

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรี (Spectroscopic ellipsometry: SE) วิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง รวมทั้งความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วย วิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง (reactive magnetron sputtering) และวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) พร้อมทั้งเปรียบเทียบการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี (Spectrophotometry) จากการคำนวณด้วย Swanepole method และผลการวิเคราะห์ความหนาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ทั้งนี้กระบวนการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรีนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นสำหรับป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflection coating) ที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยสาร (Evaporation) จากโรงงานอุตสาหกรรม

4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง

ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เป็นฟิล์มออกไซด์ที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูง มีค่าการส่งผ่านแสงในช่วงตามองเห็นและช่วงรังสีอินฟราเรดสูง เป็นต้น จากคุณสมบัติข้างต้น จึงนิยมนำฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานวิจัยทางแสงเช่น การใช้เป็นชั้นดัชนีหักเหสูงของระบบฟิล์มป้องกันการสะท้อน (AR-coating) ซึ่งการนำไปใช้งานนั้นนอกจากฟิล์มจำเป็นต้องมีค่าดัชนีหักเหคงที่แล้วฟิล์มยังต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ทั้งนี้ โดยส่วนใหญ่เมื่อฟิล์มมีความหนามากขึ้นย่อมส่งผลให้ฟิล์มมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น

การเตรียมฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น โซลเจล (Sol-gel) (L. Kumari et al., 2009) วิธีระเหยสาร (Evaporation) (Y. Shen et al., 2007) และวิธีสปีดเตอริง (P.J. Matin et al., 2010) สำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มแบบสปีดเตอริงเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากฟิล์มที่เคลือบมีความหนาอย่างสม่ำเสมอ

(Uniform) เป็นเทคโนโลยีสะอาดปราศจากสารเคมีและสามารถยึดติดกับวัสดุรองรับได้ดี แต่เนื่องจากในขณะทำการเคลือบไม่สามารถควบคุมสภาวะของเครื่องเคลือบได้อย่างครบถ้วน เช่น อุณหภูมิขณะทำการเคลือบเนื่องจากความร้อนสะสม หรือ การเกิดปรากฏการณ์ออกซิเจนเข้ามาจับบริเวณเป้าสารเคลือบในขณะทำการเคลือบ (Target poisoning) ซึ่งอาจทำให้ฟิล์มที่ได้จากการเคลือบมีการแสดงโครงสร้างหรือสมบัติทางแสงที่แตกต่างกัน

ในการทดลองตอนนี้จะทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตและเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาแตกต่างกัน โดยทำการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนแมกนีตรอนสปัตเตอริง กำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 30 sccm อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 20 sccm พลังงานในการเคลือบ 200 W และทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มโดยการเปลี่ยนแปลงเวลาในการเคลือบเท่ากับ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง (ดังตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1

ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่นำมาวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนา

Sample No.	Deposited time (hr)
S4H	4
S5H	5
S6H	6
S7H	7

4.1.1 การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตในการวิเคราะห์ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

เทคนิคสเปกโตรสโคปีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์สมบัติทางแสงที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว โดยสามารถวิเคราะห์ความหนาและค่าคงที่ทางแสง (ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ) รวมทั้งสามารถทราบลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์มได้ ทั้งนี้การวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์มให้มีความถูกต้องนั้นต้องเกิดจากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมกับฟิล์ม

4.1.1.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มเซอริโคเนียม

ไดออกไซด์

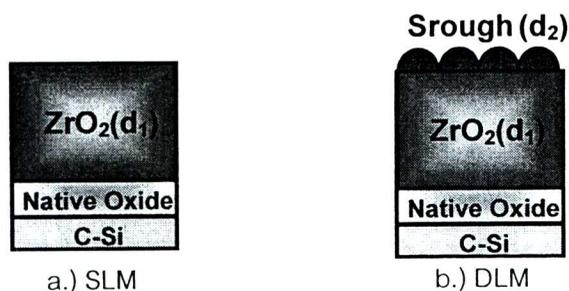
ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองสร้างแบบจำลองทางกายภาพที่มีความเหมาะสมสำหรับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ โดยนำตัวอย่างฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเทคนิคสปีดโคทเป็นเวลาดำเนินการ 4 ชั่วโมง มาทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสง ลักษณะทางกายภาพและความหนาของฟิล์ม ในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ช่วงตามองเห็นจนถึงช่วงรังสีอินฟราเรด (ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-1600 นาโนเมตร หรือช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-3 อิเล็กตรอนโวลต์) โดยใช้แบบจำลองทางแสงจากสมการคอวชี (Cauchy dispersion)

ภาพที่ 4.1 แสดงแบบจำลองทางกายภาพของฟิล์มที่ใช้ในการทดลองนี้ ประกอบไปด้วยชั้นของซิลิกอนเวเฟอร์ (C-Si) ซึ่งเป็นแผ่นรองรับ และชั้นเนทีฟออกไซด์ (Native oxide) ซึ่งเป็นออกไซด์ที่เกิดขึ้นในบรรยากาศทั่วไป โดยภาพที่ 4.1a.) แบบจำลองทางกายภาพหนึ่งชั้น (Single Layer Model: SLM) เป็นแบบจำลองทางกายภาพที่เกิดจากสมมติฐานว่าฟิล์มที่เคลือบนั้นมีความเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งฟิล์ม โดยมีชั้นฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์อยู่บนชั้นเนทีฟออกไซด์ ภาพที่ 4.2b.) แบบจำลองทางกายภาพสองชั้น (Double Layer Model: DLM) เป็นแบบจำลองทางกายภาพที่เกิดจากสมมติฐานว่าฟิล์มที่เคลือบมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยมีชั้นผิวขรุขระ (Surface roughness: Srough) บนชั้นฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ ชั้นผิวขรุขระนี้เป็นชั้นของฟิล์มที่มีช่องว่าง (Void) ซึ่งมาจากการใส่ชั้น Effect Medium Approximations (EMA) ของ Bruggeman โดยมี %Void มากกว่า 30% ของเนื้อฟิล์ม

ภาพที่ 4.1

แบบจำลองทางกายภาพของฟิล์ม a.) แบบจำลองชั้นเดียว (Single Layer Model: SLM)

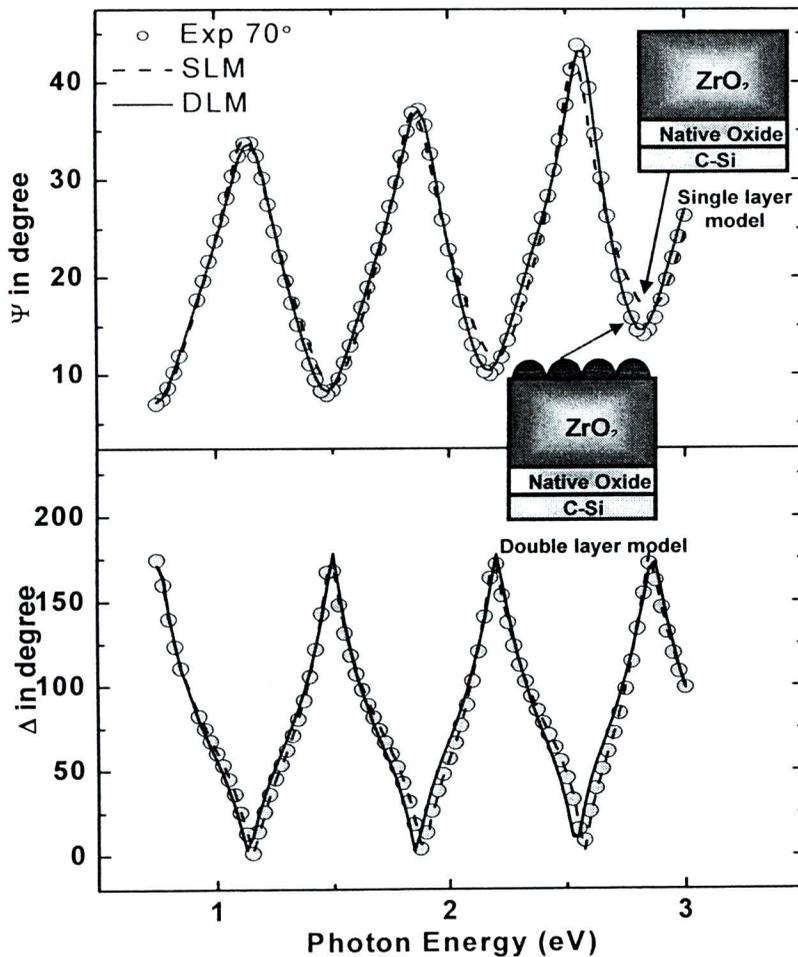
b.) แบบจำลองสองชั้น (Double Layer Model: DLM)



จากการทดลองเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณ โดยโปรแกรม WVASE 32 พบว่า แบบจำลองทางกายภาพหนึ่งชั้น ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลอง (Curve fitting) กับผลการวัดตลอดทั้งช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-3 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้น พบว่า สามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี ดังภาพที่ 4.2

