

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ภาคผนวก

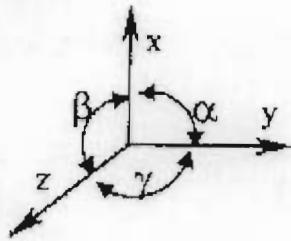
ภาคผนวก ก

การคำนวณค่าคงที่แลตทิซ (Lattice Constants) และขนาดผลึก (Crystallite Size)

การคำนวณค่าคงที่แลตทิซ (Lattice Constants)

โครงสร้างผลึก (Crystal Structure)

ในการศึกษาโครงสร้างผลึกที่เข้าใจง่ายขึ้นเราจะกำหนดแกนสมมุติและมุมขึ้นภายในรูปผลึกซึ่งมีอะตอมอยู่ตามเหลี่ยมมุมต่าง ๆ ในทิศทาง 3 มิติ (ภาพที่ ก-1 ประกอบ) โดยให้



a, b, c เป็นระยะห่างระหว่างอะตอม เรียกว่า สเปซแลตทิซ (Space lattice)

มีหน่วยเป็นแองสตรอม (Å) โดยที่ $1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m}$.

x, y, z เป็นแกนสมมุติอ้างอิงโดยมีจุดกำเนิด O (Origin) อยู่ตรงตำแหน่ง

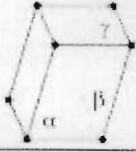
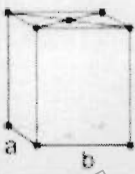
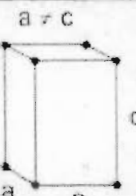
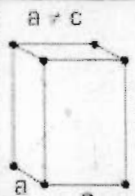
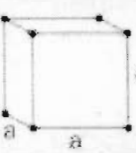
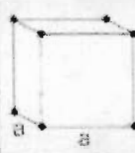
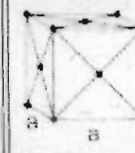
อะตอมหนึ่ง ๆ ของหน่วยเซลล์หนึ่ง เรียกว่า แลตทิซเวกเตอร์ (Lattice vector)

α, β, γ เป็นมุมที่เกิดขึ้นภายในผลึกอยู่ระหว่างแกน x, y, z

ภาพที่ ก-1 แกนสมมุติและมุมขึ้นภายในรูปผลึก

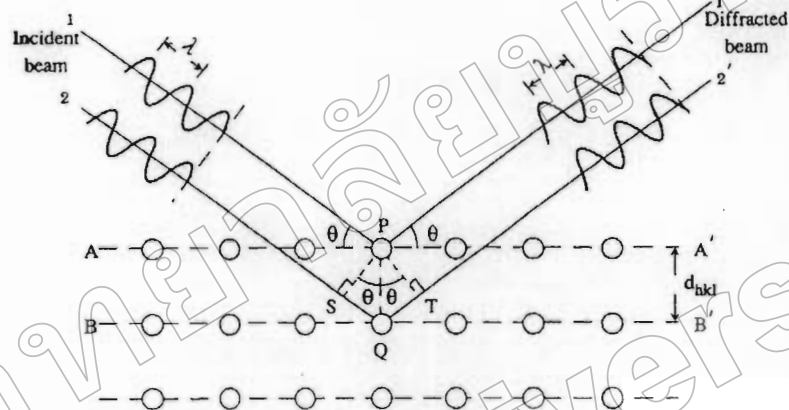
สเปซแลตทิซ (Space Lattice) มีอยู่ทั้งหมด 230 แบบด้วยกัน แต่จะสรุปลงเหลือเพียง 14 แบบใหญ่ ๆ ด้วยกันและมีรูปแบบที่สอดคล้องกับโครงสร้างระบบผลึก (Crystal structure) ได้ 7 ระบบด้วยกันคือ

1. ไตรคลินิก (Triclinic) แกนทั้ง 3 แกนยาวไม่เท่ากัน แกนทั้ง 3 แกนทำมุมไม่เท่ากัน และไม่ตั้งฉากกัน
2. โมโนคลินิก (Monoclinic) แกนทั้ง 3 แกนยาวไม่เท่ากัน มีแกน 2 แกนที่จะทำมุมตั้งฉากกัน แต่แกนที่ 3 ไม่ตั้งฉาก
3. ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) หรือ โอห์มบิก (Rhombic) แกนทั้ง 3 แกนยาวไม่เท่ากัน แต่ทุกแกนจะทำมุมตั้งฉากกันและกัน
4. เตตระโกนอล (Tetragonal) มีแกน 2 แกนยาวเท่ากันแต่อีกแกนหนึ่งจะสั้น หรือ บางกว่า แกนทั้ง 3 แกน ทำมุมตั้งฉากกันและกัน
5. รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) แกนทั้ง 3 แกนยาวเท่ากัน แกนทั้ง 3 แกน ทำมุมเท่ากัน แต่ทั้ง 3 มุมไม่เป็น 90 องศา
6. เฮกซะโกนอล (Hexagonal) มีแกน 3 แกนอยู่ในแนวระนาบ (Plane) ทำมุมภายในเท่ากับ 120 องศา ต่อกัน แกนที่ 4 ทำมุม 90 องศา กับแนวระนาบ (Plane) แกน 3 แกนแรกจะเท่ากัน แต่จะไม่เท่ากับแกนที่ 4
7. คิวบิก (Cubic) แกนทั้ง 3 แกนยาวเท่ากันและตั้งฉากซึ่งกันและกัน

ระบบผลึก	แลตทิซ			
ไตรคลินิก (triclinic)	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
โมโนคลินิก (monoclinic)	simple	centered		
	$\beta \neq 90^\circ$ 	$\beta \neq 90^\circ$ 		
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	simple	base-centered	body-centered	face-centered
	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 
เฮกซะโกนอล (hexagonal)	$a \neq c$ 			
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) (trigonal)	$\alpha, \beta, \gamma \neq 90^\circ$ 			
เตตระโกนอล (tetragonal)	simple	body-centered		
	$a \neq c$ 	$a \neq c$ 		
คิวบิก (isometric)	simple	body-centered	face-centered	
				

โดยปกติแล้วเซอร์โคเนียมออกไซด์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก
เตตระโกนอล คิวบิก และ ออสันฐาน ในงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วย
ระบบ รีแอคทีฟ ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก

กฎของแบรกก์ (Bragg's law)



ภาพที่ ก-2 แบบจำลองการเรียงตัวของอะตอม

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

(ก-1)

