



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การเคลือบชั้นไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดสีย้อมไวแสงโดยวิธีคาโทดิกอาร์ค

(Deposition of TiO_2 Layer for Dye-sensitized Solar Cells using
Cathodic Arc Deposition)

โดย

สกล แสนทรงสิริ

มกราคม 2559

สัญญาเลขที่ MRG5580137

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การเคลือบชั้นไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

ชนิดสีย้อมไวแสงโดยวิธีคาโทดิกอาร์ค

(Deposition of TiO_2 Layer for Dye-sensitized Solar Cells using
Cathodic Arc Deposition)

สกล แสันทรงสิริ

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG5580137
 ชื่อโครงการ : การเคลือบชั้นไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง
 โดยวิธีคาโทดิกอาร์ค
 ชื่อนักวิจัย : ดร.สกล แสันทรงสิริ
 ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 E-mail Address : sakonsa@gmail.com
 ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ศึกษาผลของชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) ที่เตรียมโดยวิธีคาโทดิกอาร์ค ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง การทดลองเริ่มด้วยการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยใช้เครื่องกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์คชนิดพัลส์อาร์คด้วยอัตราการอาร์คหนึ่งครั้งต่อวินาที ใช้แท่งโลหะไททาเนียมบริสุทธิ์ 99.9 % เป็นหัวกำเนิดพลาสมา พลาสมาที่เกิดขึ้นจะกระจายไปเคลือบบนผิวชิ้นงานกระจกสไลด์ขนาด $2 \times 1 \text{ cm}^2$ ที่ไบแอสด้วยความต่างศักย์ลบ 50 โวลต์ วางห่างจากแหล่งกำเนิดพลาสมา 10 cm ทดลองเคลือบฟิล์มบางด้วยจำนวนพัลส์ต่างๆกันตั้งแต่ 500 ถึง 2,500 พัลส์ จากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วย AFM, SEM, RAMAN และการส่องผ่านได้ของแสง พบว่า ฟิล์มมีความหนาอยู่ระหว่าง 47 ถึง 212 nm มีโครงสร้างแบบอนาเทส การส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 nm อยู่ในช่วง 60-90 % ลดลงตามความหนา ความกว้างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 3.23 ถึง 3.34 eV จากการสังเคราะห์ชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นกั้นระหว่างชั้นขั้วไฟฟ้า (FTO) กับชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงพบว่าสามารถเพิ่มค่ากระแสลัดวงจร (J_{sc}) และค่าแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) ของเซลล์ได้ ประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นที่ 2,500 พัลส์ ให้ค่า J_{sc} และ V_{oc} เป็น 4.11 mA/cm^2 และ 0.63 โวลต์ ตามลำดับ กระแสค่อนข้างคงที่ในทุกเงื่อนไข สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนรูปพลังงาน (η) เป็น 2.33% เทียบกับกรณีไม่มีชั้นกั้นคือ 0.59% หรือเพิ่มขึ้น 295% ในการทดลองนี้ งานวิจัยที่จะสามารถพัฒนาต่อไปได้คือการเพิ่มขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือนำหลายเซลล์มาต่อรวมกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการ รวมถึงการออกแบบเซลล์ให้กระทัดรัดและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

คำหลัก : ไททาเนียมไดออกไซด์ เซลล์แสงอาทิตย์ คาโทดิกอาร์ค แถบพลังงาน

Abstract

Project Code : MRG5580137

Project Title : Deposition of TiO₂ Layer for Dye-sensitized Solar Cells using Cathodic Arc Deposition

Investigator : Dr. Sakon Sansongsiri
Department of Physics and Material Science, Faculty of Science,
Chiangmai University

E-mail Address : sakonsa@gmail.com

Project Period : 2 year

Abstract

This research was studied the effect of titanium dioxide (TiO₂) thin film layer to dye-sensitizer solar cell (DSSC) efficiency. The TiO₂ thin film deposited by pulse cathodic arc plasma deposition with rate of 1 pps. The plasma source was a 99.9% Ti rod, deposit to the 2×1 cm² glass slide with -50 VDC bias voltage. The sample was place at 10 cm away from the plasma source. After deposited, the samples were annealed in ambience air at temperature 450 °C for 1 hour in order to form oxide. The properties of TiO₂ thin films would be investigated before combined to fabricated DSSC device for efficiency measurements. From the results, films with 500 to 2,500 deposition pulses gave the thickness between 47 to 212 nm. Raman spectra indicated TiO₂ anatase phase. The percentage of optical transmission between 400 to 700 nm wavelengths, were in the range of 60-90% decreasing with film thickness. The optical energy band gap (E_g) had been observed in the range of 3.23 to 3.34 eV. The addition of TiO₂ blocking layer was improved the shot-circuit photocurrent (J_{sc}) and open-circuit voltage (V_{oc}). The optimum performance occurred at 2,500 deposition pulses of TiO₂ blocking layer, given maximum J_{sc} and V_{oc} are 4.11 mA/cm² and 0.63 V, respectively. In addition, the current densities were rather stable for all condition. The optimum power conversion efficiency (η) was 2.33 %, while the DSSC without blocking layer would be 0.59 %. It was improved by 295% compared with the DSSC without TiO₂ blocking layer. The results can improve for large scale for require voltage and current. Moreover, the cell lifetime should be improved.

Keyword : Titanium dioxide, dye-sensitizer solar cell, cathodic arc, energy band gab

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (มช.) เป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ใช้สถานที่และเครื่องมือต่างๆ และสนับสนุนงานวิจัยนี้มาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ทองเต็ม ที่ได้ให้คำชี้แนะ และสนับสนุนอย่างต่อเนื่องมาตลอดจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

หากสิ่งใดขาดตกบกพร่อง ผู้วิจัยต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่ารายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะ เป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจต่อไปไม่มากนัก

ดร. สกล แสนทรงสิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของกสนวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
 บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	 3
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม	3
2.2 แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค	7
2.3 ไททาเนียมไดออกไซด์	8
2.4 การหาค่าพลังงานแถบช่องว่าง	9
 บทที่ 3 การดำเนินการทดลอง	 11
3.1 การเตรียมเครื่องมือการทดลอง	11
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	12
3.3 การสังเคราะห์ชั้นกั้นของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์	15
3.4 การเตรียมpaste ของ TiO_2	15
3.5 การทำ Counter electrode	17
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ของ DSSC	17
 บทที่ 4 ผลการทดลอง	 19
4.1 สมบัติพื้นผิวของฟิล์มบาง TiO_2	19
4.2 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มบาง TiO_2	20

	หน้า
4.3 สารประกอบและเฟสของฟิล์ม TiO_2	22
4.4 ความหนาของฟิล์ม TiO_2	24
4.5 การส่งผ่านของแสงและการหาแถบช่องว่างพลังงาน	31
4.6 ผลของชั้นกั้น (Blocking layer; TiO_2) ต่อประสิทธิภาพของ DSSC	34
 บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	 38
 เอกสารอ้างอิง	 39
ผลที่ได้จากโครงการวิจัย	40
ภาคผนวก	41

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วนน้ำหนักและค่าร้อยละอะตอมของ Ti และ O ที่พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse	21
ตารางที่ 4.2 แสดงสัดส่วนน้ำหนักและค่าร้อยละอะตอมของ Ti และ O ที่พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse แบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	22
ตารางที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์ของค่าความหนาเฉลี่ย ความขรุขระเฉลี่ยและพื้นที่ผิวสัมผัส ของฟิล์มบางแบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่จำนวนพัลส์ต่างๆ	30
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ได้จากการลากเส้นสัมผัสกับเส้นการส่งผ่าน ตัดแกนพลังงานของโฟตอนของฟิล์มบาง TiO ₂ แบบไม่เผาที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์	32
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ได้จากการลากเส้นขนานกับเส้นการส่งผ่าน ตัดแกนพลังงานของโฟตอนของฟิล์มบาง TiO ₂ แบบเผาที่ 450 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500พัลส์	33
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด ค่าความต่างศักย์ วงจรเปิด กระแสไฟฟ้าวงจรปิด fill factor และประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO ₂ จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ แบบไม่เผาใช้เป็นชั้นกันเปรียบเทียบกับ ไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare)	35
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด ค่าความต่างศักย์ วงจรเปิด กระแสไฟฟ้าวงจรปิด fill factor และประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO ₂ จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ แบบเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้เป็นชั้นกันเปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare)	36

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบ และการไหลของอิเล็กตรอนใน DSSC	3
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่าง J–V curves ของ DSSC	6
รูปที่ 2.3 แสดงการหาประสิทธิภาพของ DSSC	6
รูปที่ 2.4 แสดงชั้นป้องกัน (blocking layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	7
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแหล่งกำเนิดพลาสมาคาโทดิกอาร์คแบบพัลส์อาร์ค	8
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์เฟส รูไทล์ อนาเทส บรูคไคท์	9
รูปที่ 2.7 แสดงการหาค่าพลังงานแถบช่องว่างจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	10
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค	11
รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมแสดงระบบกำเนิดพลาสมาคาโทดิกอาร์คแบบไม่มีตัวกรอง	12
รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งชิ้นงานบนฐานยึดชิ้นงาน	15
รูปที่ 3.4 แสดงการเตรียม paste ของ TiO_2 โดยวิธี Doctor Blade บนชั้น Blocking Layer	16
รูปที่ 3.5 แสดงการแช่สีย้อมขั้วแอโนดและขั้วแคโทดหลังจากผ่านการย้อมสีแล้ว	16
รูปที่ 3.6 ก. กระจก้นไฟฟ้าที่เคลือบด้วยสารละลายแพลทินัม	
ข. กระจก้นไฟฟ้าหลังจากการเผาแล้ว	17
รูปที่ 3.7 แสดงการประกอบ DSSC เพื่อนำไปวัดประสิทธิภาพ	17
รูปที่ 3.8 แสดงแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพ DSSC	
ที่ความเข้ม 100 mW/cm^2	18
รูปที่ 4.1 แสดงพื้นผิวฟิล์มบางของ TiO_2 ที่จำนวนพัลส์ 2000 พัลส์	
ก) ฟิล์มบางที่ไม่ได้เผา ข) ฟิล์มบางเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	19
รูปที่ 4.2 ภาควัดขวางของขั้วแอโนดโดยมีฟิล์มบางจำนวน 2000 pulse แบบไม่เผาเป็นชั้นกัน	20

รูปที่ 4.3 แสดงพื้นผิวฟิล์มบางที่ 2000 pulse แบบไม่เผาที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและกราฟแสดงสัดส่วนออกไซด์ของไททาเนียมและอะตอมไททาเนียม	21
รูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse แบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ และกราฟแสดงสัดส่วนออกไซด์ของไททาเนียมและอะตอมไททาเนียม	22
รูปที่ 4.5 กราฟสเปกตรัมความเข้มสัมพัทธ์ Raman spectroscopy ของฟิล์มบาง TiO ₂ แบบไม่เผา	23
รูปที่ 4.6 กราฟสเปกตรัมความเข้มสัมพัทธ์ Raman spectroscopy ของฟิล์มบางTiO ₂ แบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	23
รูปที่ 4.7 ก). แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 500 พัลส์	25
รูปที่ 4.8 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 1000 พัลส์	26
รูปที่ 4.9 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค). การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 1500 พัลส์	27
รูปที่ 4.10 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 2000 พัลส์	28
รูปที่ 4.11 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 2500 พัลส์	29
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาเฉลี่ยกับจำนวนพัลส์ของการอาร์ค	30
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระเฉลี่ยกับจำนวนพัลส์ของการอาร์ค	31

- รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $((\alpha)^{1/2}, (\text{cm}^{-1})^{1/2})$ และพลังงานของโฟตอน(eV)ของฟิล์มบาง TiO_2 แบบไม่เผือกที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ 32
- รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $((\alpha)^{1/2}, (\text{cm}^{-1})^{1/2})$ และพลังงานของโฟตอน(eV) ของฟิล์มบาง TiO_2 แบบเผือกที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ 33
- รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส(mA/cm^2) และ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า(V) ที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ แบบไม่เผือกใช้เป็นชั้นกัน เปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare) 34
- รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส(mA/cm^2) และ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า(V) ที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ แบบเผือกที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงใช้เป็นชั้นกันเปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare) 35
- รูปที่ 4.18 แสดงชั้นกันที่ป้องกันกระบวนการเกิดการรวมตัว(recombination)ของอิเล็กตรอน 37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันแหล่งพลังงานหลักที่เราใช้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งการใช้พลังงานเหล่านี้ยังปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม เกิดปัญหาโลกร้อนและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและมีใช้อย่างไม่สิ้นสุด トラบเท่าที่ยังมีแสงจากดวงอาทิตย์ การแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งชนิดที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเป็นแบบผลึกของซิลิกอน มีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพงเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูง ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่งคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ถือว่ามีต้นทุนการผลิตต่ำผลิตได้ง่ายกว่าแบบผลึกซิลิกอน ทำให้ได้รับความสนใจจากห้องปฏิบัติการต่างๆ ในการศึกษาและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

โครงการวิจัยนี้เป็นวิธีการอย่างหนึ่งในการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยจะสังเคราะห์และศึกษาผลของชั้นฟิล์มบางของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกใช้เป็นชั้นกั้น(Blocking layer) ระหว่างชั้นตัวนำ(Conducting layer)และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst layer)ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ฟิล์มบางนี้ถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการตกสะสมตะกอนด้วยวิธีคาโทดิกอาร์ค(Cathodic arc deposition) ซึ่งวิธีนี้ถูกใช้มากในการเคลือบผิวของวัสดุเพื่อเพิ่มสมบัติทางพื้นผิวของวัสดุ เช่น ทำให้ผิววัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น ทนการขัดถูเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ต้านทานต่อสารเคมี หรือสร้างฟิล์มบางสารประกอบของโลหะ เป็นต้น ในหลายงานวิจัยมีการพยายามคิดค้นพัฒนาส่วนต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูง มีความเสถียรในการทำงานมากขึ้น และเป็นไปได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงอาจถูกนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้นพอๆกับแบบผลึกซิลิกอนได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สังเคราะห์ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์และวิเคราะห์คุณสมบัติ

1.2.2 สังเคราะห์ชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นกั้น (Blocking layer) ระหว่างชั้นตัวนำ (Conducting layer)และชั้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst layer)ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1.2.3 ประกอบเซลล์แสงอาทิตย์และทดสอบประสิทธิภาพ

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

1.3.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และการสังเคราะห์ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค

1.3.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการทดลอง เช่น แท่งโลหะไททาเนียม ถังก๊าซออกซิเจน อุปกรณ์ประกอบเซลล์ สารเคมีทำความสะอาดชิ้นงาน