ภาพที่ 4.2

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-3 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอีลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียออกไซด์ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพหนึ่งชั้น และสองชั้น กับผลการทดลอง



ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลจากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพหนึ่งชั้นและสองชั้น พบว่า ค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับผลการวัด (Mean Square Error: MSE) จากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าแบบจำลองทางกายภาพหนึ่งชั้นได้อย่างชัดเจน โดยมีค่า MSE เท่ากับ 14.57 ในขณะที่แบบจำลองทางกายภาพหนึ่งชั้นมีค่า MSE เท่ากับ 61.74 ดังนั้น แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นจึงเป็นแบบจำลองทางกายภาพที่มีความเหมาะสมสำหรับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเวลา 4 ชั่วโมง โดยฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์มีความหนาเท่ากับ 443 นาโนเมตร และชั้นซุรอะที่พื้นผิวมีความหนาเท่ากับ 17 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.2

เปรียบเทียบแบบจำลองทางกายของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 4 ชั่วโมง

Physical model	Parameter					
	MSE	d_1	d_2	%void	An	Bn
SLM	61.74	444.37±6.13	-	-	2.050±0.021	0.0194±0.0012
DLM	14.57	426.13±1.39	17.55±0.46	36.2	2.068±0.004	0.0207±0.0003

4.1.1.2 การสร้างแบบจำลองทางแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

จากการทดลองตอนที่ผ่านมา (4.1.1.1) พบว่า แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ทั้งนี้จะเห็นว่า จากการทดลองตอนที่ผ่านมาสามารถทำการเปรียบเทียบผลระหว่างแบบจำลองกับผลการวัดได้เพียงช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-3 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งยังไม่ถึงค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าสูงประมาณ 5 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมเพื่อวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ โดยวิเคราะห์ในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75 - 6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งในการทดลองหาแบบจำลองทางแสงที่เหมาะสมนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้สมการคอรีซีและสมการทาวน์ลอเรนซ์

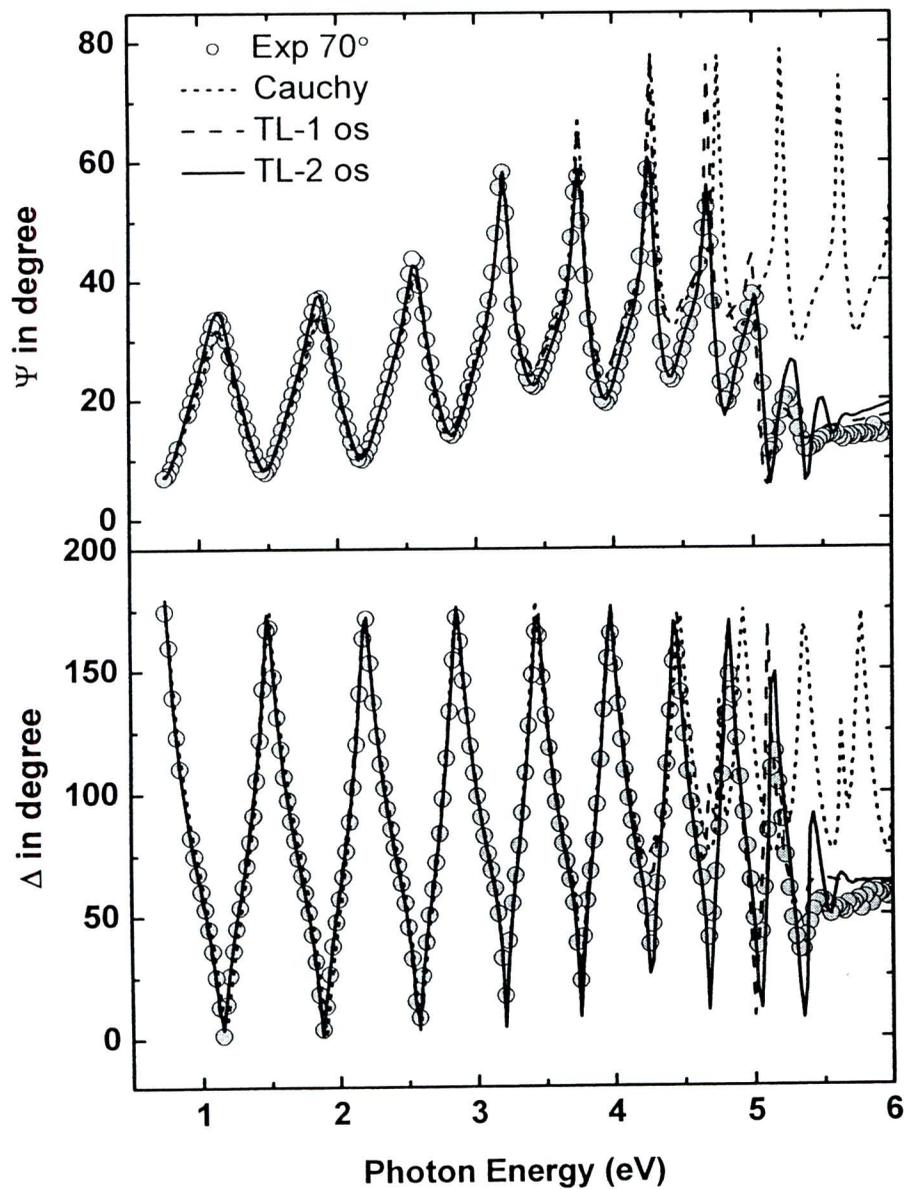
ภาพที่ 4.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวัด (Ψ, Δ) กับผลการคำนวณ พบว่าแบบจำลองทางแสงจากสมการคอร์ซีไม่สามารถทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองกับผลการวัดในช่วงพลังงานโฟตอน 4 อิเล็กตรอนโวลต์ขึ้นไป โดยมีค่า MSE เท่ากับ 99.05 (ตารางที่ 4.3) ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาดที่สูงมาก จึงไม่สามารถใช้วิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นจึงทดลองใช้แบบจำลองทางแสงของทาวน์ลอเรนซ์ 1 ออสซิลเลเตอร์ พบว่า สามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้ดีกว่าแบบจำลองทางแสงจากสมการคอร์ซี โดยมีค่า MSE เท่ากับ 85.14 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แต่การใช้เพียง 1 ออสซิลเลเตอร์นั้นยังไม่สามารถทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้ตลอดทั้งช่วงพลังงานโฟตอนได้ ดังนั้น จึงทดลองเพิ่มออสซิลเลเตอร์ของทาวน์ลอเรนซ์เป็น 2 ออสซิลเลเตอร์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าไดอิเล็กตริกส่วนจริง (ϵ_1) และค่าไดอิเล็กตริกส่วนจินตภาพ (ϵ_2) ในช่วงใกล้ช่องว่างพลังงาน และพบว่า สามารถทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองได้ใกล้เคียงกับผลการวัดได้ตลอดทั้งช่วงพลังงานโฟตอน โดยมีค่า MSE เท่ากับ 26.84 ดังนั้น แบบจำลองทางแสงของทาวน์ลอเรนซ์โดยใช้ 2 ออสซิลเลเตอร์ จึงเป็นแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

สังเกตว่าแบบจำลองทางแสงจากสมการคอร์ซี เหมาะสมสำหรับใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-3 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงรังสีอินฟราเรด ($k=0$) แตกต่างจากแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ที่สามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรของสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีตลอดทั้งช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงที่ตามองเห็น และช่วงรังสีอินฟราเรด ทั้งนี้ เนื่องจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่กล่าวถึงการสั่นของกลุ่มอะตอมที่คล้ายกับการสั่นของสปริง เพื่ออธิบายค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน (Complex index of refraction) ในเทอมของ ϵ_1 และ ϵ_2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ค่าดัชนีหักเห และค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของวัตถุที่ใกล้กับช่องว่างพลังงาน ดังนั้นแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ จึงสามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-6 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้อย่างถูกต้อง

ภาพที่ 4.3

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบางเซอริโคเนียมไดออกไซด์ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แสดงความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางแสงของคอรีซี (Cauchy) และสมการของทาวน์ลอเรนซ์

(Tauc-Lorentz oscillator: TL) 1 และ 2 oscillator



ตารางที่ 4.3

ข้อมูลแบบจำลองทางแสงจากสมการคอร์ซีของฟิล์ม
เซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Parameter	Cauchy model
MSE	99.05
d_1	406.4±6.9
d_2	18.7±2.0
%void	36.2
An	2.12±0.02
Bn	0.0248±0.0006
Ak	0.0018±0.0001

ตารางที่ 4.4

เปรียบเทียบแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวนโลเรนซ์ของฟิล์ม
เซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

Parameter	Tauc Lorentz model	
	1 oscilator	2 oscilator
MSE	85.14	26.84
d_1	423.91±5.82	424.124±2.37
d_2	13.11±1.42	16.978±0.598
%void	36.2	36.2
Amp1	728.9±25.2	782.38±5.77
En1	4.799±0.009	-
Eoffset	0.28±0.07	-
Amp2	-	5.0262±0.28
Eg2	-	1.9384±0.0939