เมื่อ d_{hkl} เป็นระยะห่างระหว่างระนาบผลึก ($h k l$)

θ เป็นมุมตกกระทบและมุมสะท้อน เมื่อวัดจากแนวระนาบ (ในหน่วย radians)

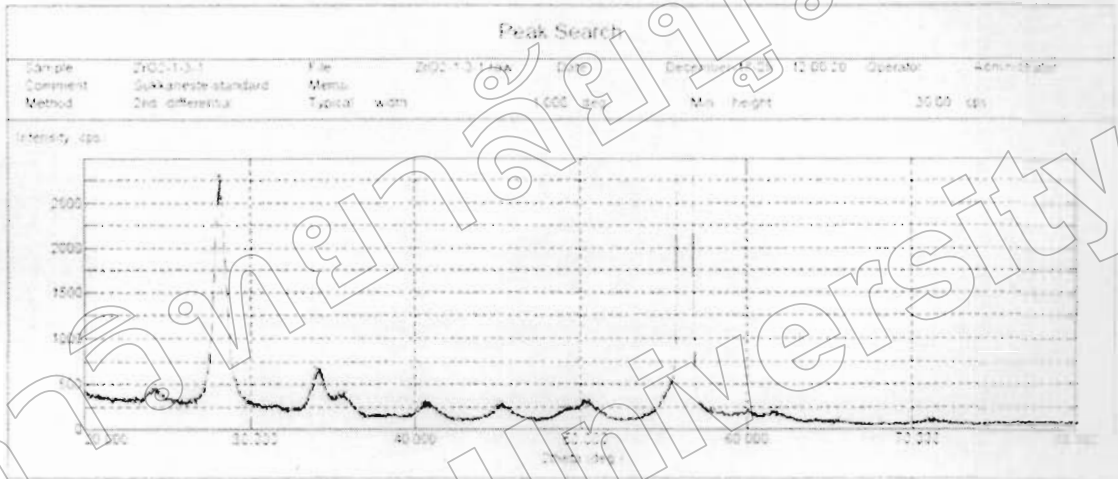
n ลำดับการสะท้อน

λ ความยาวคลื่น ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)

สูตรคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบในระบบผลึกแบบโมโนคลินิก

monoclinic; $\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right)$ (ก-2)

ตัวอย่าง ก-1 การคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) ที่ระนาบต่าง ๆ



ภาพที่ ก-3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

ตารางที่ ก-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

No.	2 Theta	Intensity	h k l	d-spacing
1	24.140	432	0 1 1	3.6823
2	28.140	2810	$\bar{1}$ 1 1	3.1673
3	34.060	657	0 0 2	2.6291
4	35.540	378	$\bar{1}$ 0 2	2.5230
5	50.280	293	$\bar{1}$ 2 2	1.8125

1. หาระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่ระนาบต่าง ๆ

กำหนด $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$; มุม θ หน่วยเป็น เรเดียน

แทนค่ามุม θ ในหน่วยเรเดียนในสมการที่ ก-1 จะได้ d -spacing ที่ระนาบต่าง ๆ ดังนี้

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (\text{ก-1})$$

$$\text{ที่ } m(011); \quad d_{hkl} = 3.6823$$

$$\text{ที่ } m(\bar{1}11); \quad d_{hkl} = 3.1673$$

$$\text{ที่ } m(002); \quad d_{hkl} = 2.6291$$

$$\text{ที่ } m(\bar{1}02); \quad d_{hkl} = 2.5230$$

2. หาค่าคงที่ (Lattice Constant)

$$\text{monoclinic; } \frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right)$$

$$\text{ที่ } m(011); \quad \frac{1}{(3.6823)^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{(0)^2}{a^2} + \frac{(1)^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{(1)^2}{c^2} - \frac{2(0)(1) \cos \beta}{ac} \right)$$

$$0.0737 = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{\sin^2 \beta}{b^2} + \frac{1}{c^2} \right)$$

$$0.0737 = \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2 \sin^2 \beta} \quad (\text{ก-1})$$

$$\frac{1}{(3.1673)^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{(-1)^2}{a^2} + \frac{(1)^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{(1)^2}{c^2} - \frac{2(-1)(1)\cos \beta}{ac} \right)$$

$$0.0997 = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{\sin^2 \beta}{b^2} + \frac{1}{c^2} + \frac{2 \cos \beta}{ac} \right)$$

$$0.0997 = \frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2 \sin^2 \beta} + \frac{2 \cos \beta}{ac \sin^2 \beta} \quad (\text{ก-2})$$

$$\frac{1}{(2.6291)^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{(0)^2}{a^2} + \frac{(0)^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{(2)^2}{c^2} - \frac{2(0)(2)\cos \beta}{ac} \right)$$

$$0.1447 = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{4}{c^2} \right)$$

$$\frac{4}{c^2 \sin^2 \beta} = 0.1447$$

$$\frac{1}{c^2 \sin^2 \beta} = \frac{0.1447}{4}$$

$$\frac{1}{c^2 \sin^2 \beta} = 0.0362 \quad (\text{ก-3})$$

$$\frac{1}{\sin^2 \beta} = 0.0362 c^2 \quad (\text{ก-4})$$

แทนสมการ ก-3 ลงในสมการที่ ก-1 จะได้

$$0.0737 = \frac{1}{b^2} + 0.0362$$

$$\frac{1}{b^2} = 0.0737 - 0.0362$$

$$\frac{1}{b^2} = 0.0375$$

$$b^2 = \frac{1}{0.0375} = 26.67$$

$$\therefore b = 5.164 \text{ \AA}$$

ที่ $m(102)$; $\frac{1}{(2.5230)^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{(-1)^2}{a^2} + \frac{(0)^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{(2)^2}{c^2} - \frac{2(-1)(2)\cos \beta}{ac} \right)$

$$0.1571 = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{4}{c^2} + \frac{4\cos \beta}{ac} \right)$$

$$0.1571 = \frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{4}{c^2 \sin^2 \beta} + \frac{4\cos \beta}{ac \sin^2 \beta} \quad (\text{ก-5})$$

แทน $\frac{1}{b^2} = 0.0375$ ลงในสมการที่ ก-2 จะได้

$$0.0997 = \frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} + 0.0375 + \frac{1}{c^2 \sin^2 \beta} + \frac{2\cos \beta}{ac \sin^2 \beta}$$

$$0.0622 = \frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} + \frac{1}{c^2 \sin^2 \beta} + \frac{2\cos \beta}{ac \sin^2 \beta} \quad (\text{ก-6})$$