1.3.3 ทดลองเตรียมฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ด้วยคาโทดิกอาร์คและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

1.3.4 เตรียมชั้นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อใช้เป็นชั้นกั้นในเซลล์แสงอาทิตย์

1.3.5 ประกอบเซลล์แสงอาทิตย์และทดสอบประสิทธิภาพ

1.3.6 สรุปผลการวิจัย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จัดหาอุปกรณ์และปรับปรุงระบบแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค

1.4.2 เตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนวัสดุรองรับด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ กัน

1.4.3 ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.4.4 ประยุกต์ใช้เป็นชั้นกั้น (blocking layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อม

1.4.5 ทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ระบบแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์คใช้งานได้

1.5.2 ได้ชั้นกั้นฟิล์มบางบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับประกอบเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.3 สามารถประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมและทดสอบประสิทธิภาพได้

1.5.4 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติและตีพิมพ์ใน

วารสารวิชาการระดับนานาชาติได้

บทที่ 2

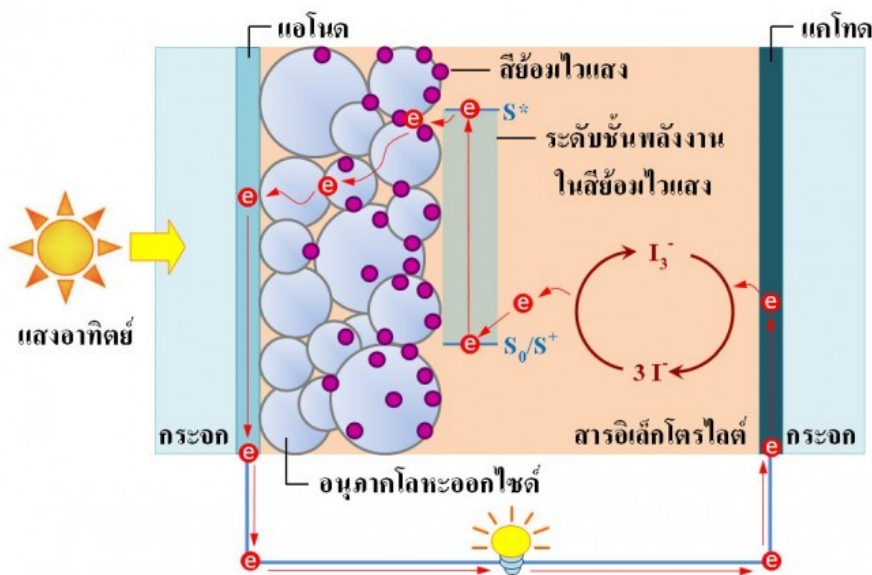
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (จาก <http://www.kmutt.ac.th/hynae/สีย้อมไวแสง/>)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) เป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้า สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่ย้อมด้วยสี สารส่งผ่านประจุ (หรือเรียกว่า อิเล็กโตรไลต์) และขั้วไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในวงวิชาการและพาณิชย์ เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะผลิตเพื่อการค้าได้ไม่ยากและราคาถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีขายอยู่ในท้องตลาดปัจจุบัน

ส่วนประกอบของ DSSC

DSSC ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า อนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสง และสารอิเล็กโตรไลต์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบ และการไหลของอิเล็กตรอนใน DSSC

1. ขั้วไฟฟ้าใน DSSC มี 2 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบไว้ให้แสงผ่านและทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ ซึ่งนิยมใช้ fluorine doped tin oxide (FTO) ที่เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้ ส่วนขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือเรียกว่า

ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (counter electrode) ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับคืนเข้ามายังเซลล์ ซึ่งนิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์ที่เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้

2. อนุภาคโลหะออกไซด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นชั้นให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงยึดเกาะ รวมทั้งรับอิเล็กตรอนจากสีย้อมและส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด จึงควรเป็นอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวมากและนำอิเล็กตรอนได้ดี นิยมใช้อนุภาคของโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และทินออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น ในส่วนประกอบนี้

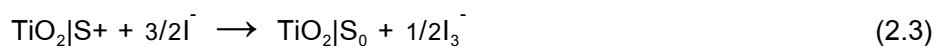
3. สีย้อมไวแสง เป็นส่วนประกอบที่เป็นที่มาของชื่อเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ โดยยึดเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังอนุภาคโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสงนี้ควรมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้มากในหลายช่วงความยาวคลื่น มีความเสถียร และยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

4. สารอิเล็กโทรไลต์ เป็นชั้นส่งผ่านประจุที่มีอยู่ในรูปของเหลว ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox)

หลักการทำงานของ DSSC

เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ (ตัวอย่างเช่น TiO_2) จะดูดกลืนแสง ($h\nu$) แล้วอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state, S_0) จะถูกเร่งให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state, S^*) ดังสมการดูดกลืนแสง (2.1) จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะถูกส่งผ่านไปแถบการนำไฟฟ้า (conduction band, cb) ของอนุภาคโลหะออกไซด์ดังสมการส่งผ่านอิเล็กตรอน (2.2) แล้วอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วแอโนดแล้วออกสู่วงจรภายนอกเซลล์ กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรภายนอกเซลล์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งกลับเข้าสู่เซลล์ที่ขั้วแคโทด ที่ขั้วนี้สารอิเล็กโทรไลต์ (ตัวอย่างเช่นไอโอดีน/ไตรไอโอดีน) จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) ดังสมการ (2.3) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (ตัวอย่างเช่นโลหะแพลทินัม Pt) ดังสมการ (2.4) แต่ในกระบวนการก็อาจมีปฏิกิริยาที่ให้เกิดเชิงลบ ประกอบด้วยการรวมกันใหม่ของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปทำให้สีย้อมไวแสงกลับสู่สถานะพื้นโดยไม่มีอิเล็กตรอนออกไปนอกเซลล์ จึงไม่เกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการ (2.5) และการพบกันของอิเล็กตรอนที่กำลังเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าของอนุภาคโลหะออกไซด์กับสารอิเล็กโทรไลต์ทำให้สูญเสียอิเล็กตรอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ ดังสมการ (2.6)



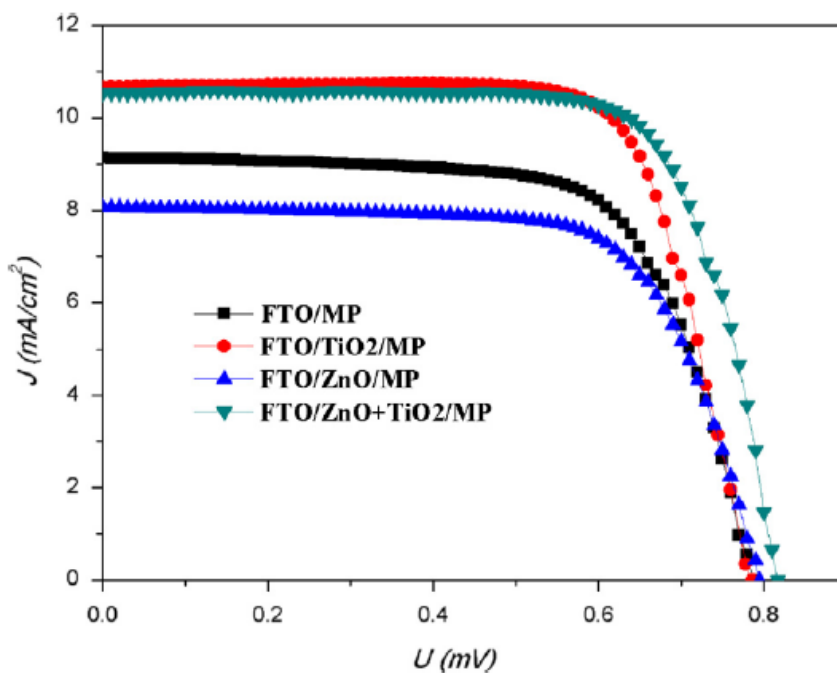


การหาประสิทธิภาพเซลล์สามารถให้ได้จากกราฟ J-V ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ซึ่งแสดงตัวอย่าง J-V curve ของ DSSC วัดภายใต้การให้แสง 100 mw/cm^2 (Air mass =1.5) ซึ่งประสิทธิภาพคำนวณได้ด้วยสมการ (2.7) และ (2.8)

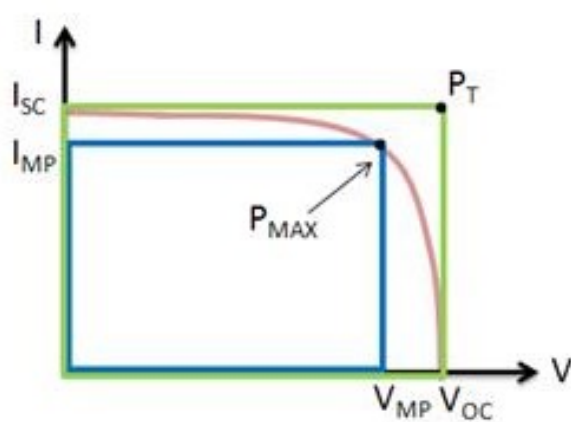
$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.7)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.8)$$

เมื่อ	FF	คือ fill factor	η	คือ ค่าประสิทธิภาพของ DSSC
	V_{mp}	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด	V_{oc}	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด
	I_{mp}	คือ กระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด	I_{sc}	คือ กระแสไฟฟ้าวงจรปิด
	P_{in}	คือ กำลังของแสงเริ่มต้นที่ให้แก่ DSSC		



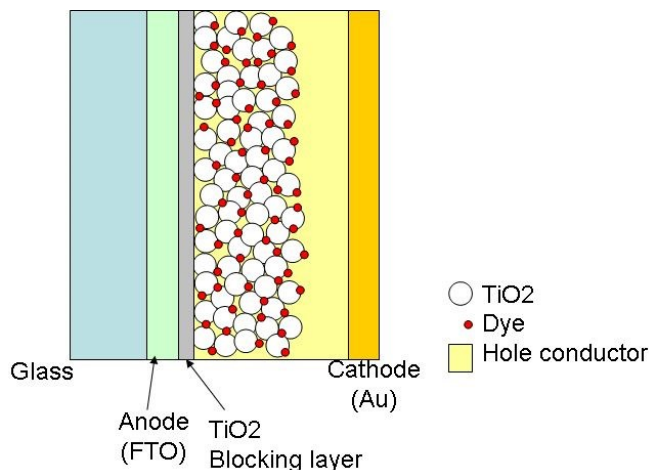
รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่าง J-V curves ของ DSSC



รูปที่ 2.3 แสดงการหาประสิทธิภาพของ DSSC

ปัจจุบันมีหลายกลุ่มวิจัยพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ สีย้อมไวแสง และอิเล็กโทรไลต์ ส่วนใหญ่นำเน้นการพัฒนาอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ซึ่งมีหลายแนวทางเช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส การเพิ่มรูพรุน หรือการเพิ่มจำนวนชั้นของอนุภาค เป็นต้น การป้องกันการสั่นกลับของอิเล็กตรอนด้วยชั้นกั้นโลหะออกไซด์ก็มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงนี้เช่นกัน แนวทางคือการป้องกันการรวมตัวกลับที่รอยต่อระหว่างกระจกนำไฟฟ้ากับชั้น TiO_2 ที่มีความพรุน ด้วยการทำชั้น TiO_2 ที่ต่อกับกระจกนำไฟฟ้าให้มีความหนาแน่นของเนื้อฟิล์มมากขึ้น ซึ่งอาจทำได้

โดยวิธีสเป็คเตอรिंग หรือสร้างชั้นฟิล์มหนาระดับนาโนเมตรโดยใช้วิธีคาโทดิกอาร์คอย่างเช่นในงานวิจัยนี้เป็นต้น ก่อนทำการเคลือบชั้น TiO_2 ที่มีความพรุน ตามปกติ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงชั้นป้องกัน (blocking layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

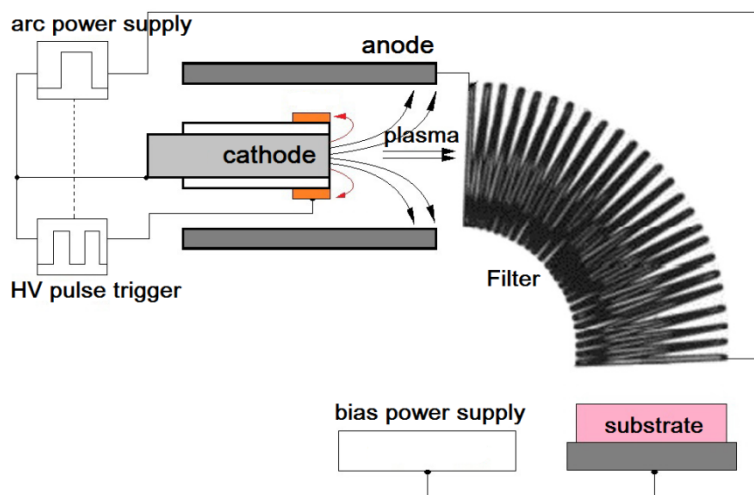
2.2 แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค

การอาร์คในสุญญากาศหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการคาโทดิกอาร์คเป็นการปล่อยกระแสสูงระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด(anode)กับแคโทด(cathode) โดยมีกระแสไฟฟ้าระดับร้อยแอมแปร์ หรือมากกว่าแต่ในขณะที่มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองอาจมีเพียงแค่ 20 โวลต์เท่านั้น พลาสมาของการอาร์คจะเกิดที่บนขั้วคาโทดซึ่งความหนาแน่นกำลัง(power density)สูง อาจมีค่าสูงถึง 10^{13} W/m^2 พลาสมาที่เกิดขึ้นสามารถฟุ้งกระจายหรือล้าเลียงไปเพื่อเคลือบผิวชิ้นงานเป็นฟิล์มบางได้ สมบัติของพลาสมาขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำคาโทด วัสดุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวสูงจะใช้กำลังในการอาร์คมาก เช่น W, Mo เป็นต้น

พลาสมาที่เกิดขึ้นเกิดจากการกัฏกร่อนที่ขั้วคาโทดเมื่อเกิดการอาร์ค อาจมีส่วนที่เป็นละอองขนาดเล็กปนมากับพลาสมาได้เรียกว่า macroparticles ไม่มีประจุเหมือนพลาสมา คัดแยกออกโดยการล้าเลียงพลาสมาออกในแนวโค้งโดยใช้สนามแม่เหล็กเรียกว่าตัวกรอง(filter) แล้ว macroparticle จะเดินทางในแนวตรงทิ้งไป ฟิล์มบางที่ได้จากพลาสมาจะมีคุณภาพดีขึ้น