หลังจากได้แบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมกับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบเป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้ว จึงนำแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์ มาทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์มที่เตรียมด้วยเวลา 5 6 และ 7 ชั่วโมง พบว่าสามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-6 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้เป็นอย่างดี ดังภาพที่ 4.4-4.6

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบความหนาและค่าดัชนีหักเหที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงของทาวน์ลอเรนซ์โดยใช้ 2 ออสซิลเลเตอร์ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน พบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น ฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์มีความหนาเพิ่มขึ้นและมีค่าดัชนีหักเหลดลง

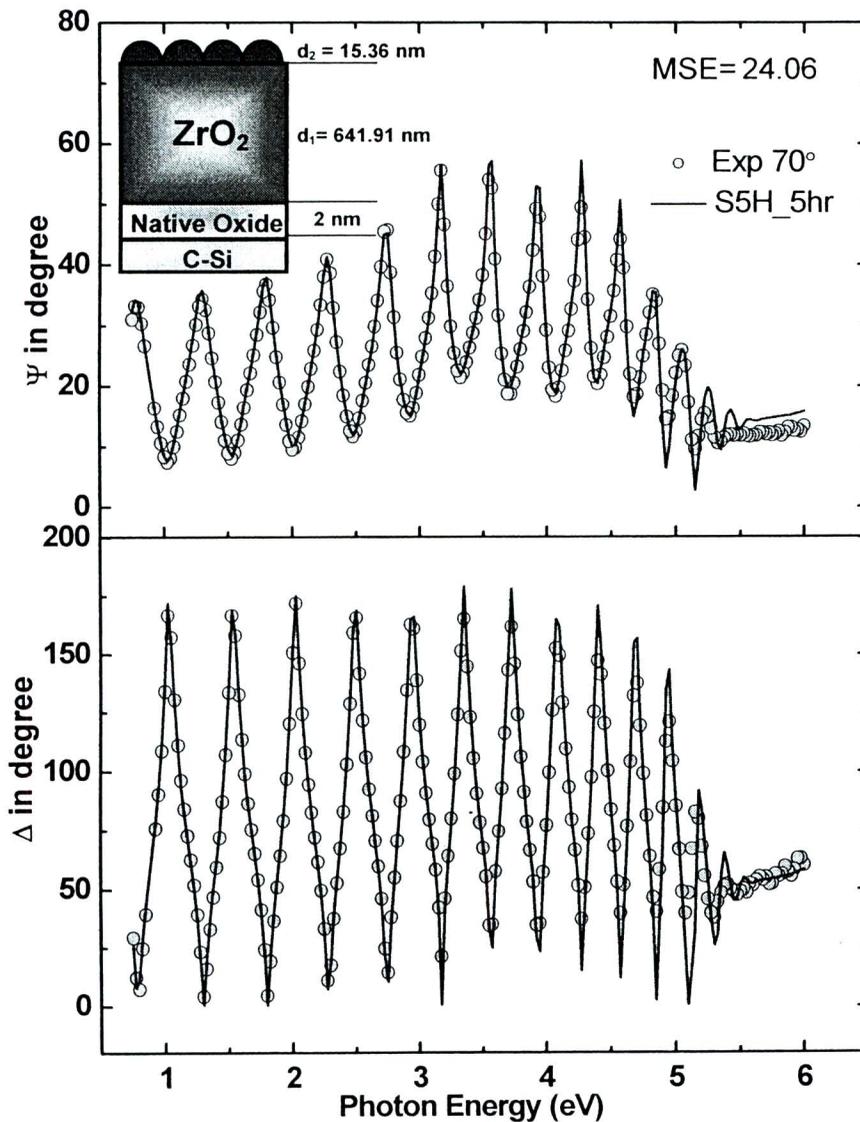
ตารางที่ 4.5

เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้น และแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์

Sample No.	Deposition time (hr)	Thickness (nm)	Refractive index at 2.25 eV
S4H	4	440	2.13
S5H	5	656	2.09
S6H	6	688	2.09
S7H	7	795	2.05

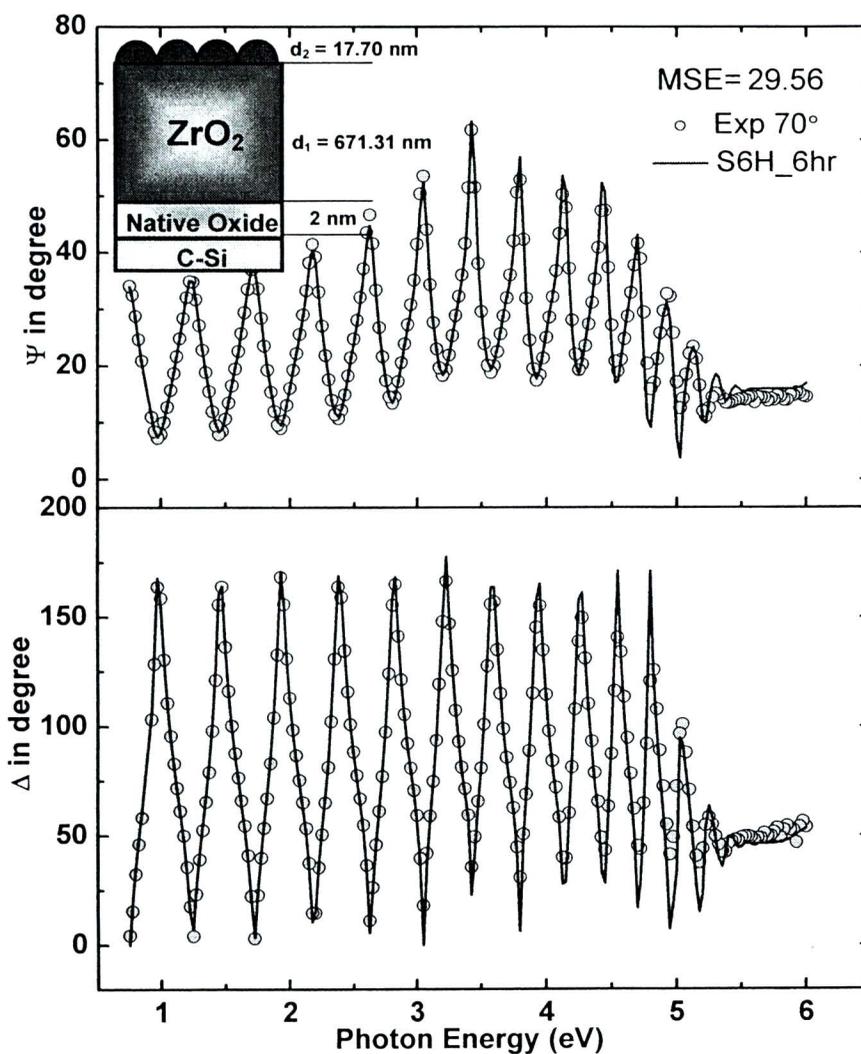
ภาพที่ 4.4

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานฟoton 0.75-6 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปออสซิลโลสโคปโพลาไรซ์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



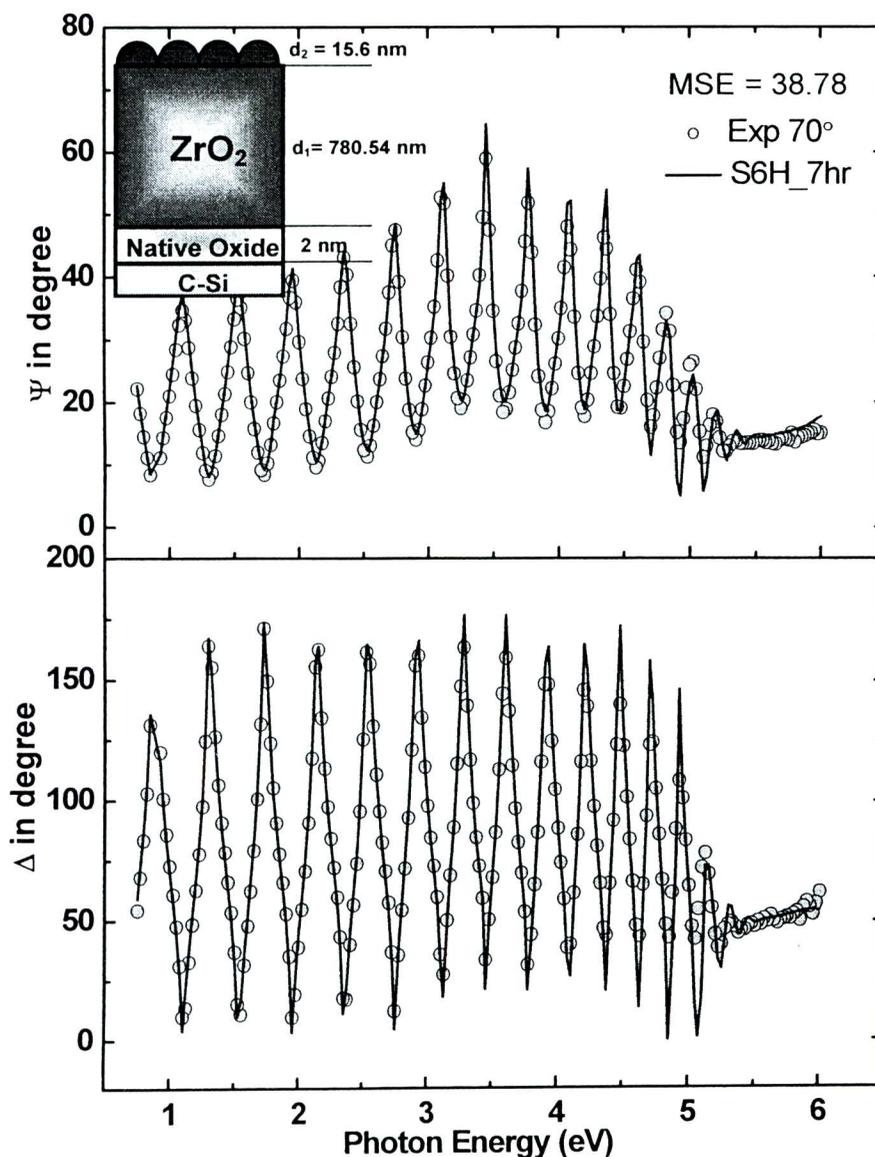
ภาพที่ 4.5

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



ภาพที่ 4.6

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ทำการเคลือบบน C-Si เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