นำ (ก-5) - (ก-6) จะได้

$$0.0949 = \frac{3}{c^2 \sin^2 \beta} + \frac{2 \cos \beta}{ac \sin^2 \beta} \quad (\text{ก-7})$$

แทนสมการ ก-3 ลงในสมการที่ ก-7 จะได้

$$0.0949 = 3(0.0362) + \frac{2 \cos \beta}{ac \sin^2 \beta}$$

$$0.0949 = 0.1086 + \frac{2 \cos \beta}{ac \sin^2 \beta}$$

$$\frac{2 \cos \beta}{ac \sin^2 \beta} = 0.0949 - 0.1086$$

$$\frac{2 \cos \beta}{ac \sin^2 \beta} = -0.0137 \quad (\text{ก-8})$$

แทนสมการ ก-3 และ ก-8 ลงในสมการที่ ก-6 จะได้

$$0.0622 = \frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} + 0.0362 - 0.0137$$

$$\frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} = 0.0622 - 0.0362 + 0.0137$$

$$\frac{1}{a^2 \sin^2 \beta} = 0.0397$$

$$\frac{1}{\sin^2 \beta} = 0.0397 a^2 \quad (\text{ก-9})$$

$$(ก-9) = (ก-4); \quad 0.0397 a^2 = 0.0362 c^2$$

$$a^2 = \frac{0.0362 c^2}{0.0397} = 0.912 c^2$$

$$a = 0.955 c \quad (ก-10)$$

แทนสมการ ก-10 ลงในสมการที่ ก-8 จะได้

$$\frac{2 \cos \beta}{(0.955 c) c \sin^2 \beta} = -0.0137$$

$$\frac{2 \cos \beta}{0.955 c^2 \sin^2 \beta} = -0.0137$$

$$\frac{2.094 \cos \beta}{c^2 \sin^2 \beta} = -0.0137 \quad (ก-11)$$

แทนสมการ ก-3 ลงในสมการที่ ก-11 จะได้

$$2.094 \cos \beta (0.0362) = -0.0137$$

$$0.076 \cos \beta = -0.0137$$

$$\cos \beta = \frac{-0.0137}{0.076}$$

$$\cos \beta = -0.18$$

$$\therefore \beta = \cos^{-1}(-0.18) = 1.752 \text{ เรเดียน}$$

$$\sin \beta = 0.984$$

$$\sin^2 \beta = 0.968 \quad (\text{ก-12})$$

แทนสมการ ก-12 ลงในสมการที่ ก-3 จะได้

$$\frac{1}{c^2(0.968)} = 0.0362$$

$$c^2 = \frac{1}{(0.0362)(0.968)} = 28.538$$

$$\therefore c = 5.342 \text{ \AA}$$

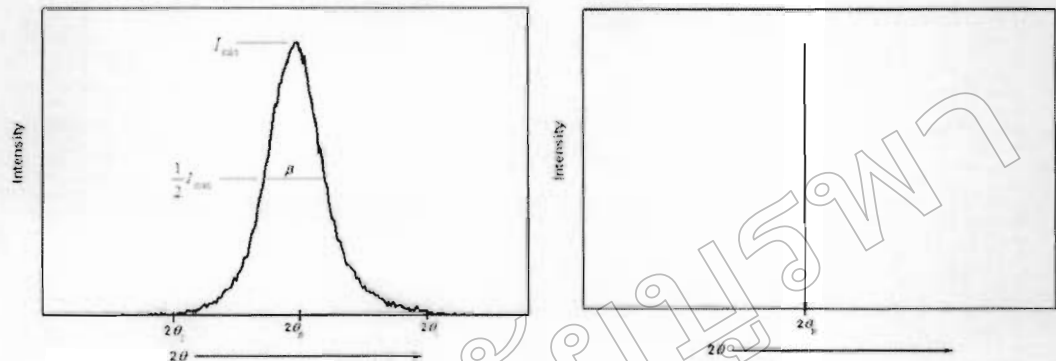
แทน c ในสมการ ก-10 จะได้

$$a = 0.955 c$$

$$a = 0.955(5.342)$$

$$\therefore a = 5.102 \text{ \AA}$$

การคำนวณหาขนาดผลึก (Crystallite size)



ภาพที่ ก-4 Effect of crystallite size on diffraction curves (schematic)(Cullity, 1978)

Scherrer Equation

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta_\beta} \quad (\text{ก-13})$$

เมื่อ L คือ ขนาดของผลึกฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์ หน่วย นาโนเมตร (nm)

k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.9

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ($\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)

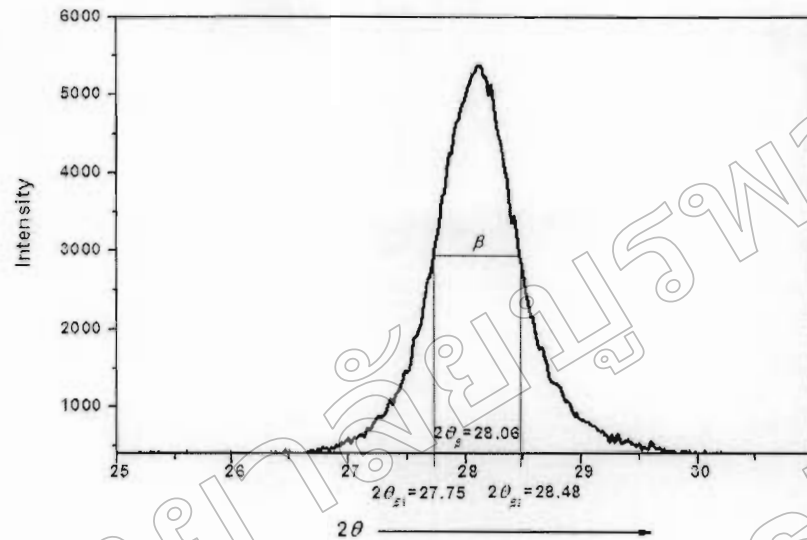
θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมตรงจุดศูนย์กลางฟัด หน่วย เรเดียน

β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของฟัดที่มีค่าความเข้มสูงสุด

(Full width at half maximum; FWHM) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ก-14

$$\beta = \frac{2\theta_{\beta 2} - 2\theta_{\beta 1}}{2} \quad (\text{ก-14})$$

ตัวอย่าง ก-2 การคำนวณขนาดผลึก



ภาพที่ ก-5 การหาความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่มีค่าความเข้มสูงสุด