แหล่งกำเนิดพลาสมาคาโทดิกอาร์คแบบพัลส์ มีการอาร์คเป็นห้วงๆ การอาร์คจะถูกกระตุ้นในช่วงแรกโดยใช้ทริกเกอร์แล้วจึงเกิดการอาร์คตามมาด้วยช่วงระยะเวลาหนึ่งตามการออกแบบของวงจรไฟฟ้าที่ถ่ายเทกระแสไฟฟ้าให้กับแคโทด แท่งคาโทดถูกหุ้มด้วยปลอกฉนวน กันคาโทดออกจากขั้วทริกเกอร์และขั้วแอโนด ส่วนแอโนดมักจะมีลักษณะเป็นวงแหวนจัตวารอบส่วนที่เป็นฉนวนและคา

โทด พลาสมากำเนิดจากผิวคาโทดวิ่งไปยังแท่นรับที่วางชิ้นงานเกิดการเคลือบผิวชิ้นงาน ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิด คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการจุดอาร์ค (กระแสอาร์ค) ทำให้ได้ค่าพลาสมาที่แตกต่างกัน บ่งบอกปริมาณไอออนที่จะกระจายไปตกสะสมเป็นฟิล์มบางบนผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแหล่งกำเนิดพลาสมาคาโทดิกอาร์คแบบพัลส์อาร์ค

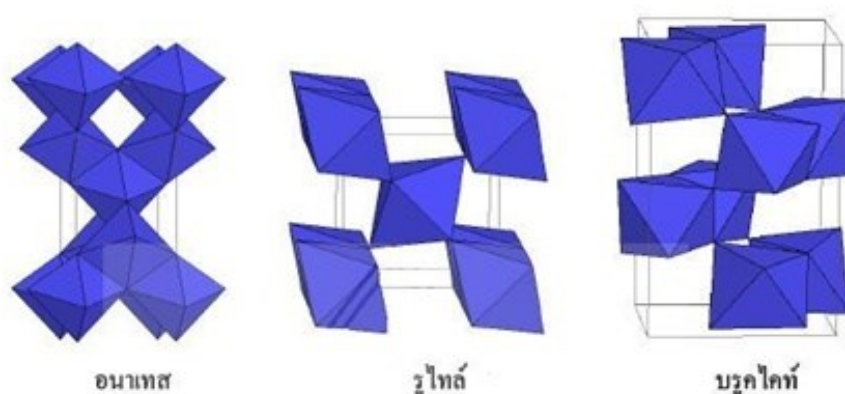
2.3 ไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียมที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide) ไททานิกแอนไฮไดร (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania) ไททาเนียมเป็นแร่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1791 ในเหมืองแร่เหมืองคอร์นวอลล์ ประเทศอังกฤษ โดยนักธรณีวิทยาชื่อ William Gregor ใช้สัญลักษณ์แทนคือ Ti มีเลขอะตอม 22 มีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อสภาพกัดกร่อนของคลอรีน น้ำทะเล และกรด-ด่าง ได้ดี ไททาเนียมไดออกไซด์โดยธรรมชาติจะพบน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแร่ิลเมไนต์ (ilmenite) หรือ ลิวโซซีน (leuxocene) โดยทำให้บริสุทธิ์ได้โดยวิธี rutile beach sand

ปัจจุบันไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มาก มักใช้ในรูปแบบของผลึกแบบ รูไทล์ (rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงชั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆ เช่น ใช้เป็นสารให้สีในสีทาผนัง ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง เป็นต้น

ไททาเนียมไดออกไซด์ แบ่งตามโครงสร้างผลึก ได้ 3 แบบ คือ

1. รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง
2. อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเทระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์
3. บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์เฟส รูไทล์ อนาเทส บรูคไคท์

2.4 การหาค่าพลังงานแถบช่องว่าง

สเปกตรัมจากการส่องผ่านได้ของแสงในช่วงรังสียูวีและแสงขาวของสารตัวอย่าง จะแสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารนั้นๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาสมบัติของสารได้ แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้อย่างเดียวจะให้ผลได้เพียงคร่าวๆ เพราะลักษณะของสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดที่ได้จะมีความกว้างมากและยังมีรายละเอียดอีกเยอะ จึงควรใช้เทคนิคอื่นๆร่วมวิเคราะห์ด้วย สำหรับการวิเคราะห์สารในเชิงปริมาณด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่าพลังงานของแสงที่ตกกระทบกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

พลังงานแถบช่องว่างหาได้จากค่าร้อยละของการส่องผ่าน โดยนำค่านี้ไปคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนดังสมการ

$$\alpha = -\frac{\ln T}{d} \cong A^*(h\nu - E_g)^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (คำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและความหนาของฟิล์ม)

T คือ ร้อยละของการส่งผ่าน

d คือ ความหนาของฟิล์ม

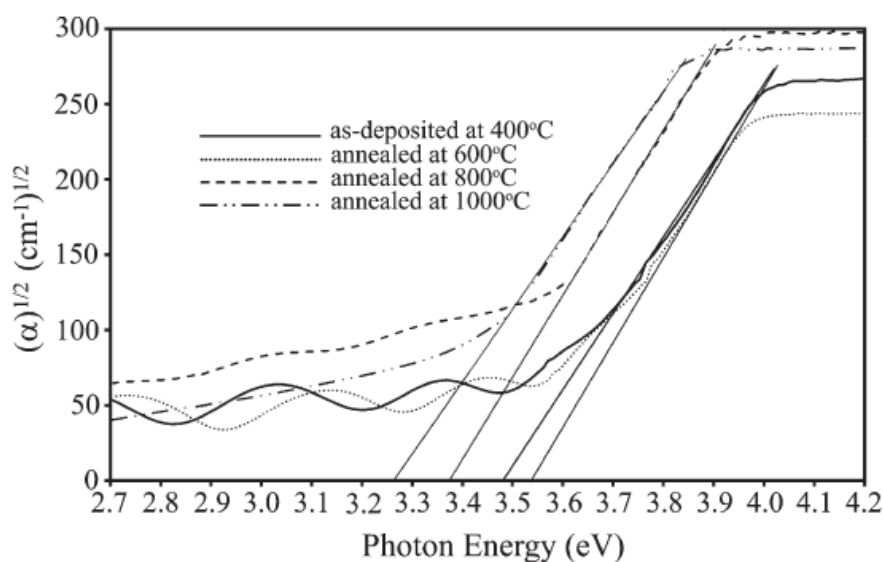
A^* คือ ค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับ $h\nu$

h คือ Planck's constant (4.135×10^{-15} eV.s)

ν คือ ความถี่ของแสง (s^{-1})

E_g คือ แถบช่องว่างพลังงาน

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและพลังงานโฟตอน จากนั้นลากเส้นขนานกับกราฟที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงจุดที่มีค่าความชันกราฟสูงสุด ลากเส้นจนตัดแกนพลังงานจะได้ค่าพลังงานแถบช่องว่าง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการหาค่าพลังงานแถบช่องว่างจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

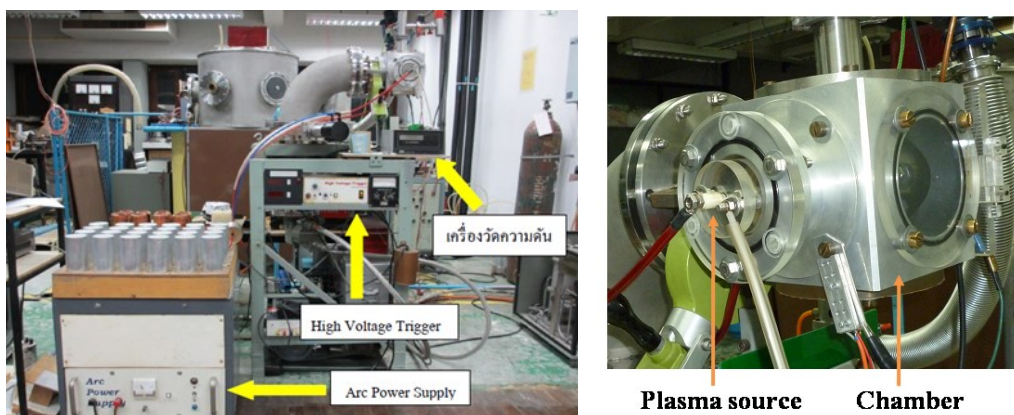
บทที่ 3

การดำเนินการทดลอง

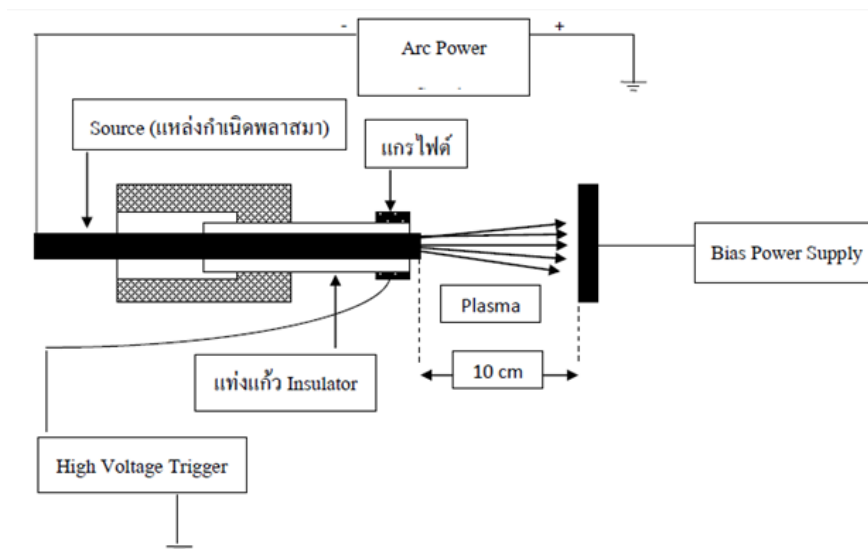
ในงานวิจัยนี้เริ่มจากการปรับปรุงระบบแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค(Cathodic Arc Plasma Deposition; CAPD)ให้สามารถเคลือบฟิล์มบางได้ในห้องสุญญากาศ เตรียมชิ้นส่วน อุปกรณ์ที่จำเป็น วัสดุ แก๊สและสารเคมี ทดสอบการทำงาน ทดลองเตรียมงานบนชิ้นงานกระจกสไลด์ วิเคราะห์ศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง แล้วจึงทำการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นกั้นลงบนกระจกเคลือบฟิล์มโปร่งแสงนำไฟฟ้า(Fluorine doped Tin Oxide, FTO) ก่อนนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์และทดสอบหาประสิทธิภาพ

3.1 การเตรียมเครื่องมือการทดลอง

ระบบกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์คที่พัฒนาขึ้นเป็นหัวกำเนิดพลาสมาแบบหัวหรือแบบพัลส์อาร์ค อาร์คด้วยความถี่หนึ่งครั้งต่อวินาที ความกว้างพัลส์ 1 ms กระแสอาร์ค 100 แอมแปร์ ขับด้วยแหล่งจ่ายพลังงานแรงดัน 300 โวลต์ ขนาดของแชมเบอร์ $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบกำเนิดพลาสมาแบบคาโทดิกอาร์ค



รูปที่ 3.2 ไอระเหยแสดงระบบกำเนิดพลาสมาคาโทดิกอาร์คแบบไม่มีตัวกรอง

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองมี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาจำนวนพัลส์ในการอาร์คพลาสมาเพื่อใช้เป็นชั้นกัน(Blocking layer)ซึ่งจะมีการอาร์คในจำนวนพัลส์ที่ต่างกันดังนี้ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ แล้วพิจารณาจำนวนพัลส์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยมีการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องคาโทดิกอาร์ค(CAPD) ที่ความดัน 5.0×10^{-3} mbar. (Ch3.) ในภาวะมีแก๊สออกซิเจน โดยเครื่อง CAPD จะมีกระแสไฟฟ้า 100 A และมีความต่างศักย์ 300 V (หรือกำลังไฟฟ้า 30 kW) มีการต่อความต่างศักย์ไบแอสที่ขั้วแอโนด -50 V

ขั้นตอนที่ 2 นำฟิล์มที่ได้จากขั้นตอนแรกมาทำเงื่อนไขของอุณหภูมิ คือ มีการเผาชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อดูผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การพิจารณาสมบัติของชั้นฟิล์มในเงื่อนไขแบบเผาและไม่เผานั้น จะทำโดยคุณสมบัติพื้นผิวและองค์ประกอบของธาตุโดยเครื่อง SEM คุณสมบัติการดูดกลืน การส่งผ่าน และหาช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap Energy) ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy(รุ่น Varian Cary 50)ความหนาของฟิล์มโดยเครื่อง AFM(รุ่น Nano Scope IIIa บริษัท Di digital instruments Veeco Metrology Group)และคุณสมบัติเฟสของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง Raman spectroscopy