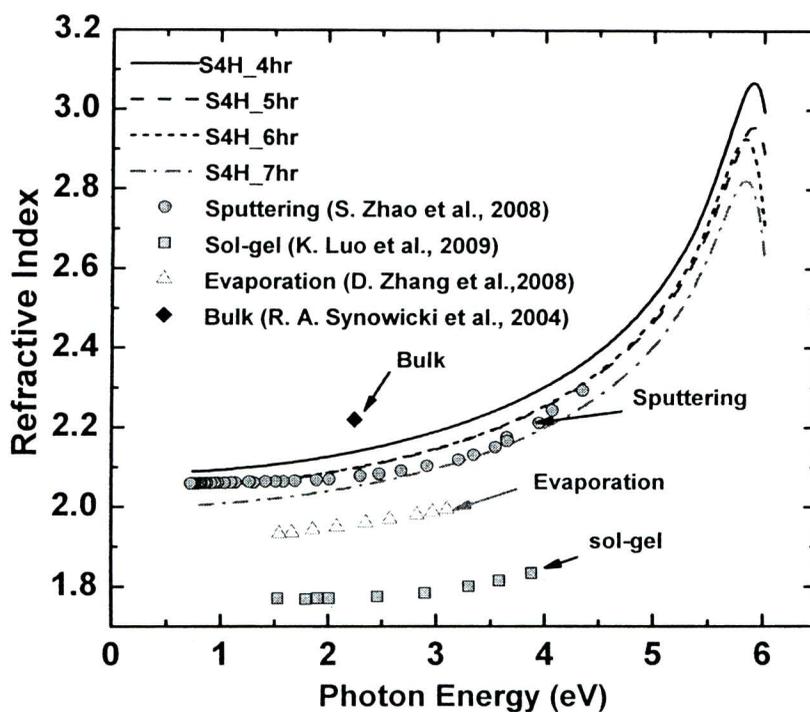
4.1.1.3 ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญและค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

จากการสร้างแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในหัวข้อที่ 4.1.1.2 โดยสามารถวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ เมื่อนำค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เคลือบด้วยเวลาต่างกันมาเปรียบเทียบ ดังภาพที่ 4.7 พบว่า ค่าดัชนีหักเหมีแนวโน้มลดลงเมื่อฟิล์มมีความหนามากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เตรียมได้กับค่าดัชนีหักเหของ Bulk ZrO_2 (2.22) (R. A. Synowicki et al., 2004) ก็จะเห็นว่ามีความต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มที่เกิดจากการเคลือบมีความหนาแน่นในการรวมตัว (Packing density) ที่ต่ำกว่า (S. Zhao et al., 2008) และเมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเวลามากขึ้นก็มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้ Packing density ของฟิล์มลดลง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากช่องว่างที่เป็น Defect ที่เกิดในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์ม เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่เข้ามาติดหน้าเป้าทำให้การเคลือบเกิดความไม่ต่อเนื่อง ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของเป้าสารเคลือบเปลี่ยนไป

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ S. Zhao และคณะ (S. Zhao et al., 2008) ซึ่งเตรียมฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์โดยวิธีสปัตเตอร์ริง เช่นเดียวกัน พบว่า มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม ZrO_2 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสาร (D. Zhang et al., 2008) และวิธีโซลเจล (K. Luo et al., 2009) พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เตรียมในงานวิจัยมีค่าดัชนีหักเหที่สูงกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสองวิธีนี้ เนื่องจากการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงอะตอมของสารเคลือบมีพลังงานจากการชนของอะตอมสูงถึงประมาณ 1-10 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีพลังงานมากพอที่สามารถเคลื่อนที่อยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น (Packing density) และมีโอกาสในการจัดเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างแบบผลึก ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีระเหยสารอะตอมของสารเคลือบมีพลังงานจากการให้ความร้อนแล้วระเหยเป็นไอเพียง 0.1-1 อิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้อะตอมอาจมีการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน ทำให้มีค่าดัชนีหักเหต่ำ เช่นเดียวกับฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีโซลเจล ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัวกันทางเคมี ทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของสารมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้มีการจัดเรียงตัวกันให้ใกล้ชิดกัน จึงทำให้มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าวิธีสปัตเตอร์ริงและวิธีระเหยสาร

ภาพที่ 4.7

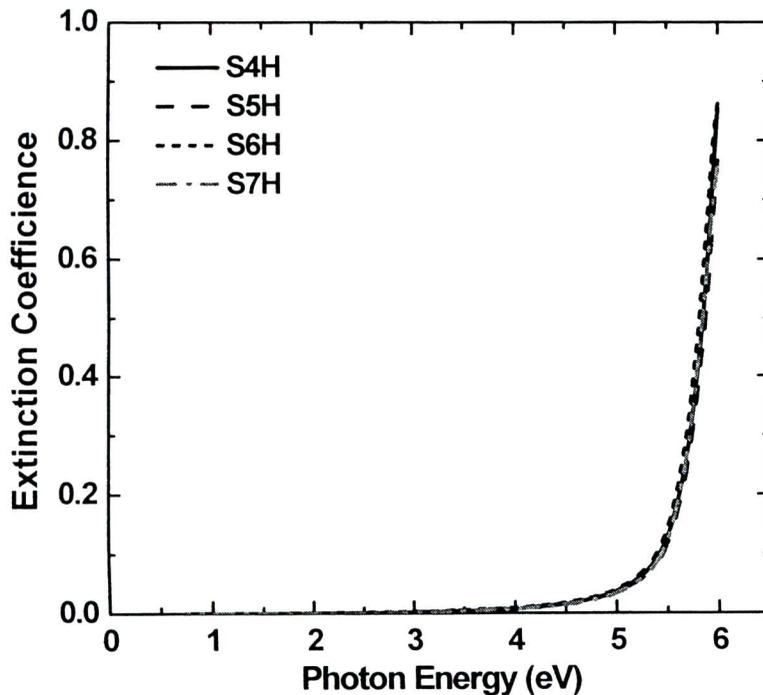
ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ S4H S5H S6H และ S7H ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ



จากภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ความหนาต่างกับค่าพลังงานโฟตอน พบว่า ในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-3 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญมีค่าน้อยมาก จึงทำให้แสงสามารถส่งผ่านวัตถุได้ดี แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงพลังงานโฟตอนตั้งแต่ 4 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงพลังงานโฟตอนตั้งแต่ 5 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป แสดงว่าในช่วงพลังงานโฟตอนตั้งแต่ 5 อิเล็กตรอนโวลต์ นี้มีการดูดกลืนแสงมาก

ภาพที่ 4.8

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ S4H S5H S6H และ S7H
ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ

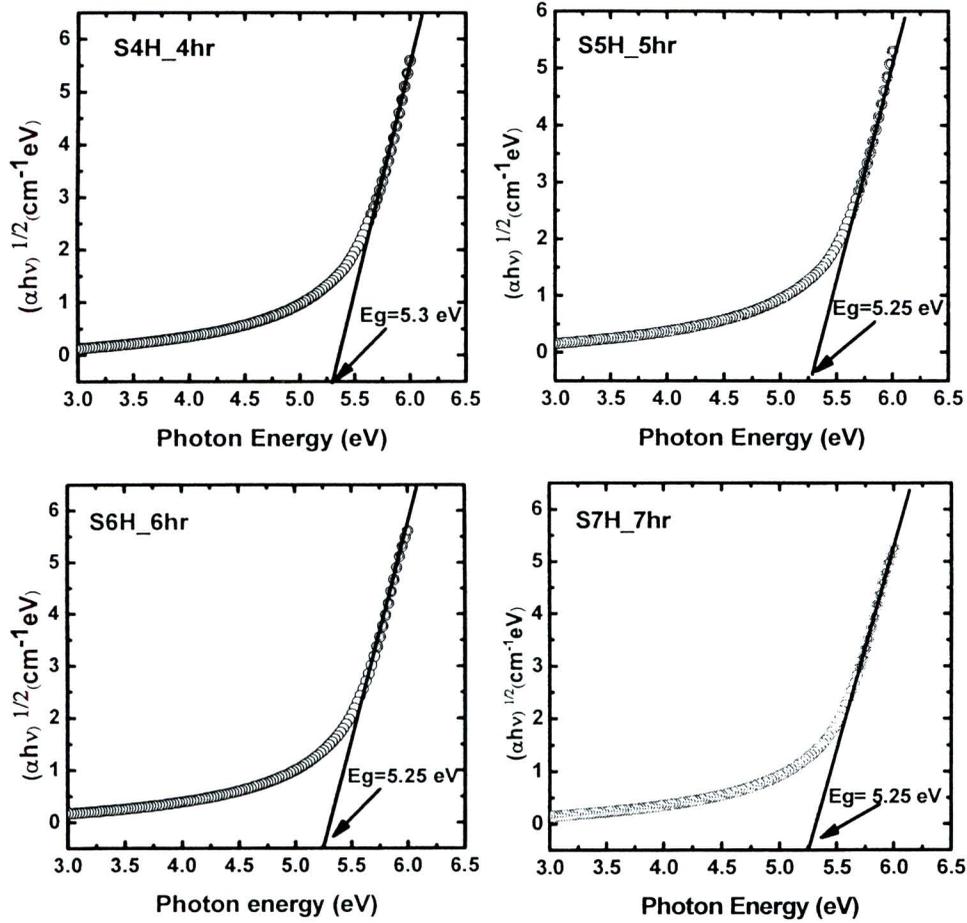


ในการหาค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ จะทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE ไปแทนในสมการที่ (2.23) และ คำนวณหาค่าช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{1/2}$ กับ hv ดังภาพที่ 4.9 พบว่า ฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างกันมีค่าช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 5.25-5.30 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอริโคเนียมมีค่าต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานของ Bulk เฟสโมโนคลีนิก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.4 eV (B. Kralik et al., 1998) เนื่องจากฟิล์มอาจมีความบกพร่อง (Defect) จึงทำให้มีค่าช่องว่างพลังงานต่ำกว่าของ Bulk

ภาพที่ 4.9

ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ S4H S5H S6H และ S7H

ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ



ตารางที่ 4.6

ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบด้วยเวลาต่างกัน

Sample no.	Deposition time (hr)	Optical bandgap (eV)
S4H	4	5.30
S5H	5	5.30
S6H	6	5.25
S7H	7	5.25

4.1.2 การใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีในการวิเคราะห์ฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรีเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยม เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสง จากการนำค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงมาคำนวณ เช่น วิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหด้วยสมการ Swanepole และการหาความหนาของฟิล์มโดยใช้สมการการแทรกสอดของแสง ดังจะได้กล่าวต่อไป

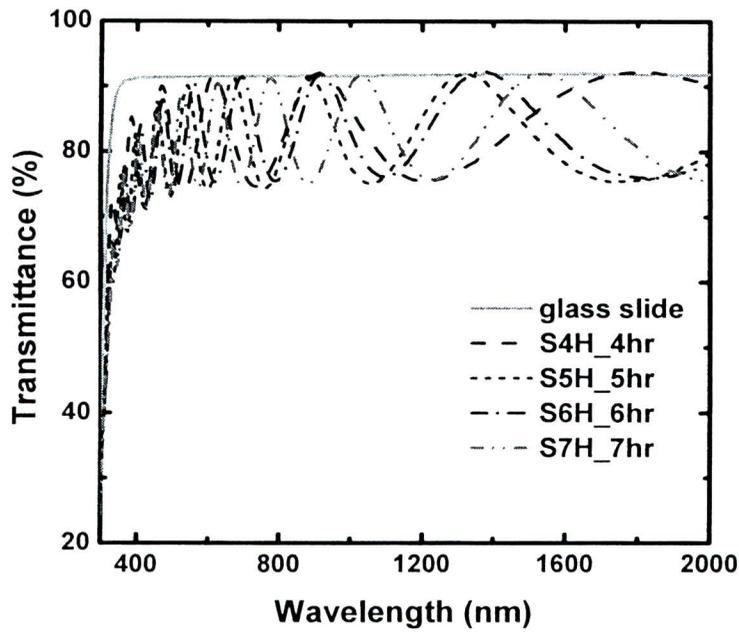
4.1.2.1 สเปกตรัมทางแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

ทำการศึกษาเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของแสงและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมลงบนกระจกสไลด์ ด้วยเวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง

ภาพที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เวลาในการเคลือบต่างกัน โดยผลของสเปกตรัมเป็นผลจากการแทรกสอดของคลื่นแสง พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบมากขึ้น รั้วการแทรกสอดของคลื่นแสงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความหนามากขึ้น เมื่อพิจารณาการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร พบว่า ฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำเวลาเคลือบเป็นเวลา 5 ชั่วโมงมีค่าการส่งผ่านสูงสุด (ตารางที่ 4.7) และเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ความหนาแตกต่างกัน ไปคำนวณการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็น ($T_{avg,vis}$) ดังสมการที่ (3.15) พบว่าฟิล์มทั้งหมดมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ซึ่งถือว่าฟิล์มมีระดับความใสที่ดี ดังภาพที่ 4.11

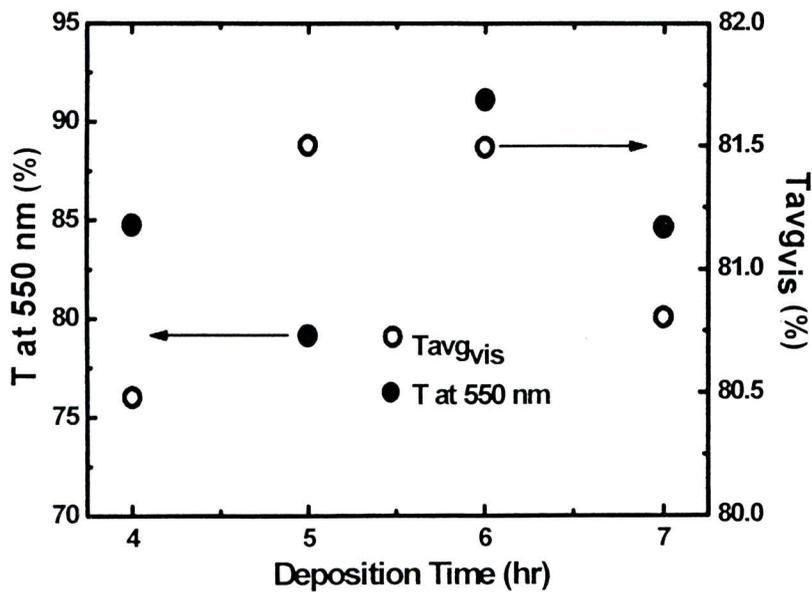
ภาพที่ 4.10

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน



ภาพที่ 4.11

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ย ในช่วงตามมองเห็นของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบด้วยเวลาต่างกัน



ตารางที่ 4.7

ผลของเวลาในการเคลือบฟิล์มต่อการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

Sample No.	Deposition time (hr)	%T at 550 nm	%Tavg _{vis}
S4H	4	76.02	81.18
S5H	5	88.78	80.73
S6H	6	88.68	81.69
S7H	7	80.05	81.17

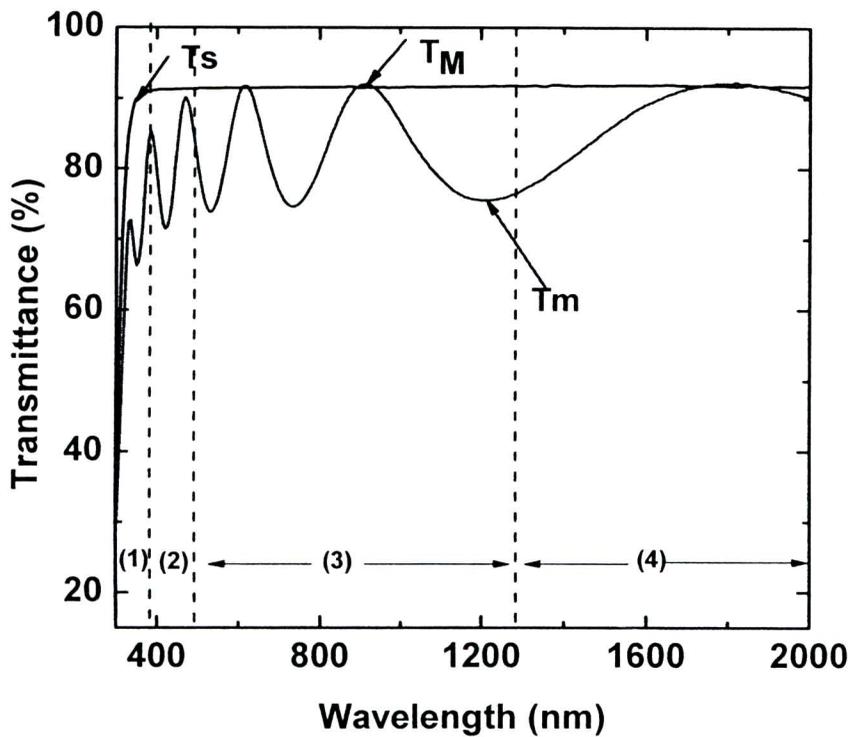
4.1.2.2 ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะนำค่าที่ได้จากเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงจากตอนที่ 4.1.2.1 มาคำนวณค่าดัชนีหักเหโดยใช้สมการ Swanepoel แล้ว ทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหจากเทคนิค SE และค่าดัชนีหักเหจากรายงานวิจัยก่อนหน้า