วิธีคำนวณ หาค่า β จากสมการ ก-14

$$\beta = \frac{2\theta_{\beta 2} - 2\theta_{\beta 1}}{2}$$

$$\beta = \frac{28.48 - 27.75}{2} = 0.006 \text{ เรเดียน}$$

นำค่า β แทนในสมการ ก-13 จะได้

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta_{\beta}} ; \cos \theta_{\beta} = 0.97 \text{ เรเดียน}$$

$$L = \frac{(0.9)(0.15406 \text{ nm})}{(0.006)(0.97)} = 20.46 \text{ nm}$$

ดังนั้น ผลึกมีขนาดเท่ากับ 20.46 nm

ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เรื่องเฉลิมฉลองพระมหากษัตริย์ ครั้นที่ ๔๙ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

The Proceeding of 49th Kasetsart University Annual Conference

มหิตพระเกียรติ ๘๔ พรรษา กับ เศรษฐกิจ การเกษตร

Celebrating His Majesty the King's 7th Cycle Birthday and Expressing
Our Humble Gratitude Towards His Royal Support for Agricultural Economics



เล่มที่ 5 วิทยาศาสตร์ (Subject: Science)

ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของ
ฟิล์มบางเซอร์โคเนียออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปดเตอริง

Effect of O_2 Gas Flow Rate on Structure and Optical Properties of
 ZrO_2 Thin Film Deposited by DC Reactive Magnetron Sputtering

จินดาวรรณ ธรรมปรีชา^{1,2}, นิรันดร์ วัฒนานันท์^{1,2} และ สุรสิงห์ ไชยคุณ^{1,2}
Jindawan Thammapreecha^{1,2}, Nirun Wilai-anun^{1,2} and Surasing Chaiyakun^{1,2}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เคลือบฟิล์มบางเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) บนกระจกและแผ่นซิลิคอน ด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเปดเตอริง เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของฟิล์ม แล้วนำฟิล์มที่เคลือบได้วิเคราะห์ด้วย XRD, AFM และสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มที่เคลือบได้มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ความหนาแน่น 328 nm ถึง 458 nm ความหนาแน่น (R_a) ในช่วง 3.1 nm ถึง 4.4 nm ฟิล์มที่เคลือบได้มีค่าการส่งผ่านแสงสูงตลอดช่วงความมองเห็นและอินฟราเรดใกล้ โดยที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm มีค่าดัชนีหักเห (n) ประมาณ 2.0 และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) อยู่ในช่วง 0.0007 ถึง 0.0021 ส่วนค่าแถบพลังงาน (E_g) มีค่าประมาณ 4.18 eV

Abstract

Zirconium oxide (ZrO_2) thin films were deposited on glass slides and silicon wafer by DC reactive magnetron sputtering method. The effect of oxygen gas flow rates on crystalline structure and optical properties of the films were investigated. The films were characterized by XRD, AFM and spectrophotometer. The results show that the ZrO_2 films were monoclinic crystalline structure. The films thickness range was from 328 nm to 458 nm and surface roughness (R_a) was within 3.1 nm to 4.4 nm. The films showed high transmittance in visible and near-IR range. The wavelength was 550 nm with refractive index (n) of approximately 2.0 and extinction coefficient (k) ranging from of 0.0007 to 0.0021. In addition, energy band gap (E_g) was approximately 4.18 eV.

Keyword : Zirconium oxide thin film, reactive sputtering, optical constants, Swanepoel method

Email : eang_jig@hotmail.com

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี 20131

Department of Physics, Burapha University, Chonburi 20131

*ห้องปฏิบัติการวิจัยพลาสมาสำหรับวิทยาศาสตร์พื้นผิว ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์

สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

โทรศัพท์: 036-103-084 โทรสาร: 036-103-084

Plasma for Surface Sciences Laboratory, Thailand Center of Excellence in Physics

Science and Technology Postgraduate Education and Research Development Office (PERDO), CHE

Tel: 036-103-084 Fax: 036-103-084

คำนำ

ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางระดับนาโนกำลังได้รับความสนใจอย่างมากจากกลุ่มนักวิจัยทั่วโลก ในขณะเดียวกันที่ผ่านมาพบว่าการศึกษาริวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มเซอโคเนียมออกไซด์ในระดับสูงทั้งด้านความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในฟิล์มที่ใช้สมบัติด้านแสงและอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้ฟิล์มบางเซอโคเนียมออกไซด์ เป็นฟิล์มที่มีสมบัติน่าสนใจหลายประการ เช่น มีค่าดัชนีหักเหสูง (High refractive index) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าแถบพลังงานกว้าง (Large optical band gap) การสูญเสียทางแสงต่ำ (Low optical loss) ที่สำคัญเห็นพ้องตรงกันว่าไม่สูง ทำให้ส่งผ่านแสงได้ดีทั้งในช่วงตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้ การดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตถึงอินฟราเรดต่ำ จากสมบัติดังกล่าวทำให้มีการนำฟิล์มเซอโคเนียมออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ใช้ทำกระจกสะท้อนแสงสูง (High-reflectivity mirrors) ฟิลเตอร์แสงชนิดแทรกสอดแบบช่วงกว้าง (Broadband interference filters) รวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อแสง เป็นต้น

ปกติเซอโคเนียมออกไซด์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกแบบ โมโนคลินิก (Monoclinic) เตตระโกนอล (Tetragonal) คิวบิก (Cubic) และ อมอร์ฟัส (Amorphous) ทั้งนี้การเตรียมฟิล์มเซอโคเนียมออกไซด์สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) อาร์เอฟ สเปดเตอริง (RF sputtering) ดีซี สเปดเตอริง (DC sputtering) พัลส์ เลเซอร์ (Pulsed laser deposition) และโซลเจล (Sol-gel) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคสเปดเตอริง มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีอื่น คือ สามารถควบคุมอัตราเคลือบและสมบัติของฟิล์มได้ง่าย (Zhao *et al.*, 2005) ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพและการยึดเกาะดี (Wu *et al.*, 2006) อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ไปสู่การเคลือบชิ้นงานขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมได้ง่ายอีกด้วย