โดยมีคุณสมบัติเครื่องดังนี้

RAMAN SPECTROMETER : JOBIN YVON HORIBA : FRANCE

MODEL :T64000 triple monochromator

-subtractive mode /Triplemonochromator

-laser exciting 532 nm solid state laser 150mW

-slit out 100 um

-Acquisition time30s

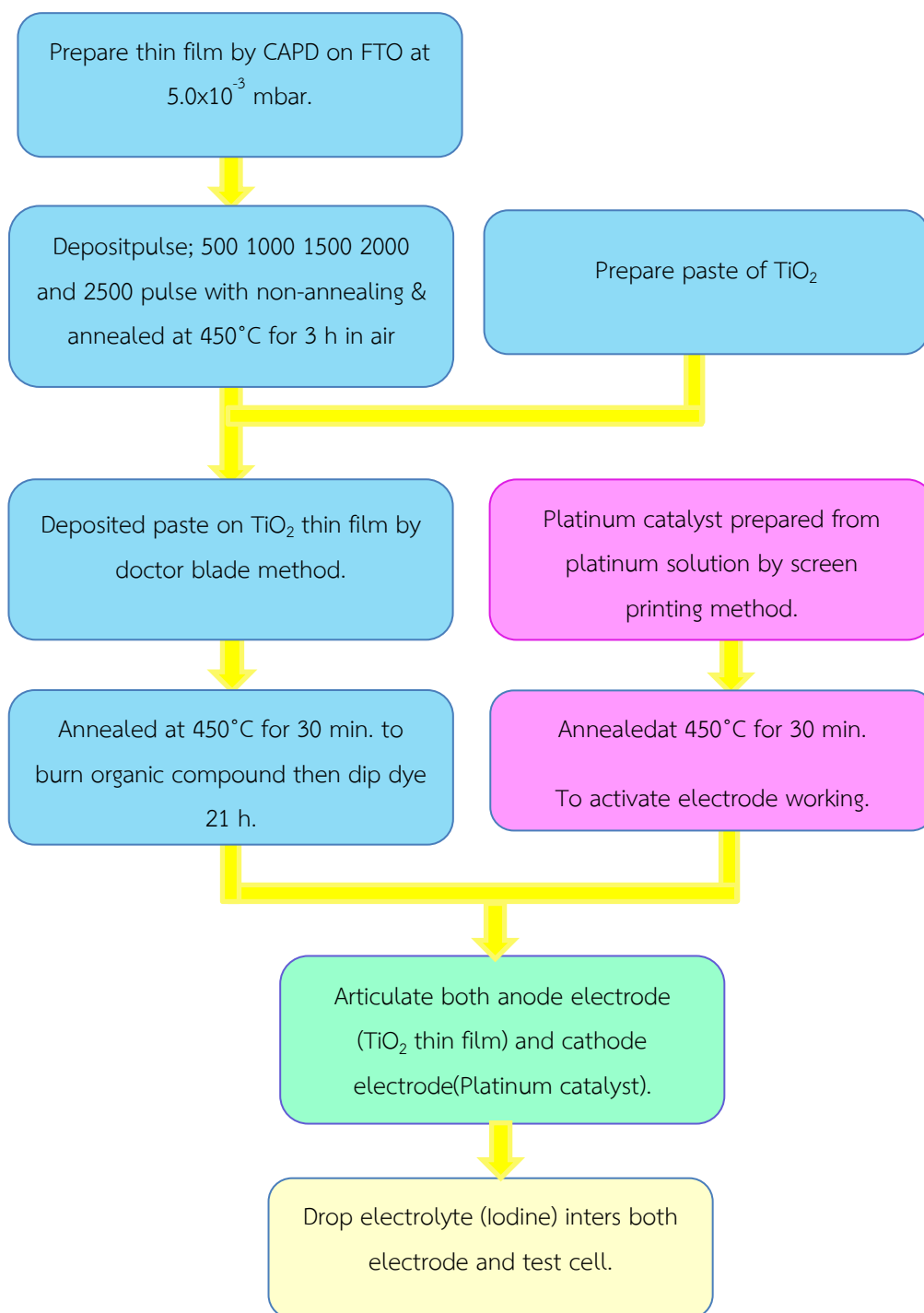
-Accumulation number 2 times

-100 X microscope objective

-1800 gr/mm spectrograph grating

-spectral range 50 or100 - 1000,2000,4000

แผนผังการทดลอง



3.3 การสังเคราะห์ชั้นกันของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มของ TiO_2 จะถูกเคลือบลงบนกระจก FTO (fluorine doped tin oxide, 7 ohm/sq Transmission > 80 % from 400 to 700 nm, solaronix) ก่อนทำการเคลือบจะล้างกระจกด้วยน้ำยาล้างจาน จากนั้นนำกระจก FTO ไป Ultrasonic ในเอทานอล(5%v/v) 20 ml. ผสมกับแอซีโตน(5%v/v) 20 ml. 15 นาที จากนั้นนำไป Ultrasonic ต่อในน้ำ DI 5 นาที แล้วนำไปแคลไซด์(Calcine) ที่ 120 °C เป็นเวลา 15 นาที รอให้กระจกเย็นแล้วนำไปใช้ในงานต่อไป

ในการทำฟิล์มของ TiO_2 จะนำกระจกวางบนฐานยึด(holder) ดังรูปที่ 3.3 แล้วนำเข้าเครื่อง CAPD ทำการเคลือบฟิล์มด้วยจำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ โดยเคลือบบน FTO ในพื้นที่ 6.5x 6.5 mm².



รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งชิ้นงานบนฐานยึดชิ้นงาน

3.4 การเตรียมpaste ของ TiO_2

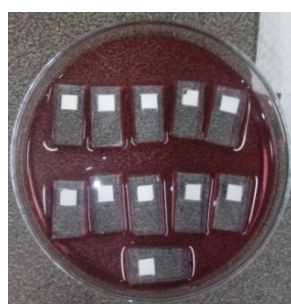
นำผง TiO_2 (Titanium(IV) oxide, 99.8% anatase, Sigma) มา 3 g. บดในครกบดสารเพื่อบดผงที่เป็นก้อนให้ละเอียดลงเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมกรดไนตริก 1.5 M ปริมาณ 0.7 ml. ตามด้วยน้ำ DI 3 ml. (ค่อยๆ เติมทีละ 0.5 ml.) บดให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารลดแรงตึงผิว (Triton™ X-100, Sigma) จำนวน 0.05 ml. (5 หยด) แล้วคนสารต่อไปอีก 15 นาที เมื่อผสมสารทั้งหมดแล้วพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

นำ paste ที่เตรียมได้มาทำการสั่น Ultrasonic 2 ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่แตกสลายตัวให้มีขนาดเล็กลงและนำไปเคลือบบนชั้นกันโดยวิธี Doctor Blade ในพื้นที่ 5 x 5 mm². บนฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมไว้ตอนแรก ดังรูปที่ 3.4

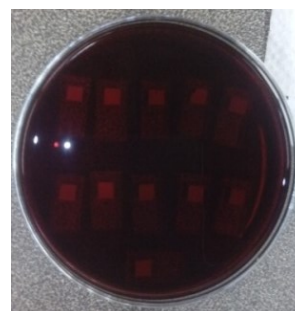


รูปที่ 3.4 แสดงการเตรียม paste ของ TiO_2 โดยวิธี Doctor Blade บนชั้น Blocking Layer

ปล่อยกระจกที่เคลือบ paste ของ TiO_2 แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อเผาไล่สารประกอบอินทรีย์(กรดไนตริก)ใน paste ออกให้หมด สำหรับการย้อมสีจะย้อมด้วยสีย้อม N 719(Ruthenizer535-bisTBA,solaronix) 0.3 mM ในเอทานอล 40 ml. นำ paste ของ TiO_2 ที่เตรียมได้ไปแช่ในสีย้อมเป็นเวลา 21 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้อง



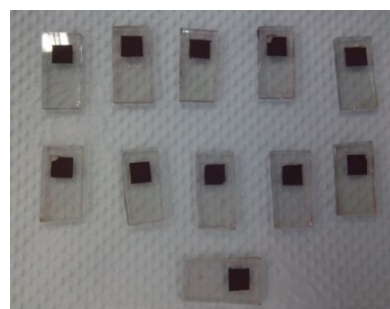
ก



ข



ค



ง

รูปที่ 3.5 แสดงการแช่สีย้อมขั้วแอโนดและขั้วแคโทดหลังจากผ่านการย้อมสีแล้ว

เมื่อแช่เสร็จแล้วนำ ออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้องและอบที่ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ อีก 30 นาทีให้ paste ของ TiO_2 แห้งสนิทและจะได้ paste ของ TiO_2 ดังรูปที่ 3.5

3.5 การทำ Counter electrode

Counter electrode จะเตรียมจากสารละลายแพลทินัม (Platisol T, Solaronix) หยดลงบนกระจก แล้วเกลี่ยให้เท่ากันโดยวิธี Doctor Blade แล้วนำไปเผาที่ 450°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้กระตุ้นการทำงานของ Counter electrode



ก.



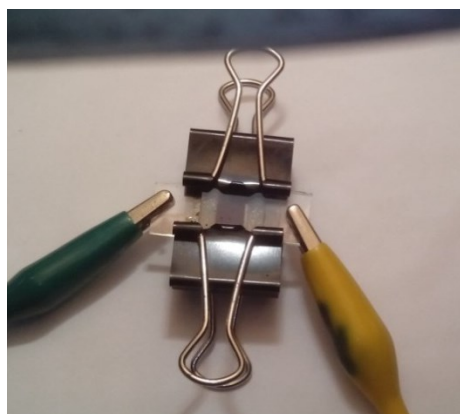
ข.

รูปที่ 3.6

ก. กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยสารละลายแพลทินัม
ข. กระจกนำไฟฟ้าหลังจากการเผาแล้ว

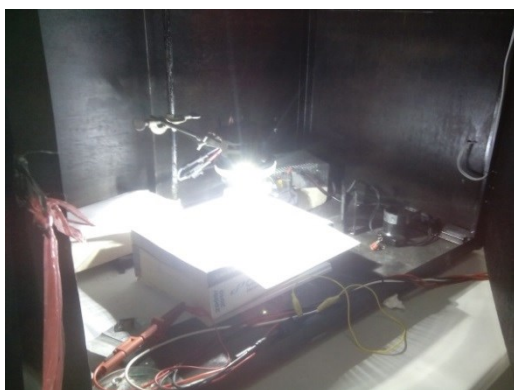
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ของ DSSC

นำกระจกในขั้นตอนที่ 3.4 และ 3.5 มาประกบเข้าหากันยึดด้วยตัวหนีบกระดาษ เสร็จแล้วหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (30 mM Iodolyte HI-30, Solaronix) ระหว่างกระจกทั้งสองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการประกอบ DSSC เพื่อนำไปวัดประสิทธิภาพ

ทำการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์โดยใช้เครื่องแสงอาทิตย์จำลองความเข้ม 100 mW/cm^2 ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพ DSSC ที่ความเข้ม 100 mW/cm^2

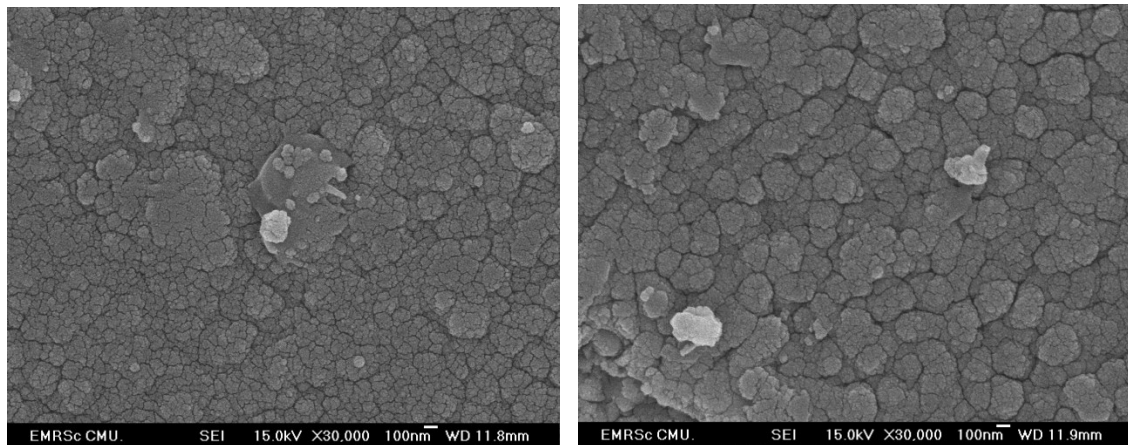
หลังจากเสร็จชุดการทดลองแรก ทำซ้ำเหมือนข้อ 3.4-3.6 อีกชุดการทดลองหนึ่ง โดยนำฟิล์มที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นที่จำนวนพัลส์เท่ากับ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ไปเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำมาประกอบเซลล์แล้วทดลองหาประสิทธิภาพ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติพื้นผิวของฟิล์มบาง TiO_2

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(SEM)แสดงดังรูปที่ 4.1



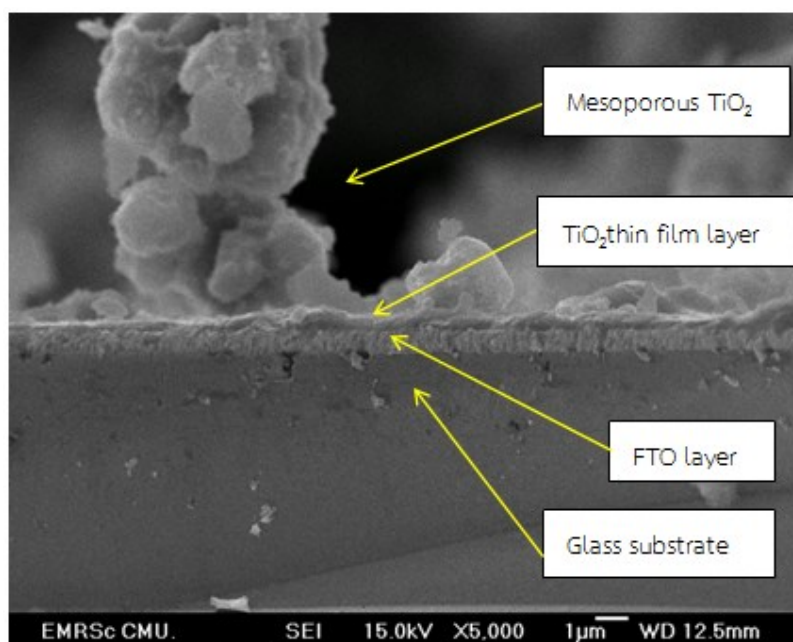
ก.

ข.