ในการคำนวณค่าดัชนีหักเหจากสมการ Swanepoel นั้นต้องเลือกสมการที่ใช้ในคำนวณค่าดัชนีหักเหที่มีความเหมาะสมกับบริเวณที่มีการส่งผ่านแสง ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 บริเวณ ได้แก่ (1) บริเวณที่มีการดูดกลืนแสงมาก (Strong absorption) (2) บริเวณที่มีการดูดกลืนแสงปานกลาง (Medium absorption) (3) บริเวณที่มีการดูดกลืนแสงน้อย (Weak absorption) และ (4) บริเวณที่ไม่มีการดูดกลืนแสง (Transparent region) ในการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในการทดลองนี้จะนำค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงที่มีการดูดกลืนแสงปานกลาง (บริเวณ3)และช่วงที่มีการดูดกลืนแสงน้อย (บริเวณ 4) มาคำนวณ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการดูดกลืนแสงค่อนข้างน้อย จึงสามารถคำนวณค่าดัชนีหักเหบริเวณดังกล่าวด้วยสมการอย่างง่าย ดังสมการที่ (2.44)

ภาพที่ 4.12

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
เคลือบลงบนกระจกที่มีการส่งผ่านแสงเป็น T_s พีคการส่งผ่านแสงสูงสุด T_M
และพีคการส่งผ่านแสงต่ำสุดเป็น T_m

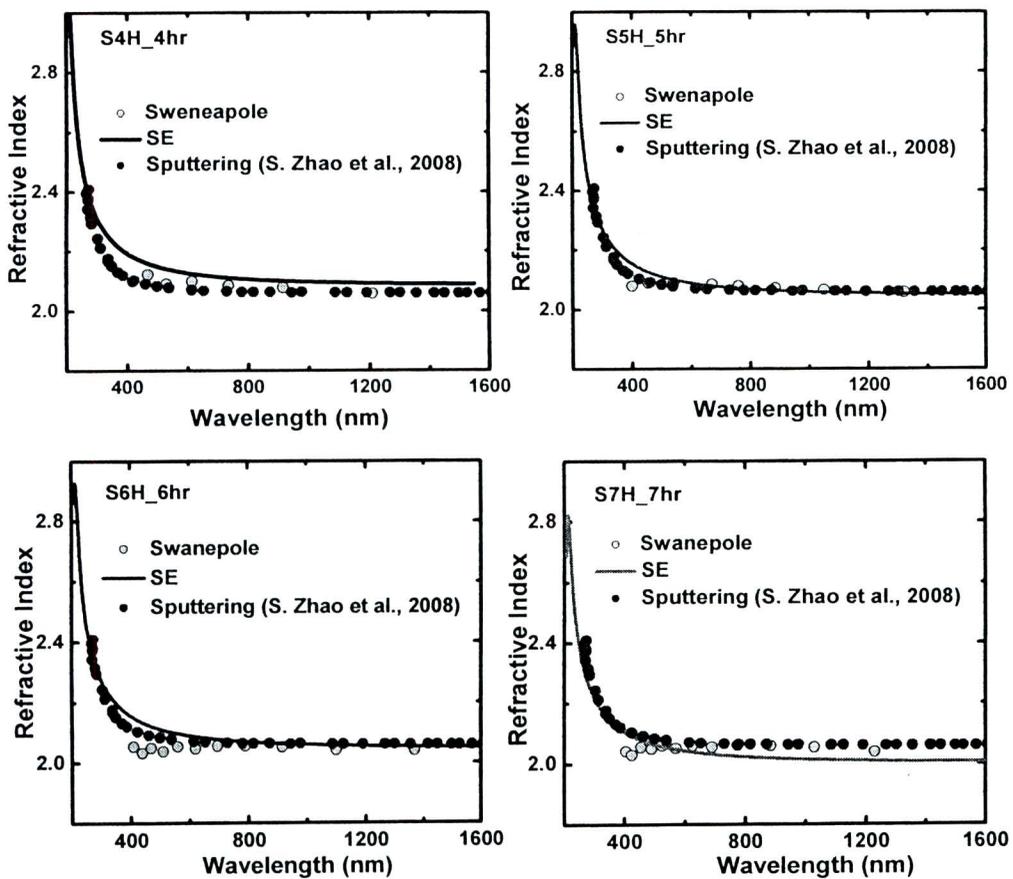


ภาพที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ ที่ทำการเคลือบเป็นเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง จากการคำนวณด้วยสมการ Swanepole เทคนิค SE และจากรายงานอ้างอิงของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีสปัตเตอริง (S. Zhao et al., 2008) พบว่า ค่าดัชนีหักเหที่คำนวณจากสมการ Swanepole สามารถหาค่าดัชนีหักเหได้เพียงบางความยาวคลื่นแสงเท่านั้น โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยเวลามากขึ้น สามารถหาค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อฟิล์มมีความหนามากขึ้น สามารถนำค่าการส่งผ่านแสงสูงสุดและต่ำสุดมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าดัชนีหักเหได้มากขึ้น โดยสังเกตเห็นได้ว่า สมการ Swanepole สามารถหาค่าดัชนีหักเหได้ตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นแสง 400 นาโนเมตรขึ้นไป แต่ค่าดัชนีหักเหที่น่าเชื่อถือและมีความใกล้เคียงกับรายงานอ้างอิงนั้นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 500 นาโนเมตรขึ้นไป เนื่องจากช่วงความยาวคลื่นแสง 400-500 นาโนเมตร ยังมีการดูดกลืนแสงค่อนข้างมาก ซึ่งสมการ Swanepole ที่นำมาใช้คำนวณในบริเวณนี้มีความเหมาะสมสำหรับแสงที่

มีการดูดกลืนน้อย ดังนั้น อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณค่าดัชนีหักเหในช่วงความยาวคลื่นแสงดังกล่าวได้ และเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE พบว่าสามารถวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหตลอดช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงตามองเห็น และช่วงอินฟราเรดได้อย่างถูกต้องและมีความใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหจากรายงานอ้างอิง

ภาพที่ 4.13

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ Swanepole เทคนิค SE และจากรายงานอ้างอิง



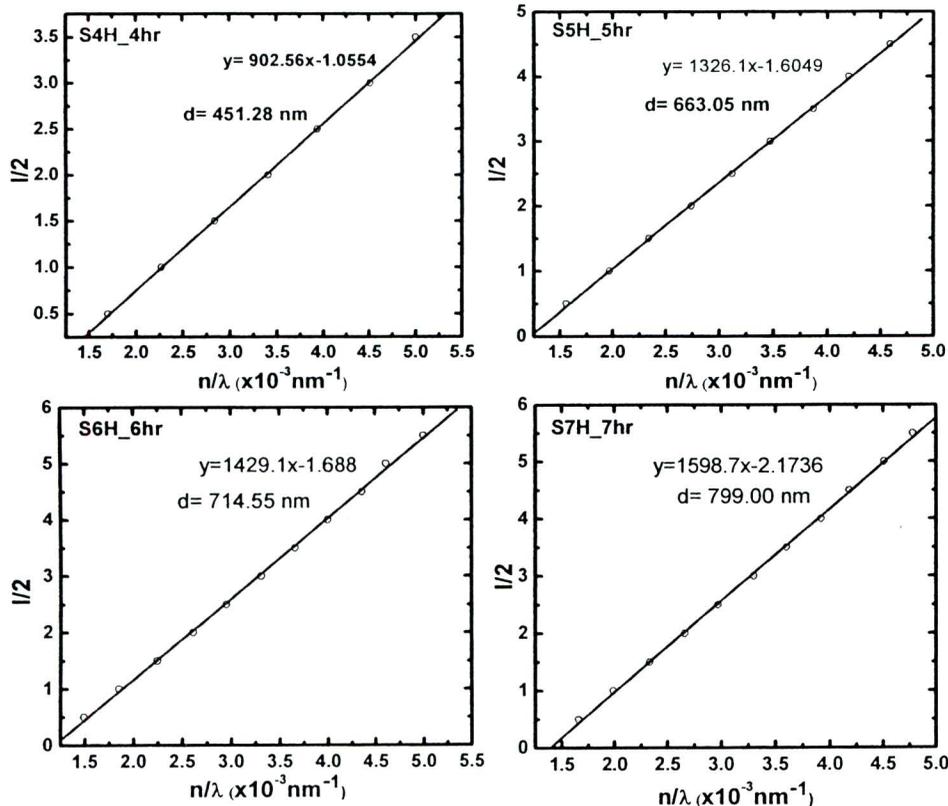
4.1.2.3 ความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการคำนวณความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์โดยนำค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ในตอนที่ผ่านมา (4.1.2.2) มาคำนวณโดยอาศัยวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสง จากสมการที่ (2.47) และจะทำการเปรียบเทียบความหนาที่ได้กับความหนาที่ได้จากเทคนิค SE และจากเทคนิค FE-SEM