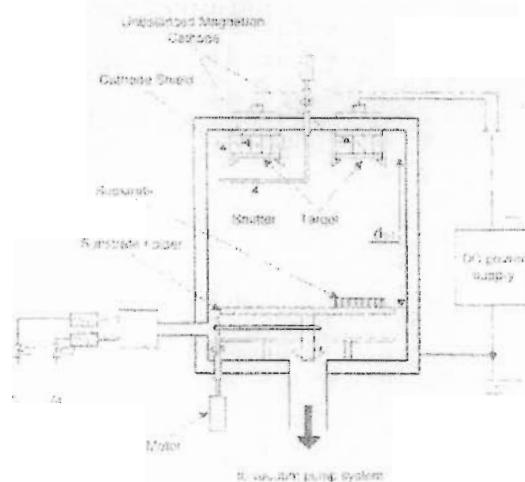
โดยทั่วไปโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้ขึ้นกับเทคนิคและเงื่อนไขการเคลือบ ทั้งนี้ฟิล์มบางเซอโคเนียมออกไซด์มีนักวิจัยหลายกลุ่มศึกษาเงื่อนไขการเคลือบที่มีต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติของฟิล์ม เช่น Choi *et al.* (2005) เตรียมฟิล์มบางเซอโคเนียมออกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอฟ แมกนีตรอน สเปดเตอริง พบว่าเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้นฟิล์มที่เคลือบได้มีพื้นผิวเรียบขึ้น ขณะที่ Zhao *et al.* (2006) เตรียมฟิล์มบางเซอโคเนียมออกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอฟ รีแอกทีฟ สเปดเตอริง พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ระบาย (111) มีความเป็นผลึกสูง ภายใต้เงื่อนไขเบส และให้ความไวของกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิสูง แต่พบโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลบนกระจกภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเพิ่มขึ้นภายหลังการอบร้อน ทั้งนี้เห็นว่างานวิจัยส่วนใหญ่ใช้เทคนิค อาร์เอฟ สเปดเตอริง ในการเตรียมฟิล์ม แต่เทคนิคนี้ก็มีข้อเสียด้านอัตราเคลือบค่อนข้างต่ำ บทความวิจัยนี้เป็นการรายงานการศึกษาลักษณะของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของฟิล์มเซอโคเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี ดีซี รีแอกทีฟ แมกนีตรอน สเปดเตอริง สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ออกไซด์ในงานวิจัยนี้เตรียมด้วยวิธี สเป็คโตรอิเล็กโตรอน สเตปเตอริง จากเครื่องเคลือบสุญญากาศระบบสเป็คโตรอิเล็กโตรอน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีห้องเคลือบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 310.0 mm สูง 370.0 mm โดยติดเป้าเซมิคอนดักเตอร์ (99.97%) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54.0 mm ที่ตำแหน่งหัวฉีดภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ใช้แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) และแก๊สออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นแก๊สสเป็คโตรอิเล็กโตรอนและแก๊สไปฏิกิริยาตามลำดับ โดยระบบเครื่องสุญญากาศของเครื่องเคลือบประกอบด้วยเครื่องสูบลมแบบแฟรไอและมีเครื่องสูบลมโรตารีเป็นเครื่องสูบลมช่วย สำหรับความดันภายในห้องเคลือบวัดด้วยมาตรวัดความดัน ของ balzers รุ่น TPG300 พร้อมหัววัดพีเอจรุ่น TPR010 และหัววัดเพนนิ่งรุ่น IKR050 การจ่ายแก๊สที่เน้นกระบวนการเคลือบผ่านชุดควบคุมการไหลมวล (mass-flow-controller) ของ MKS (type247D) ก่อนเคลือบทุกครั้งจะทำความสะอาดหน้าเป้าสารเคลือบ โดยวิธีการสเป็คโตรอิเล็กโตรอน (pre-sputtering) ประมาณ 3 นาที โดยปิดแผ่นบัง (shutter) ที่ตั้งขวางหน้าเป้าสารเคลือบกับแท่งวางชิ้นงาน

ขั้นตอนการเคลือบเริ่มจากนำกระจกใส และแผ่นฟิล์มกั้น เข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ จัดให้หน้าเป้าสารเคลือบเท่ากับ 8 cm ลดความดันในห้องเคลือบให้ได้ความดันพื้นที่เท่ากับ 5.0×10^{-5} mbar แล้วปล่อยแก๊สเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ โดยกำหนดให้แก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 1 sccm และแปรค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 2 sccm, 4 sccm, 6 sccm โดยควบคุมความดันรวมขณะเคลือบในห้องที่เท่ากับ 5×10^{-5} mbar ใช้กำลังไฟฟ้าขณะเคลือบคงที่เท่ากับ 180 W นาน 2 ชั่วโมง

ฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ออกไซด์ที่เคลือบได้ทั้งหมดจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer; XRD) ตรวจวัดแบบ 2 θ -scan ด้วยมุมตกกระทบเงี่ยง (Glazing incident angle) คงที่เท่ากับ 3° โดยสแกน 2 θ จาก 2 θ ถึง 65° ศึกษาลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มด้วยเครื่องอะตอมมิกฟอร์ซไมโครสโคป (Atomic Force Microscope; AFM) และวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณค่าดัชนีหักเห (n) ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ (k) ด้วยวิธีของ Swanepoel (1983) จากค่าการส่งผ่านแสง

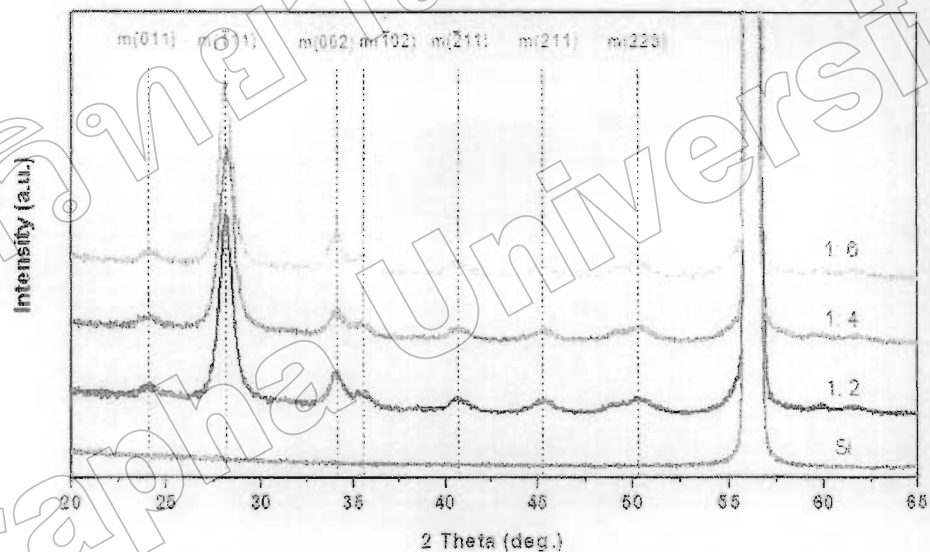


รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องเคลือบในสุญญากาศระบบ สเป็คโตรอิเล็กโตรอน สเตปเตอริง