รูปที่ 4.1 แสดงพื้นผิวฟิล์มบางของ TiO_2 ที่จำนวนพัลส์ 2000 พัลส์

ก) ฟิล์มบางที่ไม่ได้เผา ข) ฟิล์มบางเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวของฟิล์มบาง TiO_2 ที่ จำนวนพัลส์ 2000 พัลส์ แบบไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สังเกตได้ว่าฟิล์มบาง TiO_2 แบบ เจริญไขไม่เผา(รูปที่ 4.1 ก) จะมีความแตกต่างเชิงพื้นผิวมากกว่าแบบเผา(รูปที่ 4.1 ข) ซึ่งสามารถ อธิบายได้สองกรณีดังนี้ กรณีที่หนึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการเผาอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ขอบเกรน(grain boundary) มีการหลอมรวมกัน(melting)สร้างเป็นขอบเกรนใหม่ที่มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น กรณีที่สอง การ แตก (crack) ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเกิดขึ้นในขั้นตอนเผาและขั้นตอนการลดอุณหภูมิ ในขณะที่ฟิล์มยังติด กับกระจกแต่กระจกและชั้นฟิล์มเกิดการขยายและหดตัวไม่เท่ากัน(สมบัติการขยายตัวเชิงความร้อนไม่ เท่ากัน) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกออก รูปที่ 4.2 แสดงภาคตัดขวางของ ขั้วแอโนด โดยฟิล์มบางจะอยู่ระหว่าง FTO และ mesoporous TiO_2



รูปที่ 4.2 ภาคตัดขวางของขั้วแอโนดโดยมีฟิล์มบางจำนวน 2000 pulse แบบไม่เผาเป็นชั้นกัน

4.2 องค์ประกอบธาตุของฟิล์มบาง TiO₂

ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบธาตุของฟิล์มบาง TiO₂ วิเคราะห์จากเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 การวัดองค์ประกอบธาตุเพื่อใช้เปรียบเทียบกันระหว่างชั้นฟิล์มบางแบบไม่เผาและแบบเผาที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากพื้นผิวดังกล่าวสามารถนำมาใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุได้ โดยในการทดลองนี้จะวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ Ti (ไททาเนียม) กับ Ti-O (ออกไซด์ของไททาเนียม) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ข้อมูลการวัด EDS พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse แบบไม่เผามีดังนี้

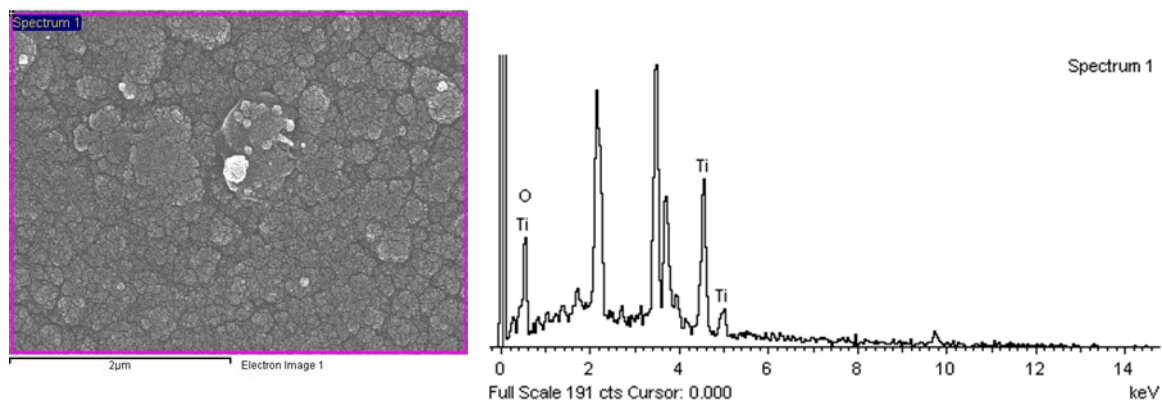
Spectrum processing: Peaks possibly omitted: 2.143, 3.450, 3.682, 9.730 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalised) Number of iterations = 4

Standard:

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM



รูปที่ 4.3 แสดงพื้นผิวฟิล์มบางที่ 2000 pulse แบบไม่เผาที่ใช้วิเคราะหองค์ประกอบธาตุ และกราฟแสดงสัดส่วนออกไซด์ของไททาเนียมและอะตอมไททาเนียม

ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วนน้ำหนักและค่าร้อยละของ Ti และ O ที่พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse

Element	Weight%	Atomic%
O	53.23	77.31
Ti	46.77	22.69
Totals	100.00	100.00

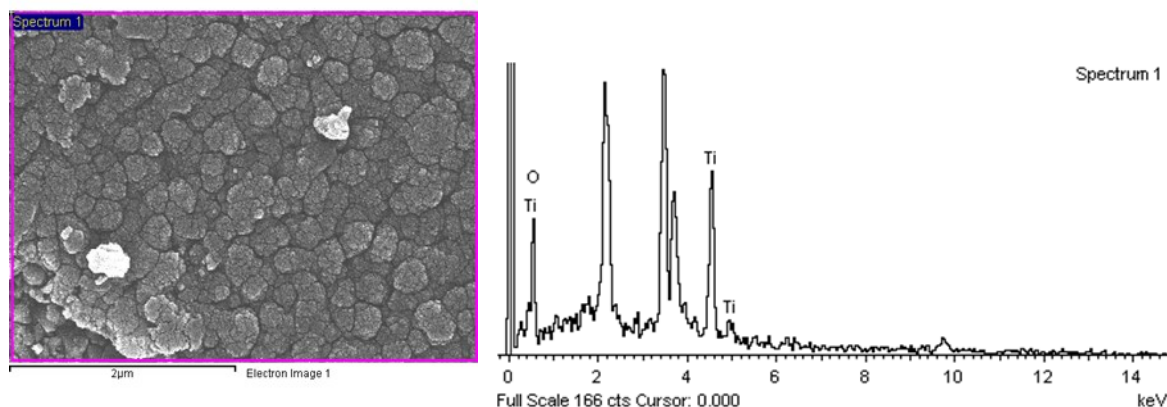
ข้อมูลการวัด EDS พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse แบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีดังนี้

Spectrum processing: Peaks possibly omitted: 2.140, 3.449, 3.680 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalised) Number of iterations = 4

Standard: O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM



รูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse แบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ และกราฟแสดงสัดส่วนออกไซด์ของไททาเนียมและอะตอมไททาเนียม

ตารางที่ 4.2 แสดงสัดส่วนน้ำหนักและค่าร้อยละอะตอมของ Ti และ O ที่พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse แบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

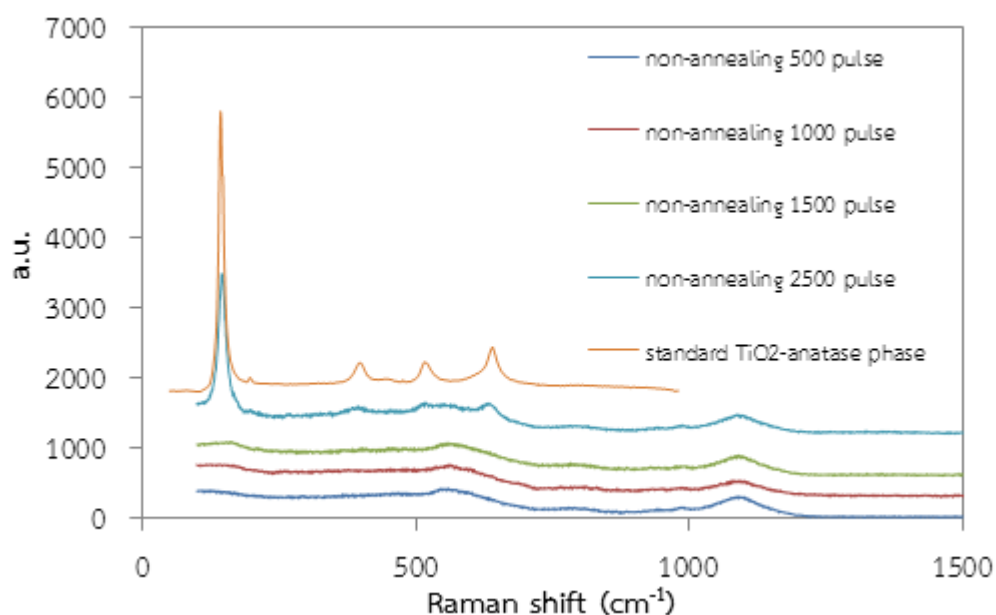
Element	Weight%	Atomic%
O	55.70	79.01
Ti	44.30	20.99
Totals	100.00	100.00

จากผล EDS เปรียบเทียบสัดส่วนน้ำหนักและค่าร้อยละอะตอมของ Ti และ O ที่พื้นผิวฟิล์มบาง 2000 pulse ทั้งแบบเผาและไม่เผาพบว่า การเผาชั้นฟิล์มจะทำให้ Atomic% ของออกซิเจนเพิ่มจาก 77.31 เป็น 79.01 และจากกราฟสเปกตรัม EDS เมื่อเผาแล้วจะมีสัดส่วนความเข้มฟีด Ti-O เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ Ti นั่นคือการเผาอาจทำให้ อะตอม Ti ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นออกไซด์(TiO_2)มากขึ้น ในกรณี Atomic% ของออกซิเจนจะมีค่ามากกว่า Ti 4 เท่า เนื่องจากอะตอม O ที่วัดได้ขึ้น 2 ใน 4 ส่วน มาจากออกไซด์ของไททาเนียม(TiO_2)ที่ได้จากการอาร์ค และอีก 2 ใน 4 ส่วน มาจากออกไซด์ของทิน (SnO_2)ที่ถูกใช้เป็น substrate

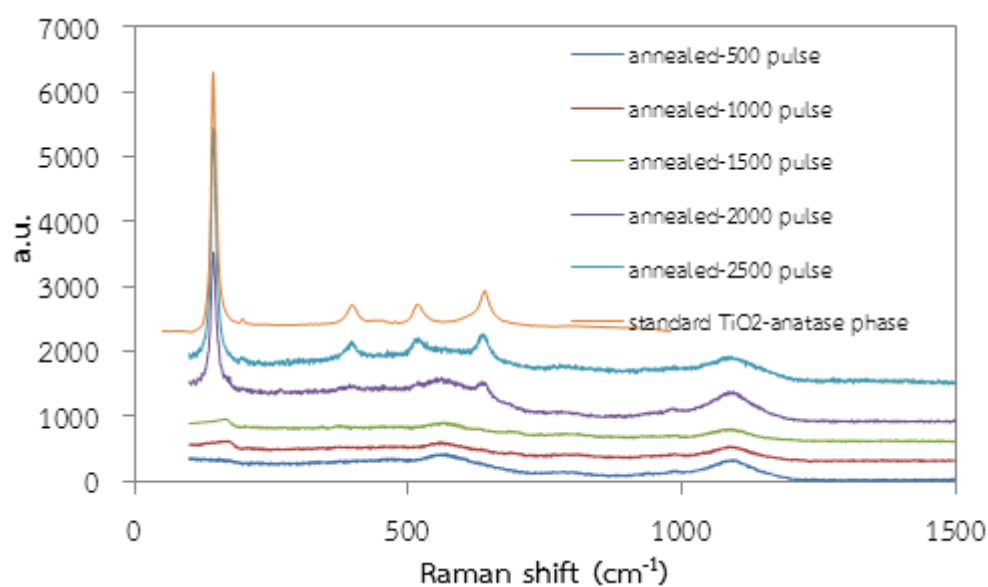
4.3 สารประกอบและเฟสของฟิล์ม TiO_2

ความเป็นสารประกอบและเฟสของ TiO_2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy (RAMAN) เทคนิคนี้มักถูกใช้วิเคราะห์ความเป็นสารประกอบของสาร โดยในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์การเกิด TiO_2 จากกระบวนการอาร์คแบบคาโทดิกซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัมพันธ์(arbitrary

unit : a.u.) และ Raman shift (Wave number: cm^{-1}) ทั้งแบบกรณีที่ไม่เผาชั้นฟิล์มดังรูปที่ 4.5 และกรณี
ที่เผาชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 กราฟสเปกตรัมความเข้มสัมพัทธ์ Raman spectroscopy ของฟิล์มบาง TiO_2 แบบไม่
เผา

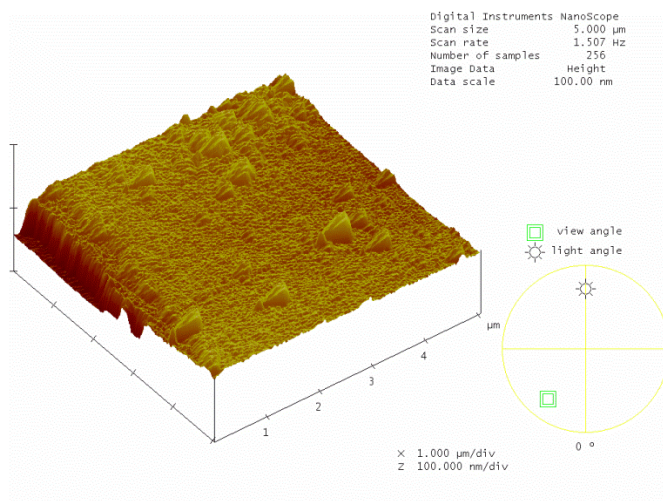


รูปที่ 4.6 กราฟสเปกตรัมความเข้มสัมพัทธ์ Raman spectroscopy ของฟิล์มบาง TiO_2 แบบเผา
ที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

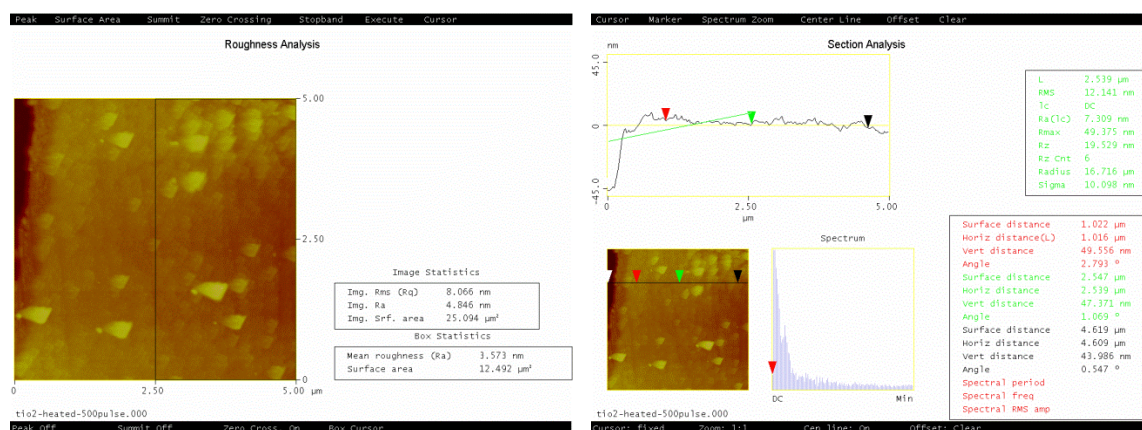
จากกราฟสเปกตรัมความเข้มสัมพัทธ์ Raman spectroscopy ของฟิล์มบาง TiO_2 ทั้งแบบไม่เผา (รูปที่ 4.5) และแบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.6) จะพบว่าในกรณีที่ไมเผาก็เมื่อเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐาน (TiO_2 -anatase phase, Source=JY, biomaterial, 99, Labram, $\lambda=532.2$ nm.) ที่จำนวนพัลส์ 500 1000 และ 1500 พัลส์ จะเกิดเฟสของ TiO_2 น้อยมากเมื่อเทียบกับ 2500 พัลส์ ส่วนฟิล์มบางที่เผาที่จำนวนพัลส์เท่ากับ 500 1000 และ 1500 พัลส์ จะเกิดฟีดน้อยมากเมื่อเทียบกับฟีดของ 2000 และ 2500 พัลส์ ซึ่งจะแสดงการเกิดเฟสของ TiO_2 ที่มากกว่า การเกิดฟีดแต่ละฟีดของเงื่อนไขทั้งแบบเผาและไม่เผาก็จะเกิดเฟสของ TiO_2 มากขึ้นเมื่อจำนวนพัลส์ของการอาร์คที่มากขึ้นเหตุเป็นเพราะการอาร์คแต่ละครั้งอะตอมของ Ti ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ O_2 เกิดเป็น TiO_2 ได้สมบูรณ์ ฉะนั้นอัตราส่วนของการเกิด TiO_2 ในเนื้อฟิล์มจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเกิดการสะสมของชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้น จะสังเกตได้ว่าจะเกิดฟีดปริมาณของ TiO_2 เมื่อมีจำนวนพัลส์ที่มากขึ้นนั่นเอง

4.4 ความหนาของฟิล์ม TiO_2

ความหนาของฟิล์มหาจากภาคตัดขวางโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force Microscope: AFM) ในการทดลองนี้จะศึกษาความหนาของฟิล์มบางแบบเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานโดยจะมีการประมาณว่าฟิล์มบางที่จำนวนพัลส์เหมือนกันจะมีความหนาที่ใกล้เคียงกันในทุกกรณีแบบเผาและไม่เผาล้วนฟิล์ม จากเทคนิค AFM จะสามารถนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนา (thickness) และความขรุขระของพื้นผิว (roughness) เป็นต้น การวิเคราะห์สมบัติดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.7 ถึง รูปที่ 4.11



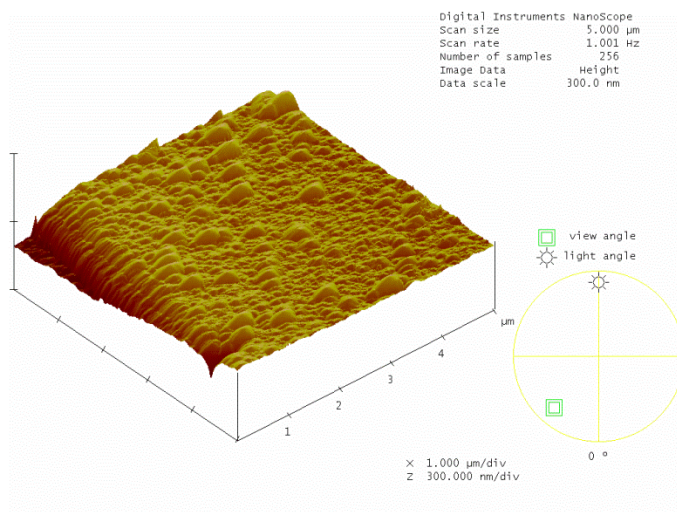
ก.



