กรัม มาผสมกับน้ำ DI 2 กรัม และสาร Polyethylene glycol 400 (PEG) (ยี่ห้อ Merck KGaA) 3 กรัม แล้วปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้สารละลายของสาร TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3 อยู่ในรูปกึ่งเจล

2. การเตรียมฟิล์มของสาร TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

นำกระจกไฟฟ้า Fluorine doped tin oxide (FTO) ตัดให้มีขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ วางลงบนเครื่อง spin coater (ยี่ห้อ Schwan technology รุ่น EZ4 SPIN COATER) แล้วหยดสารละลายของสาร TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3 จำนวน 5 หยด แล้วให้หมุนที่ 600 rpm เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบแล้วไปอบด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 400 °C ในบรรยากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ก็จะได้ฟิล์มของ TiO_2 ที่ไม่เจือมีความหนาของฟิล์ม $48\ \mu\text{m}$ และที่เจือด้วย Al_2O_3 มีความหนาของฟิล์ม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

อุณหภูมิเผาผนึกสารของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 5% โดยโมล ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาของฟิล์ม (μm)
900	42
950	37
1000	51

3. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสาร TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ด้วยเครื่อง SEM

ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสาร TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 โดยใช้เครื่อง SEM (ยี่ห้อ Phenom รุ่น Phenom XL G2 Desktop SEM) เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสาร TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

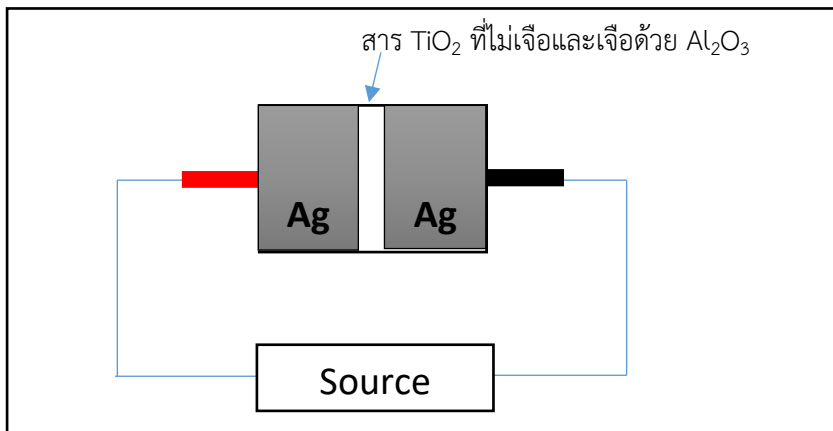
4. ตรวจสอบเฟสของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ด้วยเทคนิค XRD

ตรวจสอบลักษณะของเฟสของฟิล์ม TiO_2 เจือด้วย Al_2O_3 โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (ยี่ห้อ Bruker D2 PHASER) ด้วยเทคนิค XRD ทำการวัด 2-theta ในช่วง $10-80$ องศา เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

5. การวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเมื่อฉายแสงอาทิตย์จำลอง

นำฟิล์มของ TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3 ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ $900\ 950$ และ $1000\ ^{\circ}\text{C}$ ทั้ง 4 สารตัวอย่าง มาทำขั้วไฟฟ้าด้วยการทาทาเงิน (Ag) ยี่ห้อ SPI Supplies Division of STRUCTURE PROBE, Inc จากนั้นติดตั้ง source meter (ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 2901A) ดังภาพประกอบ 1 โดยที่ source meter ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง โดยให้กระแสไฟฟ้า มีค่าคงที่ (I) แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้งสองข้าง (V) ของฟิล์มที่เปลี่ยนไป เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าจากสมการที่ (1) แล้วทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ความต้านทานไฟฟ้ากับเวลา