ผลการวิจัยและวิจารณ์

โครงสร้างผลึกของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์

รูปที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์เมื่อใช้อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ พบว่าฟิล์มที่เคลือบได้ทั้งหมดมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เหมือนกันทุกประการ โดยพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 24.05° , 28.17° , 34.14° , 35.88° , 40.70° , 45.49° และ 50.09° จึงตรงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบเซอร์โคเนียมออกไซด์ตามมาตรฐาน JCPDS (เลขที่ 76-1807) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ระนาบ (011), $(\bar{1}11)$, (002), $(\bar{1}02)$, $(\bar{2}11)$, (211) และ (220) ตามลำดับ โดยที่มุม 28.17° มีความเข้มของพีคสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao *et al.* (2008) ซึ่งพบว่าฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นซิลิกอนมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ระนาบ $(\bar{1}11)$ ที่มีความเป็นผลึกสูง ส่วนรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 56.5° เป็นระนาบซิลิกอน ที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ



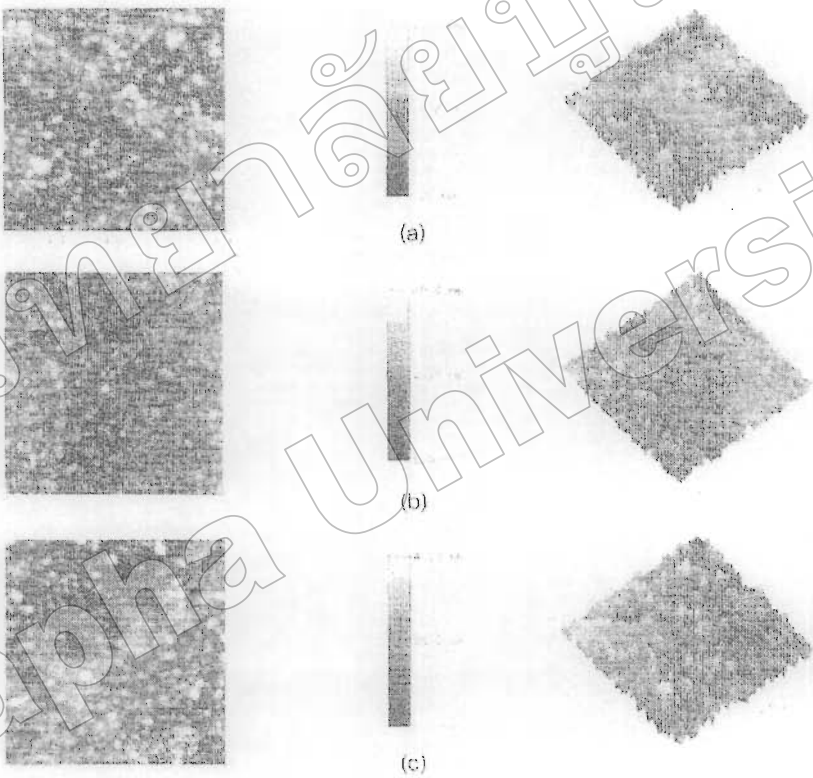
รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ

ลักษณะพื้นผิว และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์

รูปที่ 3 แสดงลักษณะพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ของฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์เคลือบที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ จากเทคนิค AFM พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะเป็นแท่งปลายแหลม เล็ก มีขนาดไม่เท่ากันกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของฟิล์มเช่นเดียวกันทุกเงื่อนไข สำหรับความหนา และความหยาบผิวของฟิล์มพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สออกซิเจนจาก 2 sccm เป็น 4 sccm (เมื่ออัตราไหลแก๊สอาร์กอนคงที่เท่ากับ 1 sccm) ฟิล์มที่เคลือบได้มีความหนา และความหยาบผิวลดลง และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราไหลแก๊สออกซิเจนเพิ่มเป็น 6 sccm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choi *et al.* (2005) (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ความหนาและความหยาบผิวของฟิล์มเซอโรโคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ

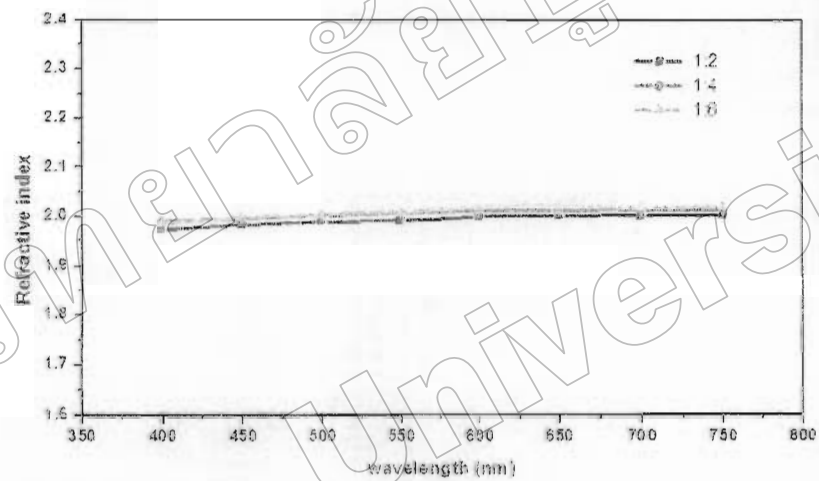
อัตราไหลแก๊สอาร์กอนแก๊สออกซิเจน (sccm)	ความหนา (nm)	ความหยาบผิว (nm)
1 : 2	458	4.4
1 : 4	328	3.1
1 : 6	376	4.3