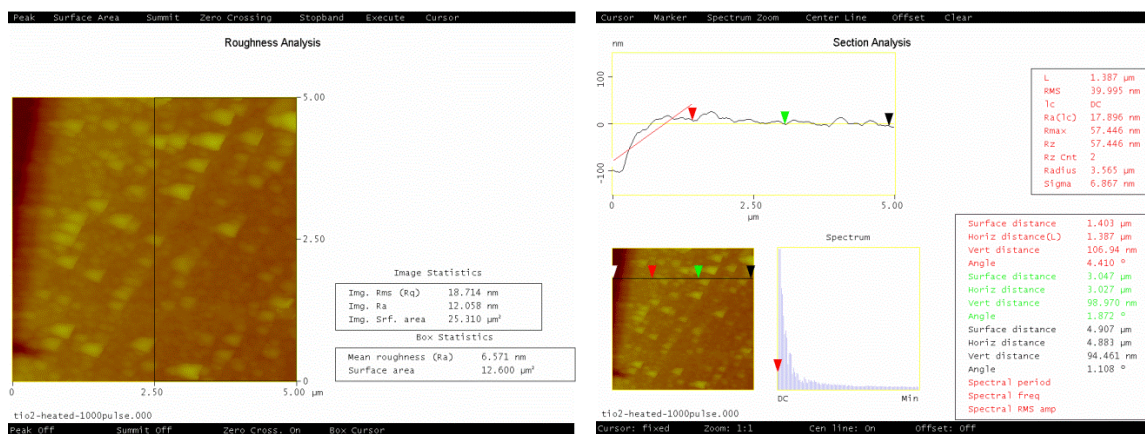
ข.

ค.

รูปที่ 4.7 ก). แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 500 พัลส์



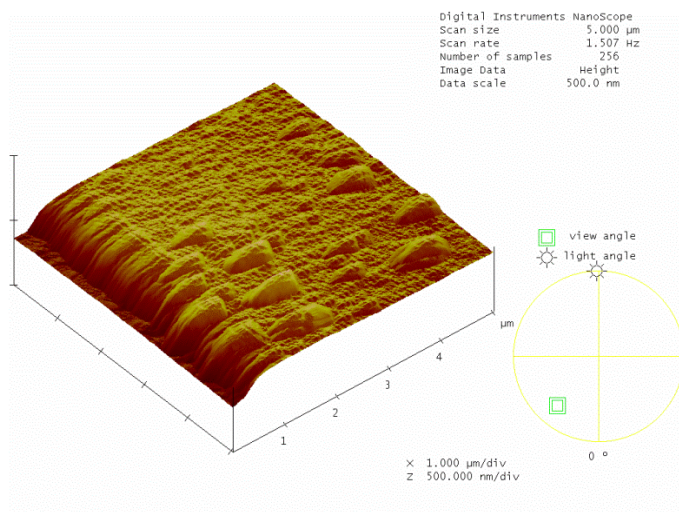
ก.



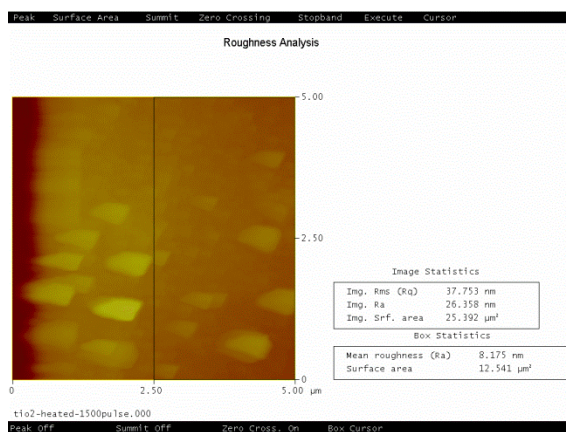
ค.

ง.

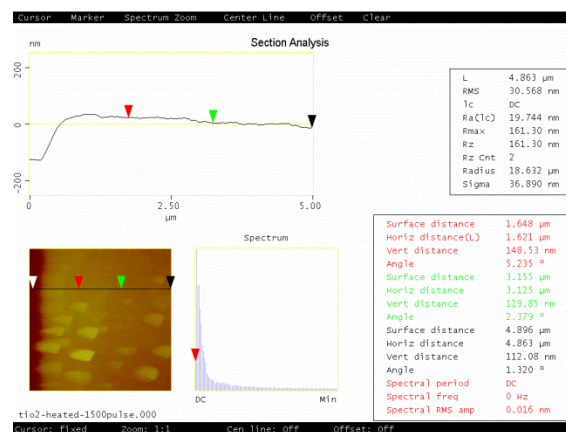
รูปที่ 4.8 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 1000 พัลส์



ก.

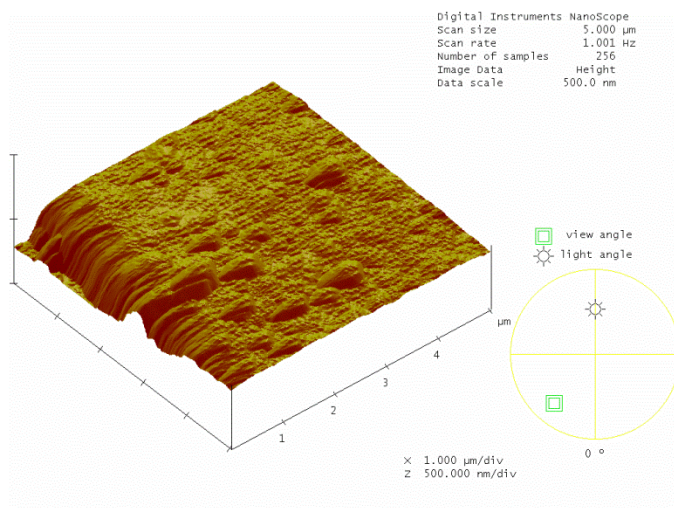


ข.

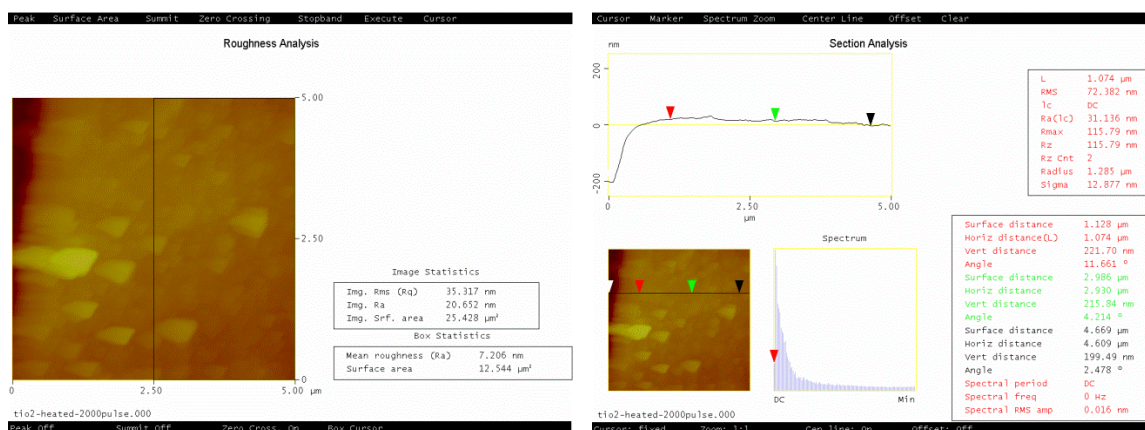


ค.

รูปที่ 4.9 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค). การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 1500 พัลส์



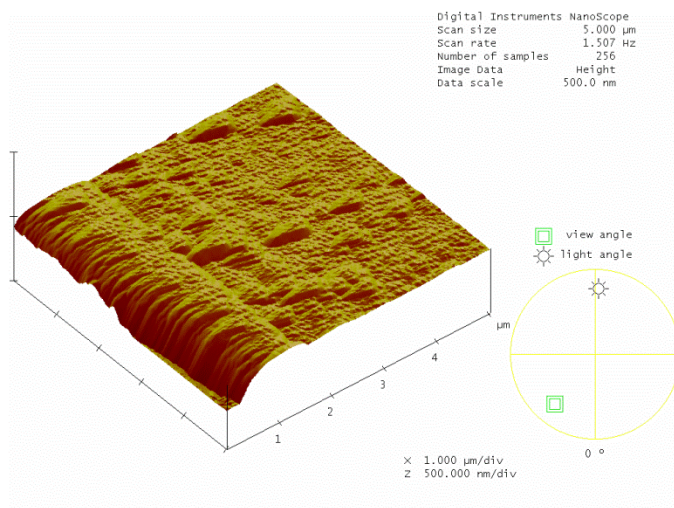
ก.



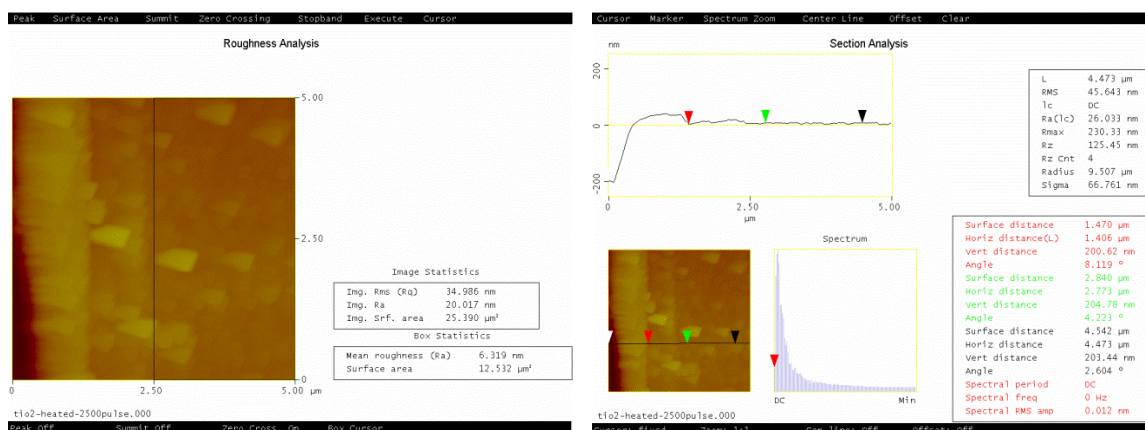
ข.

ค.

รูปที่ 4.10 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 2000 พัลส์



ก.



ข.

ค.

รูปที่ 4.11 ก) แสดงลักษณะพื้นผิว ข) การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว ค) การหาความหนาจากภาคตัดขวางของฟิล์มบางแบบเผา 2500 พัลส์

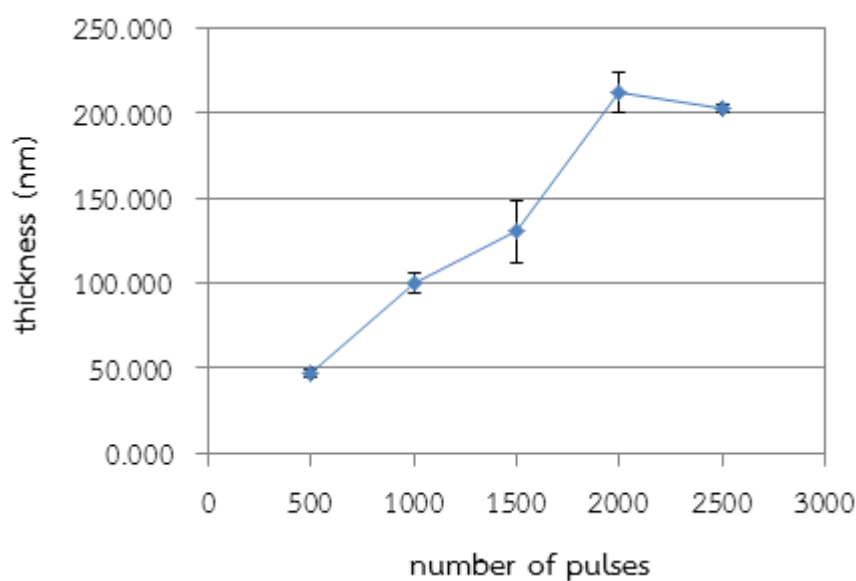
การวัดความหนาของชั้นฟิล์มจะวัดความหนาจำนวน 3 ตำแหน่งแล้วนำมาเฉลี่ยเป็นค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นฟิล์ม ค่าความขรุขระและพื้นที่ผิวสัมผัสจะวัดในพื้นที่ $2.5 \times 5 \text{ nm}^2$ โดยได้ทำการสรุปผลวิเคราะห์ชั้นฟิล์มต่างๆ จากเทคนิครามานข้างต้น(รูปที่ 4.7-4.11) ไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์ของค่าความหนาเฉลี่ย ความขรุขระเฉลี่ยและพื้นที่ผิวสัมผัสของฟิล์มบางแบบเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่จำนวนพัลส์ต่างๆ