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$



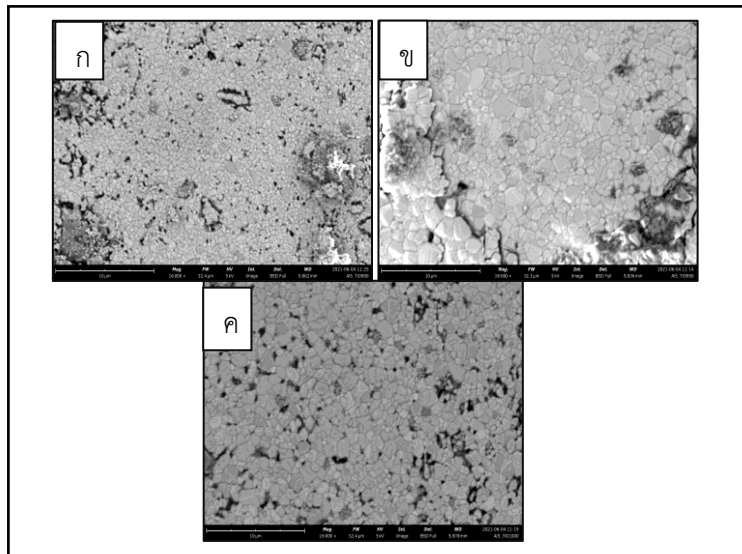
ภาพประกอบ 1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3 ที่เผาผนึกสารที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 °C ทั้ง 4 ตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ใช้แสงอาทิตย์จำลองที่ใช้ค่า A.M. 1.5 มีความเข้มแสง $1,000 \text{ W/m}^2$ (ยี่ห้อ PHOTO EMISSION TECH., INC รุ่น SS100AA) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังการฉายแสงอาทิตย์จำลองในบรรยากาศ ด้วยการเปิดและปิดแสงอาทิตย์จำลอง 20 วินาทีสลับกัน จนความต้านทานไฟฟ้าลดลงจนอิ่มตัวซึ่งมีค่าต่ำที่สุด ในการวิจัยนี้ไม่ได้ใช้แสงอาทิตย์จริงเนื่องจากการฉายแสงอาทิตย์ พบว่าค่าของแสงอาทิตย์มีความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งไม่สามารถวัดค่าที่แน่นอนได้

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของสาร TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ด้วยเครื่อง SEM

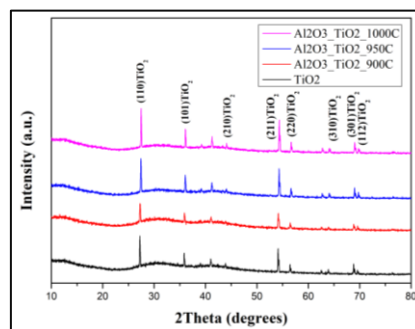
จากภาพประกอบ 2(ก) แสดงถึงการกระจายตัวของสาร TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 5% โดยโมล ที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 900 °C ที่มีขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ย $1.11 \mu\text{m}$ สำหรับ ที่อุณหภูมิ 950 °C ดังภาพประกอบ 2(ข) มีขนาดของอนุภาค $1.96 \mu\text{m}$ และที่อุณหภูมิ 1,000 °C มีขนาดของอนุภาค $1.71 \mu\text{m}$ ดังภาพประกอบ 2(ค)



ภาพประกอบ 2 ภาพถ่ายพื้นผิวของอนุภาคของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 เฝ้านิกสารที่อุณหภูมิ ก) 900 °C ข) 950 °C และ ค) 1000 °C

2. เฟสของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3

จากภาพประกอบ 3 เป็นการตรวจสอบลักษณะเฟสของระนาบของฟิล์ม TiO_2 เจือด้วย Al_2O_3 ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีระนาบที่สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของ TiO_2 (Reference code: 01-076-1940) มีระนาบ 110 101 210 211 220 310 301 และ 112 ซึ่งทุกพีคสูงขึ้นเมื่อทำการเฝ้านิกสารที่อุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพประกอบ 3 ลักษณะเฟสของฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

3. การวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเมื่อฉายแสงอาทิตย์จำลอง

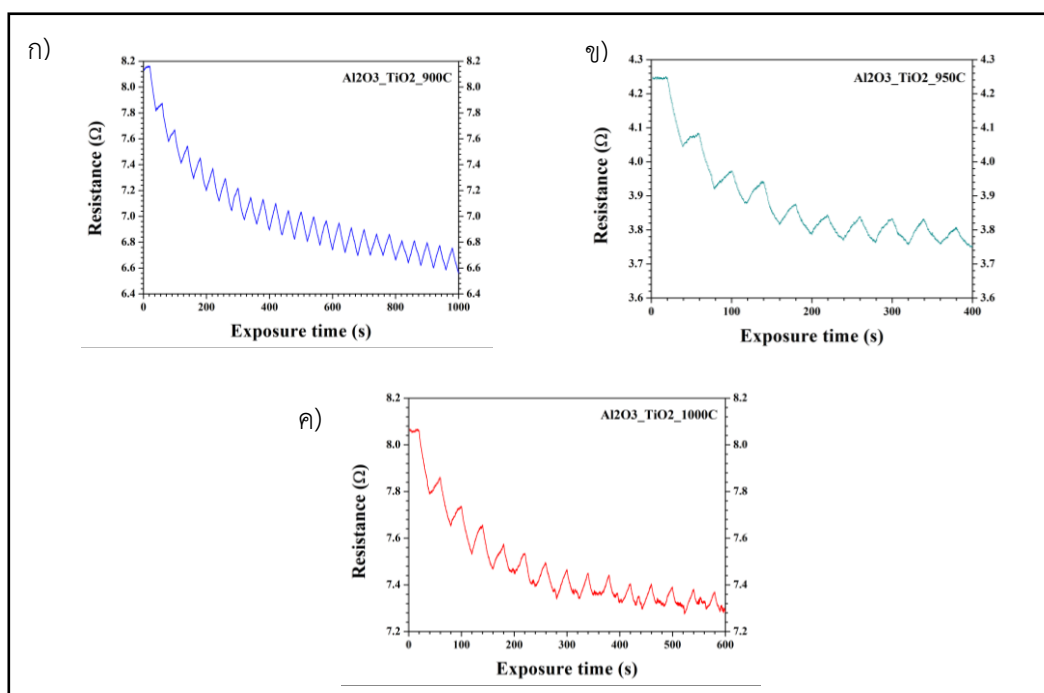
ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มของสารตัวอย่างทั้ง 4 เมื่อฉายแสงอาทิตย์ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าไม่แน่นอน เนื่องจากแสงอาทิตย์มีความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้แสงอาทิตย์จำลองใช้ค่า A.M. 1.5 มีความเข้มแสง 1000 W/m^2 โดยทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยการเปิด-ปิดแสงอาทิตย์จำลองสลับกันทุก ๆ 20 วินาที จนค่าความต้านทานลดลงจนอิมิตัว พบว่าฟิล์ม TiO_2 ก่อนฉายแสงมีความต้านทานเป็น 10.54Ω และลดลงเป็น 10.53Ω มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าน้อยมากเป็น 0.01Ω สำหรับฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000°C ดังตารางที่ 2 พบว่าก่อนฉายแสงอาทิตย์จำลองที่อุณหภูมิ 900°C ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}900\text{C}$) มีความต้านทานสูงที่สุดเป็น 8.16Ω รองลงมาคือ 1000°C ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}1,000\text{C}$) เป็น 8.06Ω และที่ 950°C ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}950\text{C}$) มีความต้านทานต่ำที่สุดเป็น 4.24Ω และเห็นได้ชัดว่าเมื่อเติมสาร Al_2O_3 จะทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับสาร TiO_2 ที่ยังไม่ได้เจือสาร ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าที่น้อยลงนำไปสู่การนำไฟฟ้าได้ดี

จากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่าเมื่อเปิดแสงอาทิตย์จำลองเป็นเวลา 20 วินาที ทำให้มีความต้านทานลดลง และเมื่อปิดแสงอาทิตย์จำลองเป็นเวลา 20 วินาที ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าเดิม แล้วการเปิด-ปิดแสงอาทิตย์จำลองสลับกันไป จนถึงค่าความต้านทานอิมิตัว พบว่าฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900°C ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}900\text{C}$) ดังภาพประกอบ 4 ก) มีความต้านทานไฟฟ้าก่อนฉายแสงเป็น 8.16Ω และอิมิตัวที่ 6.56Ω ใช้เวลา 980 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเป็น 1.6Ω สำหรับ ที่อุณหภูมิ 950°C ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}950\text{C}$) ดังภาพประกอบ 4 ข) มีความต้านทานไฟฟ้าก่อนฉายแสงเป็น 4.24Ω และอิมิตัวที่ 3.75Ω ใช้เวลา 380 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเป็น 0.49Ω และจากภาพประกอบ 4 ค) ที่อุณหภูมิ 1000°C ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-}1,000\text{C}$) มีความต้านทานไฟฟ้าก่อนฉายแสงเป็น 8.06Ω และอิมิตัวต่ำที่สุดเป็น 7.28Ω ใช้เวลา 580 วินาที มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเป็น 0.78Ω

ดังนั้นฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900°C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมากที่สุดเป็น 1.6Ω และมีช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนานที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่กว้าง จึงเหมาะสมกับการนำมาประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์แสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังการฉายแสงอาทิตย์จำลองของฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

อุณหภูมิเผาผนึกสาร ของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือ ด้วย Al_2O_3 5% โดย โมล ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาที่มีการ เปลี่ยนแปลงความ ต้านทานจนอิ่มตัว (s)	ความต้านทาน ก่อนฉาย แสงอาทิตย์ (Ω)	ความต้านทาน หลังฉาย แสงอาทิตย์ (Ω)	การ เปลี่ยนแปลง ความต้านทาน (Ω)
900	980	8.16	6.56	1.6
950	380	4.24	3.75	0.49
1000	580	8.06	7.28	0.78



ภาพประกอบ 4 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ ก) 900 ข) 950 และ ค) 1000 $^{\circ}\text{C}$ เมื่อเปิด-ปิดแสงอาทิตย์จำลอง

อภิปรายผลการวิจัย

1. ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

พิจารณาความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 5% โดยโมล พบว่าขนาดของอนุภาค มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีรูพรุนน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำลง ทำให้นำไฟฟ้าได้ดี และเมื่อที่ถูกเผาผนึกสารที่อุณหภูมิ 950 °C ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ที่สุด 1.96 μm และมีรูพรุนน้อยที่สุด ทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุดเป็น 4.24 Ω รองลงมาที่อุณหภูมิ 1000 °C มีขนาดของอนุภาค 1.71 μm มีความต้านทานไฟฟ้า 8.06 Ω และมีขนาดของอนุภาคเล็กที่สุด อุณหภูมิ 900 °C ที่มีขนาดของอนุภาค 1.11 μm ความต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุด 8.16 Ω

2. เฟสของฟิล์ม TiO_2 ที่ไม่เจือและเจือด้วย Al_2O_3

การตรวจสอบลักษณะของเฟสของฟิล์ม TiO_2 เจือด้วย Al_2O_3 ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเมื่อทำการเผาผนึกสารที่อุณหภูมิสูงขึ้น มีระนาบของโครงสร้างผลึกของ TiO_2 ที่มีพีคที่สูงขึ้น

3. ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มเมื่อฉายแสงอาทิตย์จำลอง

ในการฉายแสงบนพื้นผิวของฟิล์มของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดช่องว่างของออกซิเจน (oxygen vacancies) ส่งผลให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนสูงขึ้น สอดคล้องกับขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและมีรูพรุนน้อยลง จึงทำให้นำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มีความต้านทานไฟฟาลดลงเมื่อฉายแสงนั่นเอง

จากการฉายแสงบนฟิล์ม TiO_2 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าน้อยมากเป็น 0.01 Ω จึงไม่เหมาะสมจะทำการเป็นเซนเซอร์แสง สำหรับฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 °C โดยการเปิด-ปิดแสงอาทิตย์จำลองสลับกัน 20 วินาที จนมีความต้านทานอิมิตัวทั้ง 3 สารตัวอย่างนี้ พบว่าเมื่อเปิดแสงอาทิตย์จำลองทำให้มีความต้านทานลดลง และเมื่อปิดแสงอาทิตย์จำลองทำให้มีความต้านทานเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานจะไม่เพิ่มขึ้นมาเท่าเดิม และมีแนวโน้มของความต้านทานลดลง เป็นผลมาจากช่องว่างของออกซิเจน (Suwanwong, S., et al., 2015) จากการศึกษาเพิ่มเติมก็ยังพบอีกว่าฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 ที่อุณหภูมิ 900 °C มีช่วงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานมากที่สุดถึงเป็น 1.6 Ω และมีช่วงเวลาของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนานที่สุดถึง 980 วินาที ซึ่งเป็นช่วงที่กว้าง ดังนั้น ฟิล์ม TiO_2 ที่เจือด้วย Al_2O_3 จึงเหมาะสมต่อการประดิษฐ์เป็นเซนเซอร์แสง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาฟิสิกส์ งานศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัย

งบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

เอกสารอ้างอิง

- Bensouici, F. Bououdina, M., Dakhel, A.A., Tala-Ighil, R., Tounane, M., Iratni, A. Souier, T., Liu, S. & Cai, W. (2017). Optical, structural and photocatalysis properties of Cu-doped TiO₂ thin films. *Applied Surface Science*, 395, 110-116.
- Chen, S., Xiao, Y., Wang, Y., Hu, Z., Zhao, H. & Xie, W. (2018). A facile approach to prepare Black TiO₂ with oxygen vacancy for enhancing photocatalytic activity. *Nanomaterials*, 8(4), 245.
- Elsayed, A.M., Rabia, M., Shaban, M., Aly, A.H. & Ahmed, A.M. (2021). Preparation of hexagonal nanoporous Al₂O₃/TiO₂/TiN as a novel photodetector with high efficiency. *Scientific Reports*, 11, 17572.
- Khan, M.I., Bhatti, K.A., Qindeel, R., Bousiakou, L.G., Alonizan, N. & Aleem, F. (2016). Investigations of the structural, morphological and electrical properties of multilayer ZnO/TiO₂ thin films, deposited by sol–gel technique. *Results in Physics*, 6, 156-160.
- Li, H., Guo, Y. & Robertson, J. (2015). Calculation of TiO₂ surface and subsurface oxygen vacancy by the screened exchange functional. *The Journal of Physical Chemistry*, 119, 18160-18166.
- Nagabharana, R.M., Kumaraswamy, G.N., Gundanna, S.K. & Umananda M.B. (2020). Effect of thermal annealing on structural and electrical properties of TiO₂ thin films. *Thin Solid Films*, 710, 138262.
- Sengwa, R.J. & Choudhary, S. (2017). Dielectric and electrical properties of PEO–Al₂O₃ nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 701, 652-659.
- Suwanwong, S., Eknapakul, T., Rattanacha Y., Masingboon, C., Rattanasuporn, S., Phatthanakun, R., Nakajima, H., King, P., Hodak, S. & Meevasana, W. (2015). The dynamics of ultraviolet-induced oxygen vacancy at the surface of insulating SrTiO₃. *Applied Surface Science*, 355, 210-212.