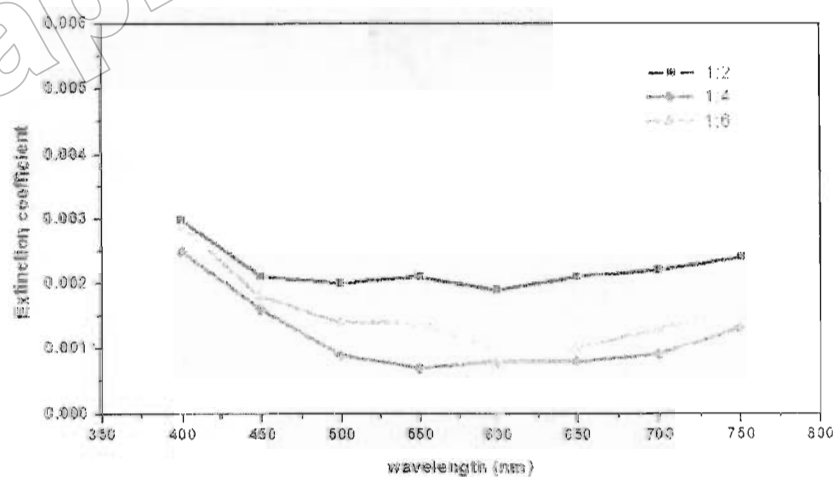
รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวจากเทคนิค AFM ของฟิล์มเซอโรโคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ
(a) 1:2, (b) 1:4, (c) 1:6.

สมบัติทางแสงและค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมออกไซด์

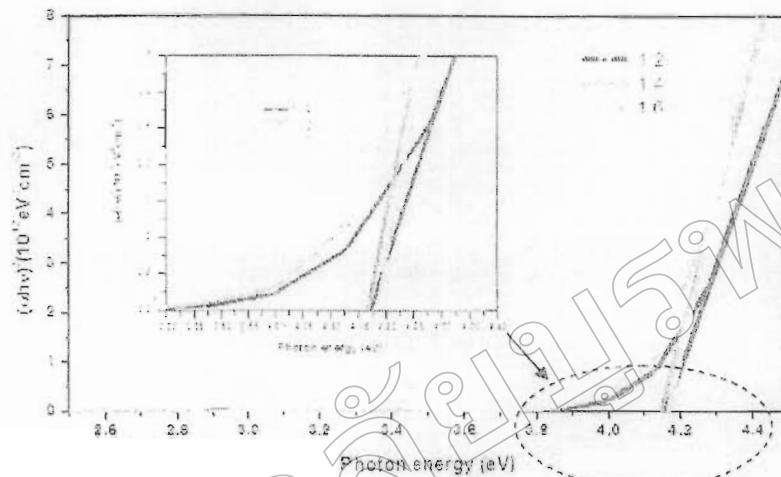
ฟิล์มเซอริโคเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีค่าการส่งผ่านแสงสูงทั้งในช่วงตามองเห็นและอินฟราเรดใกล้ สำหรับค่าดัชนีหักเห (n) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) หาได้จากวิธี Swanepoel โดยใช้ข้อมูลจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงมาคำนวณ พบว่าที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm ฟิล์มเซอริโคเนียมออกไซด์ที่เคลือบได้มีค่าดัชนีหักเห (n) ประมาณ 2.0 สำหรับทุกค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สออกซิเจนจาก 2 sccm เป็น 4 sccm ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) ลดจาก 0.0021 เป็น 0.0007 แต่เมื่อเพิ่มอัตราไหลแก๊สออกซิเจนเป็น 6 sccm ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (k) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.0014



รูปที่ 4 ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ



รูปที่ 5 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มเซอริโคเนียมออกไซด์ที่อัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่างๆ



รูปที่ 6 แสดงค่าแถบพลังงานของฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไฮโดรเจนออกไซด์

รูปที่ 6 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางเซมิคอนดักเตอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไฮโดรเจนออกไซด์ ซึ่งคำนวณได้จาก $\alpha_{ph} = A \sqrt{h\nu - E_g}$ เมื่อ $p = 2$ (direct optical band gap) (Illenik and Jansen, 1991) พบว่า แถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไฮโดรเจนออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ค่าประมาณ 4.18 eV สำหรับทุกค่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไฮโดรเจนออกไซด์ ซึ่งได้ผลดังนี้ พบว่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจนมีผลต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไฮโดรเจนออกไซด์ โดยพบว่าอัตราไหลแก๊สออกซิเจน มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกทุกเงื่อนไขการเคลือบ ด้วยค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มเซมิคอนดักเตอร์ชนิดทรานซิสเตอร์ไฮโดรเจนออกไซด์ ที่ความยาวคลื่นแสง 550 nm ซึ่งแสดงด้วยค่าดัชนีหักเห (n) ประมาณ 2.0 และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) อยู่ในช่วง 0.0007 ถึง 0.0021 ส่วนค่าแถบพลังงาน (E_g) มีค่าประมาณ 4.18 eV

เอกสารอ้างอิง

- Choi, H.S., K.S. Seol, D.Y. Kim, J.S. Kwak, C.S. Son and I.H. Choi. 2005. Thermal treatment effects on interfacial layer formation between ZrO_2 thin films and Si substrates. *Vacuum* 80: 310-316.
- Henri, J. and F. Jansen. 1991. Electronic structure of cubic and tetragonal zirconia. *Physical Review B* 43: 7267-7278.
- Swanepool, R. 1983. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. *Journal of Physics E* 16: 1214-1222.
- Wu, K.R., J.J. Wang, W.C. Liu, Z.S. Chen and J.K. Wu. 2006. Deposition of Graded TiO_2 films Featured both Hydrophobic and Photo-Induced Hydrophilic Properties. *Applied Surface Science* 255: 5829-5838.
- Zhao, S., F. Ma, K.W. Xu and H.F. Liang. 2008. Optical properties and structural characterization of bias sputtered ZrO_2 films. *Journal of Alloys and Compounds* 453: 453-457.
- Zhao, X.T., K. Sakka, N. Kihara, Y. Takada, M. Arita and M. Masuda. 2005. Structure and Photo-Induced Features of TiO_2 Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering. *Microelectronics Journal* 36: 549-551.