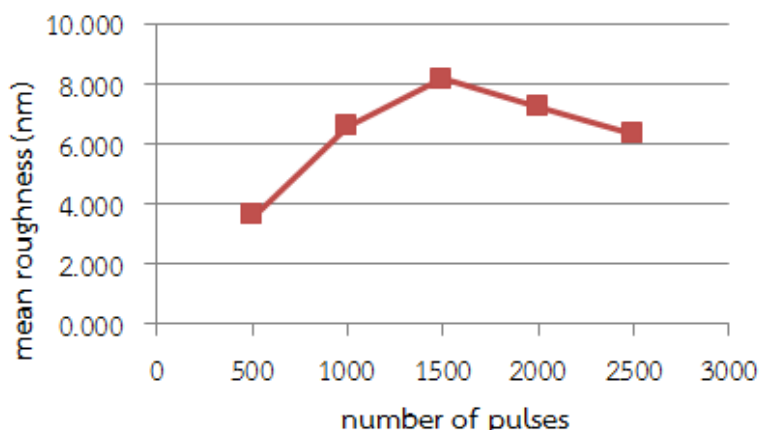
point	500 pulses	1000 pulses	1500 pulses	2000 pulses	2500 pulses
1	49.566	106.940	148.530	221.700	200.620
2	47.371	98.970	129.850	215.840	204.780
3	43.986	94.461	112.080	199.490	203.440
mean thickness(nm)	46.974	100.124	130.153	212.343	202.947
SD thickness (nm)	2.811	6.319	18.227	11.510	2.123
***mean roughness(nm)	3.573	6.571	8.157	7.206	6.319

*** วัดจากโปรแกรม Nanoscope III 5.12r3

เมื่อนำค่าความหนาเฉลี่ยและค่าความขรุขระของพื้นผิว มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับจำนวนพัลส์ของการอาร์ค สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาเฉลี่ยกับจำนวนพัลส์ของการอาร์ค

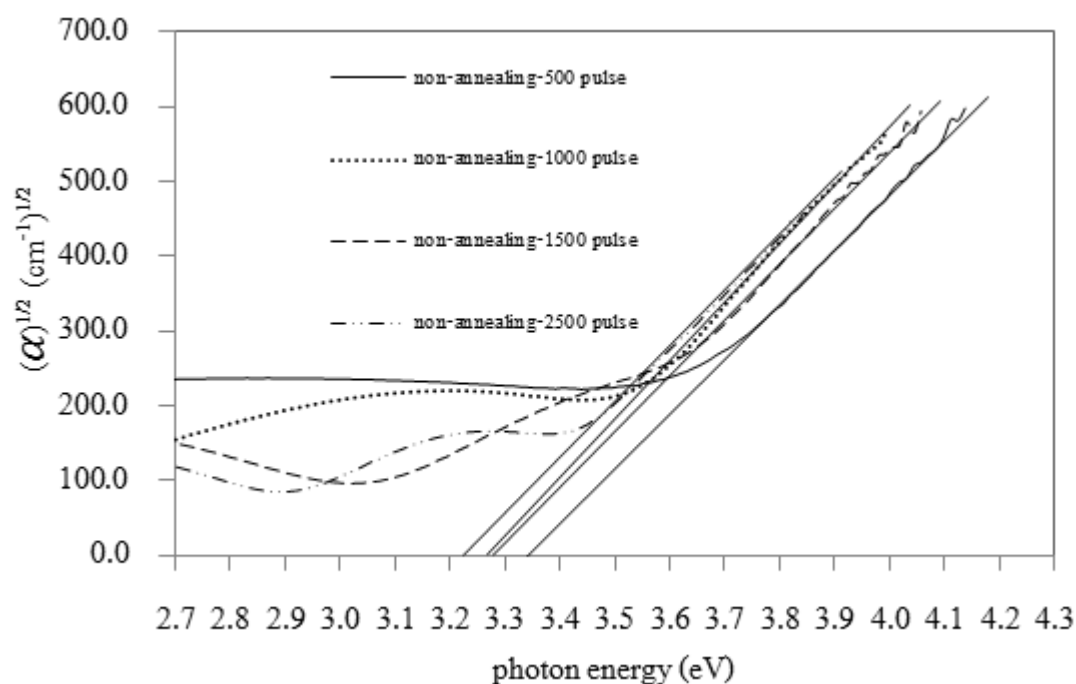


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระเฉลี่ยกับจำนวนพัลส์ของการอาร์ค

จากผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางจำนวนพัลส์ต่างๆที่เผาแล้ว เมื่อนำค่าความหนาเฉลี่ย ความขรุขระเฉลี่ย และค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมาเขียนความสัมพันธ์กับจำนวนพัลส์พบว่า ความหนาเฉลี่ย(รูปที่ 4.12)จะมีการวัดค่า 3 จุดบนพื้นผิวโดยให้มีระยะห่างระหว่างจุดจะกำหนดให้มีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของจุดทั้งสาม ได้ว่าความหนาจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นในช่วงจำนวนพัลส์ 500 1000 1500 พัลส์ และจะเริ่มมีความหนาคงที่ตรงบริเวณ 2000 และ 2500 พัลส์ ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจเกิดการกระเจิงของอนุภาคออกจากผิวฟิล์มในแต่ละครั้งของการอาร์คมากกว่าการเกิดการตกสะสมของอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ย(รูปที่ 4.13)จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงโดยจะมีความขรุขระสูงสุดที่จำนวนพัลส์ของการอาร์คเป็น 1500 พัลส์ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าการอาร์คที่จำนวนพัลส์มากขึ้นจะทำให้อนุภาคสามารถตกสะสมแทรกตัวในบริเวณที่มีความขรุขระสูงจนเกิดชั้นฟิล์มที่มีลักษณะราบเรียบ (flat) มากขึ้นซึ่งจะมีความขรุขระลดลงสังเกตได้จากการลดลงของค่าความขรุขระในกราฟรูปที่ 4.13

4.5 การส่งผ่านของแสงและการหาแถบช่องว่างพลังงาน

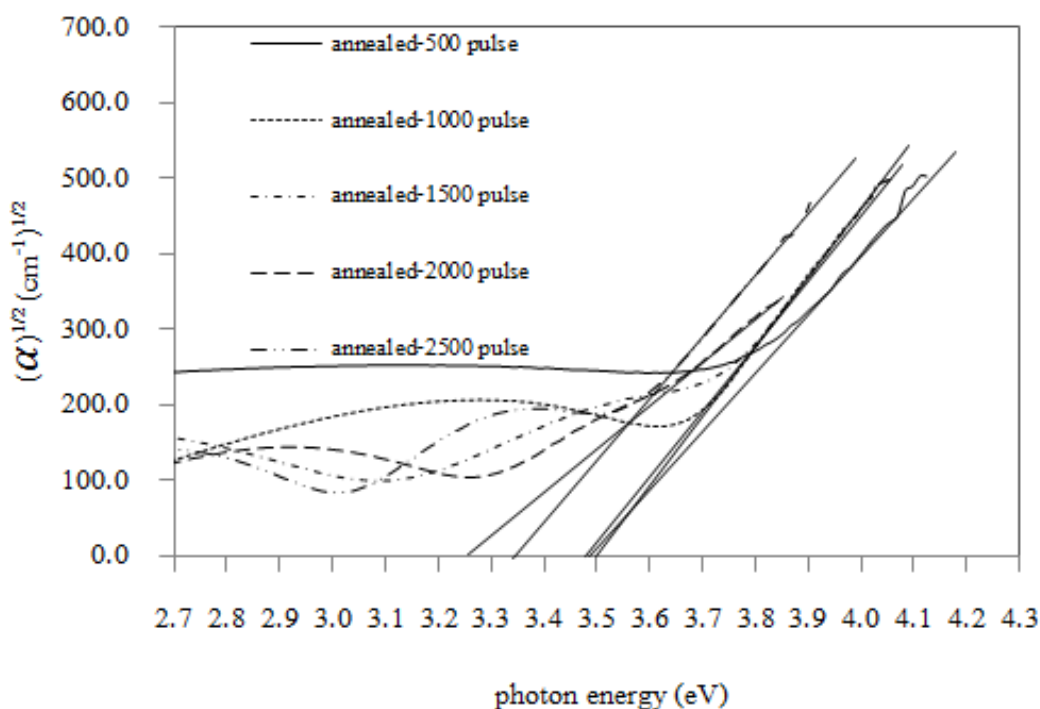
สมบัติการส่งผ่านของแสงผ่านฟิล์มหาโดยเทคนิค UV-Vis spectroscopy และหาแถบช่องว่างพลังงาน (Bandgap energy) จากสมบัติการส่งผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ค่าการส่งผ่านของแสงจะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 2.9 โดยเมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน(cm^{-1})และพลังงานของโฟตอน(eV)ในกรณีของทั้งชั้นฟิล์มแบบไม่เผาและเผาที่ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่จำนวนพัลส์ต่างๆ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 เมื่อลากเส้นตรงสัมผัสกับกราฟ ณ จุดที่มีความชันสูงสุด ตัดลงบนแกนพลังงานโฟตอน จะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำของ TiO_2 โดยค่าแถบช่องว่างพลังงานของชั้นฟิล์มแบบไม่เผาและเผาจะแสดงค่าดังตารางที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $((\alpha)^{1/2}, (\text{cm}^{-1})^{1/2})$ และพลังงานของโฟตอน (eV) ของฟิล์มบาง TiO_2 แบบไม่เผาที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ได้จากการลากเส้นสัมผัสกับเส้นการส่งผ่านตัดแกนพลังงานของโฟตอนของฟิล์มบาง TiO_2 แบบไม่เผาที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์

Condition	Bandgap energy
non-annealing 500 pulses	3.34
non-annealing 1000 pulses	3.27
non-annealing 1500 pulses	3.28
non-annealing 2500 pulses	3.23



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน $((\alpha)^{1/2}, (\text{cm}^{-1})^{1/2})$ และพลังงานของโฟตอน(eV) ของฟิล์มบาง TiO_2 แบบเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ได้จากการลากเส้นขนานกับเส้นการส่งผ่านตัดแกนพลังงานของโฟตอนของฟิล์มบาง TiO_2 แบบเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่จำนวนพัลส์ 500, 1000, 1500, 2000 และ 2500 พัลส์

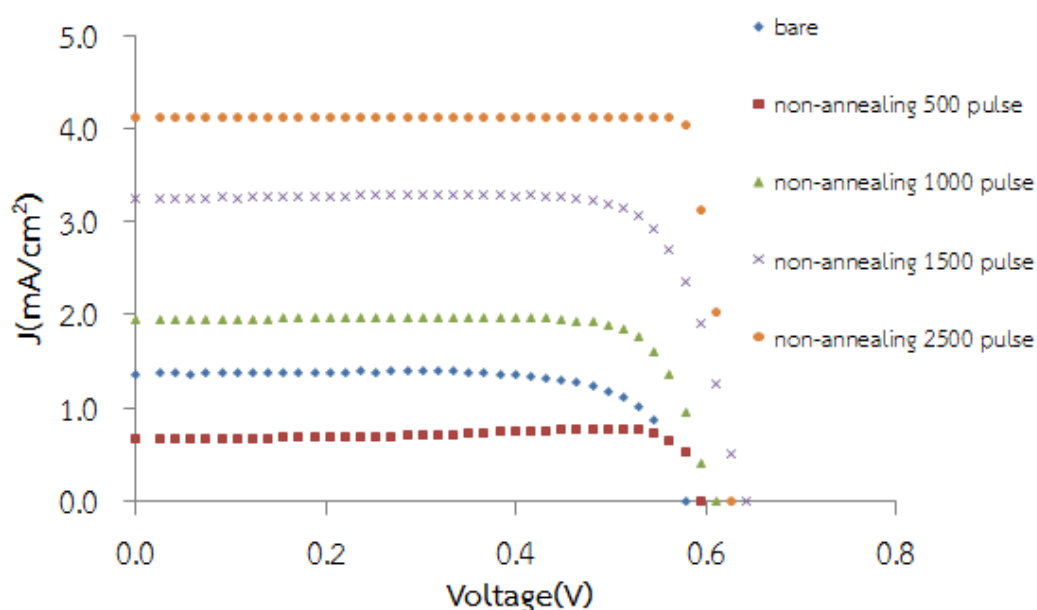
Condition	Bandgap energy
annealed-500pulse	3.49
annealed-1000pulse	3.50
annealed-1500pulse	3.48
annealed-2000pulse	3.26
annealed-2500pulse	3.35

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน(cm^{-1})กับพลังงานของโฟตอน(eV)ในกรณีเงื่อนไขฟิล์มบางไม่เผาที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ จะให้ค่าของแถบช่องว่างพลังงานเป็น 3.34 3.27 3.28 และ 3.23 eV ตามลำดับ จะเห็นความสัมพันธ์ว่าถ้าจำนวนพัลส์ที่มากขึ้นจะมีแถบช่องว่างพลังงานที่ลดลง ส่วนฟิล์มบางที่เผาอุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จำนวนพัลส์เท่ากับ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ จะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานเป็น 3.49 3.50 3.48 3.26 และ 3.35 eV ตามลำดับ ซึ่งจะไม่เห็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์กับค่าแถบช่องว่างพลังงาน

ชัดเจนเหมือนกรณีไม่เผาชั้นฟิล์ม แต่ถ้าเปรียบเทียบในเงื่อนไขจำนวนพัลส์เดียวกันของฟิล์มทั้งแบบเผาและไม่เผา พบว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มแบบเผา เช่น ที่จำนวน 500 พัลส์ กรณีไม่เผามีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.34 eV และเมื่อเผาแล้วค่าแถบช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 3.46 eV เป็นต้น

4.6 ผลของชั้นกั้น (Blocking layer; TiO_2) ต่อประสิทธิภาพของ DSSC

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะวัดภายใต้การให้แสงความเข้ม 100 mW/cm^2 โดยเซลล์มีพื้นที่การรับแสงเท่ากับ $5 \times 5 \text{ mm}^2$ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่วัดจากเซลล์ที่มีชั้นฟิล์มที่จำนวนพัลส์ต่างๆ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีชั้นฟิล์ม (bare) แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 เมื่อวิเคราะห์ J-V curve สามารถหาค่าความต่างศักย์ (V_{mp}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J_{mp}) ที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด ค่าความต่างศักย์วงจรเปิด (V_{oc}) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (J_{sc}) fill factor และประสิทธิภาพ DSSC ของชั้นฟิล์มแบบไม่เผาและเผาที่จำนวนพัลส์ต่างๆ เทียบกับในกรณีที่ไม่มีชั้นฟิล์ม (bare) แสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