ภาพที่ 4.14 แสดงข้อมูลในการหาความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ โดยพลอตกราฟระหว่าง $I/2$ กับ n/λ ความชันของกราฟคือค่า $2d$ เมื่อ I คือ ลำดับความยาวคลื่นแสงที่สามารถคำนวณค่าดัชนีหักเห (1, 2, 3,...) n คือ ค่าดัชนีหักเห และ d คือ ความหนาของฟิล์ม จากกราฟ พบว่า ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบฟิล์มสูงขึ้น โดยมีความหนาเท่ากับ 451.28 663.05 714.55 และ 799.00 นาโนเมตร เมื่อทำการเคลือบฟิล์มด้วยเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ

ภาพที่ 4.14

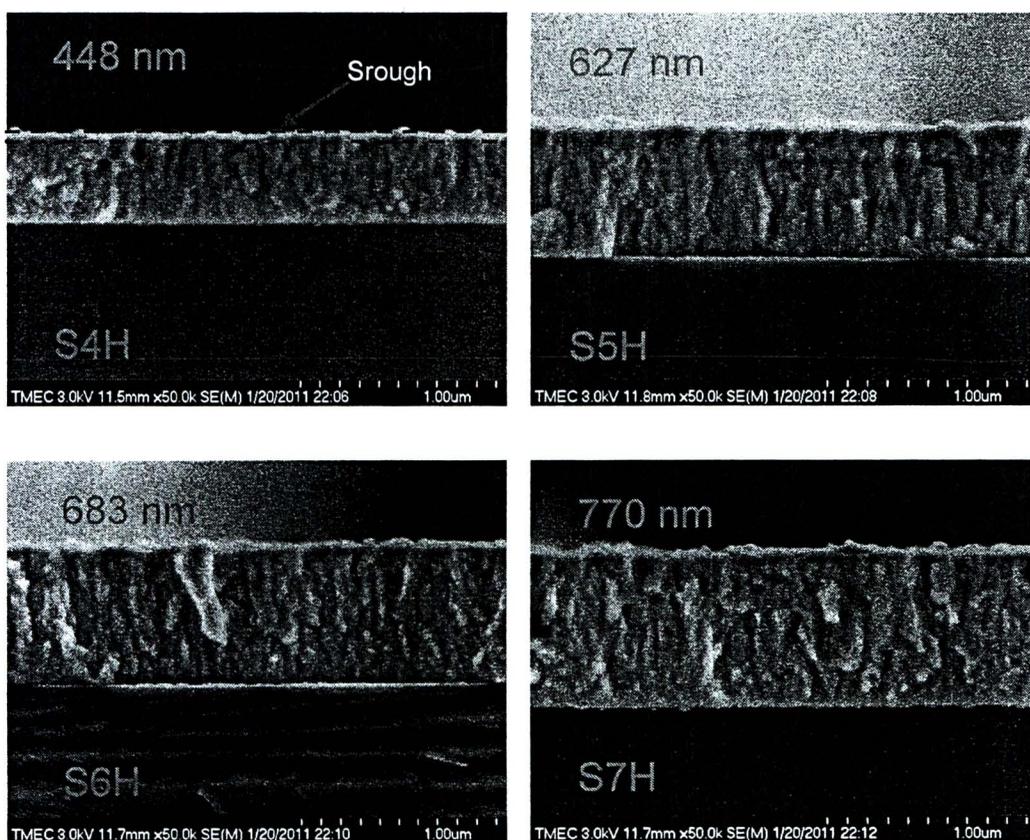
กราฟระหว่าง $I/2$ กับ n/λ ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบเป็นเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง



วิเคราะห์ความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SE และจากการคำนวณด้วยวิธีการแทรกสอดของแสงแล้ว จึงทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มจากเทคนิคทั้งสองด้วยการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิค FE-SEM ดังภาพที่ 4.15 พบว่า ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเคลือบด้วยเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง โดยมีความหนาเท่ากับ 448 627 683 และ 770 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบชั้นพื้นผิวขรุขระบนพื้นเนื้อฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

ภาพที่ 4.15

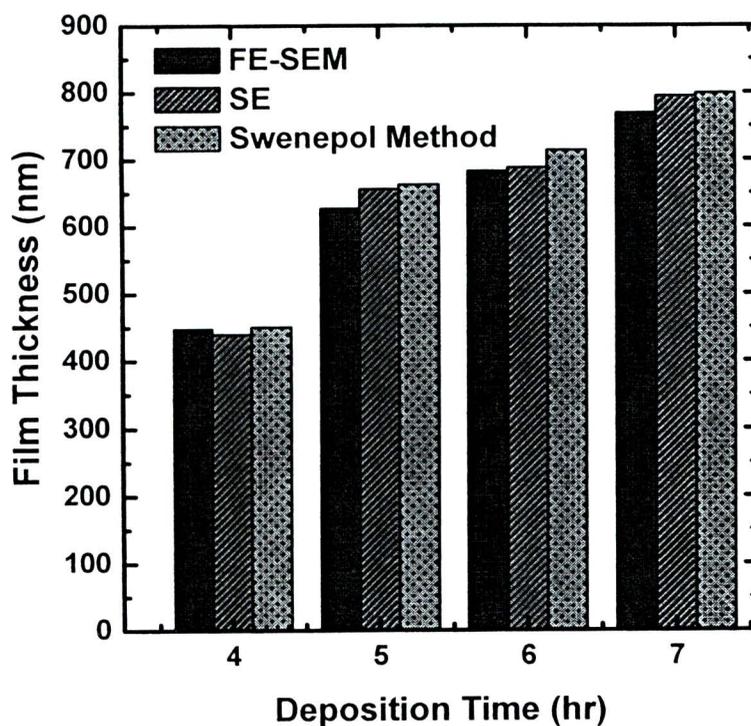
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ที่ทำการเคลือบฟิล์มด้วยเวลา 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง



เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE วิธีการแทรกสอดของคลื่นแสง และเทคนิค FE-SEM ดังภาพที่ 4.16 พบว่า ความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากเทคนิค SE มีค่าใกล้เคียงมากกว่าความหนาของฟิล์มที่ได้จากการคำนวณจากวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสงเมื่อเทียบกับความหนาจากเทคนิค FE-SEM ทั้งนี้ เนื่องจากการวิเคราะห์ความหนาจากเทคนิค SE มีจำนวนข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นแสง 2 จำนวน ซึ่งได้จากการวัดค่า (Ψ, Δ) และความละเอียดของข้อมูลสามารถวัดได้ในแต่ละ 1 ความยาวคลื่น ในขณะที่การวิเคราะห์ความหนาจากการคำนวณด้วยวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสงมีข้อจำกัดทั้งจำนวนข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นแสงมีเพียง 1 จำนวน ซึ่งได้จากการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง อีกทั้งความละเอียดของข้อมูลสามารถวัดได้ในแต่ละ 5 ความยาวคลื่น ดังนั้น การวิเคราะห์ความหนาด้วยเทคนิค SE จึงมีความน่าเชื่อถือมากกว่าการคำนวณความหนาจากวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสง

ภาพที่ 4.16

เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM
เทคนิค SE และวิธีการแทรกสอดของคลื่นแสง



4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation)

จากการทดลองตอนที่ 4.1.1.2 จะเห็นได้ว่าเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซเมทรี (SE) สามารถวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงนำเทคนิค SE มาวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ ค่าช่องว่างพลังงาน และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเคลือบฟิล์มเซอร์โคเนียมด้วยวิธีสปัตเตอริงเป็นเวลา 5 นาที โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 8.6 sccm และให้พลังงานในการเคลือบเท่ากับ 140 W (ดังตารางที่ 4.8) โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบที่ส่งผลต่อการเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ นำฟิล์มเซอร์โคเนียมไปอบในอากาศด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และเมื่อทราบถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์แล้ว จะทำการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ส่งผลทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ โดยนำฟิล์มไปอบในอากาศด้วยอุณหภูมิที่สามารถเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที ดังจะได้กล่าวต่อไป

4.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิในการอบฟิล์มต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่สามารถทำให้เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ จะนำฟิล์มเซอร์โคเนียมไปอบในอากาศด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8

ตัวอย่างฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

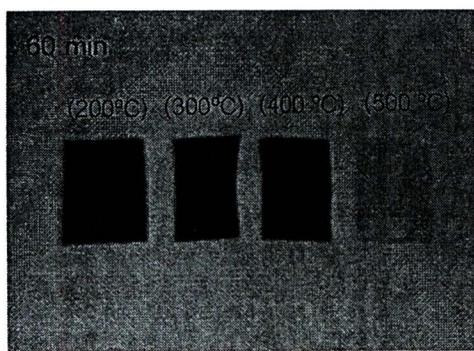
Sample No.	Annealing Time (min)	Annealing Temperature (°C)
T1	60	200
T2	60	300
T3	60	400
T4	60	500