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

ผลของอัตราไหลแก๊สออกซิเจนต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง
เซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยวิธี ดีซี รีแอคทีฟ แมกนีตรอน สเป็คเตอริง

โดย

จินดาวรรณ ธรรมปรีชา นรินทร์ วิทิตอนันต์
และสุรสิงห์ ไชยคุณ

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาวิทยาศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49
ระหว่างวันที่ 1 - 4 กุมภาพันธ์ 2554

(รองศาสตราจารย์ ดร.พนิต เข้มทอง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 49

ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาวิทยาศาสตร์

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์			
1. อรุณรัตน์ สิริวัฒน์	2. นันทชัย เปส	3. ภรณ์ทิพย์ คงสาคร	
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์			
4. พงษ์ภรณ์ สุวรรณภูมิ	5. มาลีสา อธิปัตย์	6. จิตตา นิตย	7. วิภาดา นันสุวรรณ
8. สรจิต สงวนกิจ	9. อรุณรัตน์ เจริญถาวร	10. อรุณรัตน์ วรวิทย์	11. อังกร วาณิชสุวัฒน์
12. อธิวัฒน์ การณ์เกิด	13. ศิรินันท์ เจริญศักดิ์	14. อ. อ. ปณิภากรภัทร	15. นันทน คุณแสง
16. วิริยญา แก้ววิลานะ	17. ชลธิชา นุ่นหอม	18. วรากรณ์ พราหมณ์	19. พัชรกรรณ์ ศานติวัฒนา
20. ปุณณภรณ์ สุทธิพิทักษ์	21. เทวฤทธิ์ บุญสวัสดิ์สง		
ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์			
22. การณ์ทิพย์ ดวงมณี	23. ทวีป ตุ่มแก้ว	24. นันทนา นิตย	25. ปุณณภรณ์ อรรถนันท
26. ปุณณภรณ์ อรรถนันท	27. ปุณณภรณ์ ศิริโรจน์	28. ปุณณภรณ์ หวัง	29. ศิริ อรรถนันท
30. เมธนาภา อภิรักษ์	31. วิเชียร กิจปัทมา	32. วรากรณ์ มาลาพันธ์	33. สุภาวดี ศนธิ์นันทน
34. สรวิทย์ กิมมิ่ง	35. อรุณรัตน์ หวังเกษม	36. เจษฎา ไชยรัตน์	37. เทวฤทธิ์ จุลลนันท
38. สุภาวดี สุทธิพิทักษ์	39. เทวฤทธิ์ เจริญถาวร		
ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์			
40. อรุณรัตน์ พรหมภูมิ	41. ปุณณภรณ์ คงเสถียร	42. วิภาดา นันสุวรรณ	43. อรุณรัตน์ ปุณณภรณ์
44. นันทชัย บุญภูมิ	45. สุภาวดี รัตนกิจ	46. อรุณรัตน์ นันสุวรรณ	47. ราชนิ วงศ์ปัญญา
48. ศุภณัฐ อรรถนันท			
ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์			
49. ศนธิ์นันท	50. ปุณณภรณ์ เก่งมณี	51. ศิริ อรรถนันท	52. เสาวนีย์ สารวัตร
53. นันทชัย เสาวนีย์	54. สุภาวดี นันสุวรรณ		
ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์			
55. อรุณรัตน์ อธิปัตย์	56. อรุณรัตน์ นันสุวรรณ	57. ปุณณภรณ์ แสงทอง	58. อรุณรัตน์ อธิปัตย์
59. อรุณรัตน์ อธิปัตย์	60. อรุณรัตน์ นันสุวรรณ	61. เสาวนีย์ นันสุวรรณ	62. อรุณรัตน์ อธิปัตย์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์			
63. พงษ์ภรณ์ อธิปัตย์	64. อธิปัตย์ อธิปัตย์	65. อธิปัตย์ อธิปัตย์	66. อธิปัตย์ อธิปัตย์
67. อธิปัตย์ อธิปัตย์	68. อธิปัตย์ อธิปัตย์	69. อธิปัตย์ อธิปัตย์	70. อธิปัตย์ อธิปัตย์
71. อธิปัตย์ อธิปัตย์	72. อธิปัตย์ อธิปัตย์	73. อธิปัตย์ อธิปัตย์	74. อธิปัตย์ อธิปัตย์
75. อธิปัตย์ อธิปัตย์	76. อธิปัตย์ อธิปัตย์	77. อธิปัตย์ อธิปัตย์	78. อธิปัตย์ อธิปัตย์
79. อธิปัตย์ อธิปัตย์	80. อธิปัตย์ อธิปัตย์	81. อธิปัตย์ อธิปัตย์	82. อธิปัตย์ อธิปัตย์
83. อธิปัตย์ อธิปัตย์	84. อธิปัตย์ อธิปัตย์		
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์			
85. อธิปัตย์ อธิปัตย์	86. อธิปัตย์ อธิปัตย์	87. อธิปัตย์ อธิปัตย์	88. อธิปัตย์ อธิปัตย์
ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์			
89. อธิปัตย์ อธิปัตย์	90. อธิปัตย์ อธิปัตย์	91. อธิปัตย์ อธิปัตย์	92. อธิปัตย์ อธิปัตย์
93. อธิปัตย์ อธิปัตย์	94. อธิปัตย์ อธิปัตย์	95. อธิปัตย์ อธิปัตย์	96. อธิปัตย์ อธิปัตย์
97. อธิปัตย์ อธิปัตย์	98. อธิปัตย์ อธิปัตย์	99. อธิปัตย์ อธิปัตย์	100. อธิปัตย์ อธิปัตย์
101. อธิปัตย์ อธิปัตย์	102. อธิปัตย์ อธิปัตย์	103. อธิปัตย์ อธิปัตย์	104. อธิปัตย์ อธิปัตย์
105. อธิปัตย์ อธิปัตย์	106. อธิปัตย์ อธิปัตย์		
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์			
107. อธิปัตย์ อธิปัตย์	108. อธิปัตย์ อธิปัตย์	109. อธิปัตย์ อธิปัตย์	110. อธิปัตย์ อธิปัตย์
111. อธิปัตย์ อธิปัตย์	112. อธิปัตย์ อธิปัตย์	113. อธิปัตย์ อธิปัตย์	
ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์			
114. อธิปัตย์ อธิปัตย์	115. อธิปัตย์ อธิปัตย์	116. อธิปัตย์ อธิปัตย์	117. อธิปัตย์ อธิปัตย์
118. อธิปัตย์ อธิปัตย์			
119. อธิปัตย์ อธิปัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์		
120. อธิปัตย์ อธิปัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์		
121. อธิปัตย์ อธิปัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์		
122. อธิปัตย์ อธิปัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์		
123. อธิปัตย์ อธิปัตย์	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์		
124. อธิปัตย์ อธิปัตย์	ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร		

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาวิทยาศาสตร์

1. อธิปัตย์	สุวรรณี	ข้าราชการบำนาญ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
2. อธิปัตย์	สุวรรณี	ข้าราชการบำนาญ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์
3. อธิปัตย์	สุวรรณี	ข้าราชการบำนาญ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์
4. อธิปัตย์	สุวรรณี	ข้าราชการบำนาญ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์