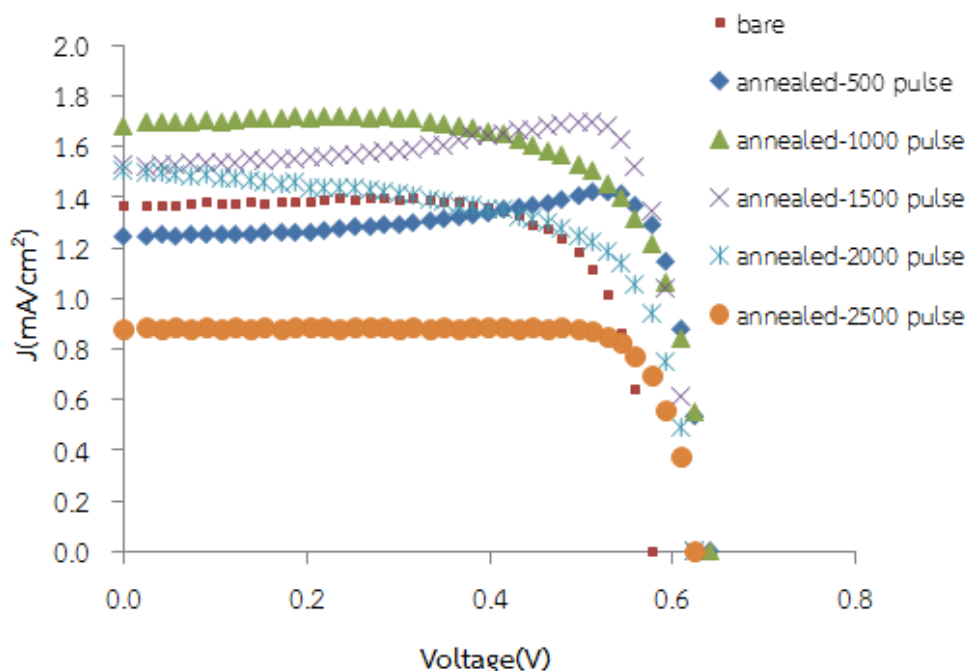


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (mA/cm^2) และ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ แบบไม่เผาใช้เป็นชั้นกั้นเปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง (bare)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด ค่าความต่างศักย์ วงจรเปิด กระแสไฟฟ้าวงจรปิด fill factor และประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ แบบไม่เผาใช้เป็นชั้นกันเปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare)

number of pulse	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF	η %
bare	0.48	1.24	0.58	1.37	0.75	0.59
Non-annealing 500 pulses	0.56	0.65	0.59	0.67	0.93	0.37
Non-annealing 1000 pulses	0.51	1.84	0.61	1.94	0.80	0.94
Non-annealing 2000 pulses	0.51	3.15	0.64	3.24	0.77	1.61
Non-annealing 2500 pulses	0.58	4.04	0.63	4.11	0.91	2.33

จากการศึกษาผลของฟิล์มบาง TiO_2 ต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DSSC พบว่า ในกรณีไม่เผาฟิล์มบาง ที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 และ 2500 พัลส์ เมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.37, 0.94, 1.61 และ 2.33% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของ DSSC มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนพัลส์ที่เพิ่มขึ้น ในเงื่อนไข 1000 1500 และ 2500 พัลส์ มีประสิทธิภาพมากกว่าในกรณีที่ไม่มีฟิล์ม(Bare film) จากรูปที่ 4.17 จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มชั้นฟิล์มบางแบบไม่เผาสามารถเพิ่มทั้งค่าความหนาแน่นกระแส วงจรปิด(J_{sc}) และค่าความต่างศักย์วงจรเปิด(V_{oc})



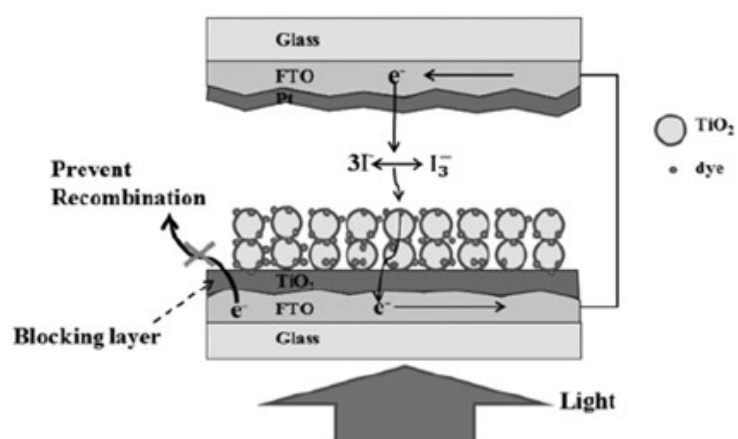
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส(mA/cm^2) และ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า(V)ที่ได้จากการวัดประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ แบบเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงใช้เป็นชั้นกันเปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare)

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จุดประสิทธิภาพสูงสุด ค่าความต่างศักย์ วงจรเปิด กระแสไฟฟ้าวงจรปิด fill factor และประสิทธิภาพ DSSC ที่มีฟิล์มบาง TiO_2 จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ แบบเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงใช้เป็นชั้นกันเปรียบเทียบกับไม่มีชั้นฟิล์มบาง(bare)

number of pulse	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	η %
bare	0.48	1.24	0.58	1.37	0.75	0.59
Annealed-500 pulses	0.59	1.14	0.64	1.24	0.84	0.67
Annealed-1000 pulses	0.53	1.45	0.64	1.68	0.71	0.77
Annealed-1500 pulses	0.58	1.34	0.63	1.53	0.81	0.77
Annealed-2000 pulses	0.51	1.22	0.63	1.50	0.67	0.63
Annealed-2500 pulses	0.53	0.85	0.63	0.88	0.82	0.45

พิจารณาในกรณีเผาฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่จำนวนพัลส์ 500 1000 1500 2000 และ 2500 พัลส์ เมื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.67, 0.77, 0.77, 0.63 และ 0.45% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของ DSSC มีค่าสูงสุดที่จำนวนพัลส์เท่ากับ 1000 และ 1500 พัลส์ เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ไม่มีฟิล์ม(bare film)จากรูปที่ 4.17 จะสังเกตได้ว่าการเพิ่มชั้นฟิล์มบางแบบเผา จะมีการเพิ่มค่าทั้งค่าความต่างศักย์วงจรเปิด(V_{oc}) และความหนาแน่นกระแสวงจรปิด(J_{sc}) เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่มีชั้นฟิล์ม แต่ในกรณีเผาชั้นฟิล์มจะมีความหนาแน่นกระแสที่น้อยกว่าในกรณีไม่เผาชั้นฟิล์ม

ผลของฟิล์มในกรณีที่ไมเผาและเผาที่ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงต่อประสิทธิภาพการทำงานของ DSSC การเพิ่มฟิล์มบางที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกันระหว่าง FTO และ mesoporous TiO_2 ในกรณีไม่เผาชั้นฟิล์ม จะมีความหนาแน่น(compact)พื้นผิวที่มากกว่าแบบเผาหรืออาจกล่าวได้ว่าการเผาชั้นฟิล์มจะทำให้เกิดการแตกออก(crack)จึงเป็นไปได้ว่าจะเป็นทางผ่านของอิเล็กตรอนทำให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนจาก FTO กับอิเล็กโตรไลต์จึงเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นกระแสลดลง ชั้นฟิล์มที่ไม่เผาแสดงลักษณะเฉพาะ(characteristic)ที่ดีสำหรับการป้องกันการรวมตัว(recombination)ที่ FTO ระหว่างอิเล็กตรอน(ที่เกิดจากการกระตุ้นของแสง)และสารจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ภาพจำลองกระบวนการรวมตัวนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงชั้นกั้นที่ป้องกันกระบวนการเกิดการรวมตัว(recombination)ของอิเล็กตรอน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ฟิล์มบางของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากกระบวนการตกตะกอนแบบคาโทดิกอาร์คเป็นฟิล์มบางไม่มีความพรุน การใช้เป็นชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจึงไม่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงได้ปรับมาใช้เป็นชั้นกั้นการรวมตัวกลับของประจุพาหะ กั้นระหว่าง FTO และ mesoporous TiO_2 จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. จำนวนพัลส์ของการอาร์คพัลส์ที่เปลี่ยนไปมีผลทำให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานเปลี่ยนไป
2. ค่าแถบช่องว่างพลังงาน
3. การเผาฟิล์มบาง

ในกรณีของฟิล์มบางที่ไม่เผา จำนวนพัลส์ที่มากขึ้นจะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานลดลง ผลที่ได้คือประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนพัลส์มากขึ้น(500-2500 พัลส์)

ในกรณีของฟิล์มบางที่เผาอุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงการเผาฟิล์มมีผลทำให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานมากขึ้น(เทียบกับการไม่เผาฟิล์ม) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพมากสุดในเงื่อนไข 1500 พัลส์

เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทดลองครั้งนี้คือเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางแบบไม่เผา เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มบางแบบเผาและไม่เผาพบว่าเงื่อนไขฟิล์มที่ไม่เผามีประสิทธิภาพเซลล์เพิ่มขึ้นเฉพาะความหนาแน่นกระแสแสงจรปิดเท่านั้น แต่เงื่อนไขไม่เผาชั้นฟิล์มจะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสแสงจรปิดและค่าความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเพิ่มฟิล์ม ดังนั้นการเพิ่มฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะมีผลต่อประสิทธิภาพของในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีชั้นกั้น

ข้อเสนอแนะ

1. กระจุก FTO ต้องมีความสะอาด ไม่มีฝุ่นละอองหรือคราบน้ำมัน เพราะจะทำให้ฟิล์มเคลือบไม่ทั่ว และจะเกิดเป็นรอยบกพร่องที่พื้นผิวฟิล์ม
2. ขั้นตอนการเตรียม paste ของ TiO_2 บน FTO เมื่อ paste แห้งแล้วจะต้องระมัดระวังไม่ให้เกิดกระทบกระเทือนมากเพราะจะทำให้เกิดการแตก(crack)ของ paste ได้
3. ขั้นตอนวัดประสิทธิภาพของเซลล์ควรมีการผนึก(sealing)ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วก่อนวัดเพราะขณะที่กำลังวัดความร้อนจากแสงอาทิตย์จำลองจะทำให้ขั้วอิเล็กโทรดในเซลล์เกิดการระเหยซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์

บรรณานุกรม

- [1] B. O'Regan, M. Gratzel, Nature 353 (1991) 737.
- [2] M. Gratzel, Nature 414 (2001) 338.
- [3] Md. K. Nazeeruddin, E. Baranoff, M. Gratzel, Sol. Energy 85 (2011) 1172.
- [4] S. Ander, A. Anders, M. Rubin, Z. Wang, S. Raoux, F. Kong, I.G. Brown, Surface and Coating Technology 76-77 (1995) 167.
- [5] A.P. Huang, Z.F. Di, Paul K. Chu., Surface & Coating Technology 201 (2007) 4897.
- [6] P.J. Martin, A. Bendavid, Thin Solid Films 518 (2010) 5078.
- [7] C. Paternoster, I. Zhirkov, M.-P. Delplancke-Ogletree, Surface & Coating Technology 227 (2013) 42.
- [8] L. Meng, C. Li, Nanoscience and Nanotechnology Letters 3 (2011) 181.
- [9] A. Nakaruk, D. Ragazzon, C.C. Sorrell, Thin Solid Films 518 (2010) 3735.
- [10] D.-J. Won, C.-H. Wang, H.-K. Jang, D.-J. Choi, Appl. Phys., A 73 (2001) 595.
- [11] D. Mardare, M. Tasca, M. Delibas, G.I. Rusu, Appl. Surf. Sci. 156 (2000) 200.
- [12] P.S. Shinde, C.H. Bhosale, J. Anal. Appl. Pyrolysis 82 (2008) 83.

ผลที่ได้จากโครงการวิจัย

1. การเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ

1.1 The 10th International Conference on the Physical Properties and Application of Advanced Materials (ICPMAT2015), 17-21 November 2015, Chiang Mai, Thailand.

1.2 The 19th International Conference on Surface Modification of Material by Ion Beam (SMMIB2015), 22-27 November 2015, Chiang Mai, Thailand.

2. การตีพิมพ์บทความวิจัย (อยู่ระหว่างรอการตอบรับตีพิมพ์)

2.1 เรื่อง Structure and Optical Properties of Anatase Thin Films Produced by Cathodic Vacuum Arc Method, เสนอวารสาร Micro & Nano Letters.

2.2 เรื่อง Effect of Titanium Dioxide Blocking Layer Deposited by Cathodic Arc Plasma on Energy Conversion Efficiency of Dye-sensitized Solar Cells, เสนอวารสาร Surface and Coating Technology.

ภาคผนวก

สถานะการส่งบทความตีพิมพ์

1). เรื่อง Structure and Optical Properties of Anatase Thin Films Produced by Cathodic Vacuum Arc Method, เสนอวารสาร Micro & Nano Letters.

← → ↻ <https://mc.manuscriptcentral.com/mnl#refX>

ScholarOne Manuscripts™ Sakon Sansongsiri Instructions & Forms Help Log Out

IET Micro & Nano Letters

Main Menu / Corresponding Author Dashboard

Dashboard

cross check
Powered by iThenticate

Manuscripts I Have Co-Authored

Manuscript ID	Manuscript Title	Date Created	Date Submitted	Status
Draft	Structure and optical properties of anatase thin films produced by filtered cathodic vacuum arc method [View Submission]	14-Feb-2016		• Draft

top

2). เรื่อง Effect of Titanium Dioxide Blocking Layer Deposited by Cathodic Arc Plasma on Energy Conversion Efficiency of Dye-sensitized Solar Cells, เสนอวารสาร Surface and Coating Technology.

← → ↻ ees.elsevier.com/surfcoat/default.asp?acw=ce-cd2320b7451e53cc122de43e5a775618ba7%7C%24%7C71AC6D095CBE28

SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY Contact us Help ? 'My EES Hub' available for consolidated users ... [more](#)

home | main menu | submit paper | guide for authors | register | change details | log out Username: sakonsa@gmail.com Switch To: Author Go to: [My EES Hub](#) Version: EES 2016

Submissions Being Processed for Author Sakon Sansongsiri, Ph.D.

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Display 10 results per page.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Status Date	Current Status
Action Links	SURFCOAT-D-15-03065	Effect of titanium dioxide blocking layer deposited by cathodic arc plasma on energy conversion efficiency of dye-sensitized solar cells	26 Dec 2015	11 Jan 2016	Under Review

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Display 10 results per page.