4.2.1.1 การวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

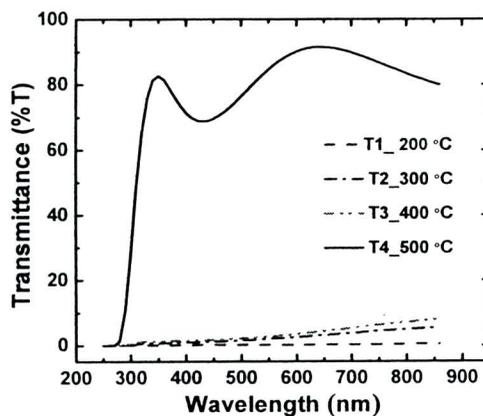
ภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะและเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งสังเกตได้ว่าฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 และ 400 องศาเซลเซียส ยังคงมีลักษณะทึบแสง แต่เมื่ออุณหภูมิในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 500 องศาเซลเซียส ฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสง และเมื่อไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสง พบว่าฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 และ 400 องศาเซลเซียส มีค่าการส่งผ่านแสงต่ำกว่า 10% ในขณะที่ฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงค่าการส่งผ่านแสงสูงขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงสูงกว่า 80% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สมบูรณ์กว่าฟิล์มที่อบด้วยอุณหภูมิ 200 300 และ 400 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.17

- a.) ภาพถ่ายของฟิล์ม b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 200 300 400 และ 500°C เป็นเวลา 60 นาที



a.)



b.)

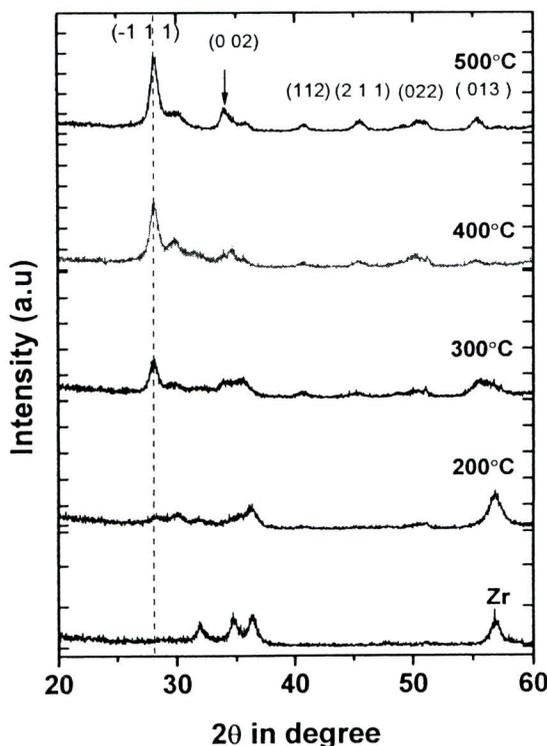


4.2.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

ภาพที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD พบว่าฟิล์มเซอร์โคเนียมออกไซด์หลังผ่านการอบด้วยเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ยังไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ แต่เมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้นเป็น 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส โครงสร้างฟิล์มเปลี่ยนแปลงไปเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการฟอร์มตัวของเซอร์โคเนียมกับออกซิเจนเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถพบพีคที่ระนาบ $(-1\ 1\ 1)$ และจะมีความเข้มพีคที่ระนาบนี้เพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบฟิล์มด้วยอุณหภูมิสูงขึ้น โดยฟิล์มที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถพบพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลีนิกที่ระนาบ (-111) (002) (112) (022) และ (013) ที่มุม 2θ เท่ากับ 28 34 41 52 และ 57 องศา โดยเฉพาะที่ระนาบ $(-1\ 1\ 1)$ มีความเข้มพีคสูงสุด แสดงว่าฟิล์มเซอร์โคเนียมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างเป็นเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.18

พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมและฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 200 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



4.2.2 ผลกระทบของเวลาในการอบต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเซอโรโคเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากฟิล์มเซอโรโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบในบรรยากาศด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีลักษณะโปร่งแสงและเกิดโครงสร้างผลึกของฟิล์มเซอโรโคเนียมไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฟิล์มที่อุณหภูมิดังกล่าว จึงทำการอบฟิล์มเซอโรโคเนียมไดออกไซด์ด้วยเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

ตารางที่ 4.9

ตัวอย่างฟิล์มเซอโรโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

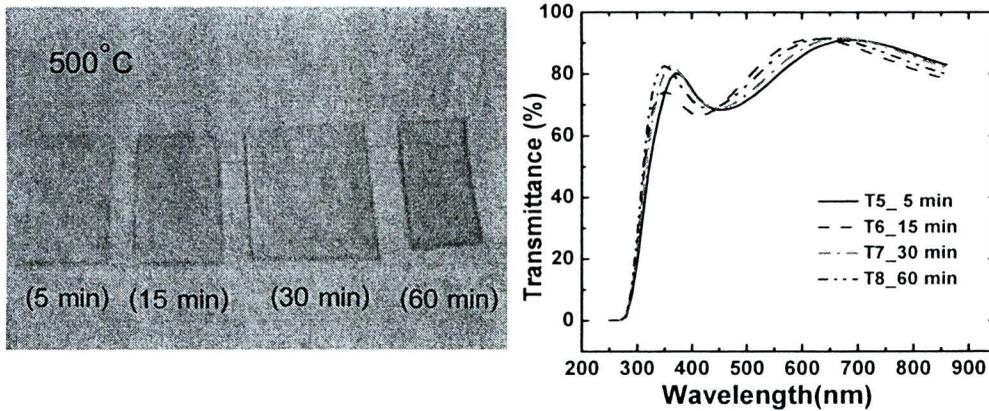
Sample No.	Annealing Temperature ($^{\circ}$ C)	Annealing Time (min)
T5	500	5
T6	500	15
T7	500	30
T8	500	60

4.2.2.1 การวิเคราะห์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเซอโรโคเนียมไดออกไซด์

เมื่อนำฟิล์มที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาในการอบฟิล์มที่แตกต่างกัน พบว่า ฟิล์มมีลักษณะโปร่งแสงที่ใกล้เคียง ดังภาพที่ 4.19 และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอโรโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที พบว่า ฟิล์มมีเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงใกล้เคียงกัน โดยเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร มีค่ามากขึ้นเมื่อฟิล์มผ่านการอบด้วยเวลามากขึ้น (ดังตารางที่ 4.10) และเมื่อนำเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน ไปคำนวณการส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็น ($T_{avg,vis}$) ดังสมการที่ (3.15) พบว่าฟิล์มทั้งหมดมีค่าการส่งผ่านแสงเฉลี่ยมากกว่า 80% ซึ่งถือว่าฟิล์มมีระดับความใสที่ดี ดังภาพที่ 4.20 ดังนั้น จะสังเกตเห็นได้ว่าการอบฟิล์มที่เวลาเพียง 5 นาที สามารถที่จะเกิดฟิล์มออกไซด์ที่มีลักษณะโปร่งแสงและมีค่าการส่งผ่านแสงใกล้เคียงกับฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยเวลามากขึ้น

ภาพที่ 4.19

a.) ภาพถ่ายของฟิล์ม b.) เปรอ์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียม ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

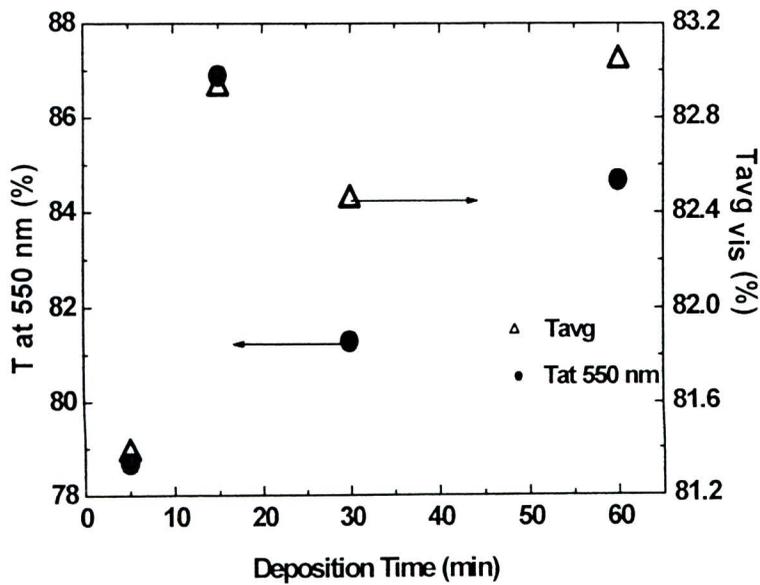


a)

b)

ภาพที่ 4.20

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร และเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงเฉลี่ยในช่วงตามมองเห็นของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที



ตารางที่ 4.10

ผลของเวลาในการอบฟิล์มมีต่อเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

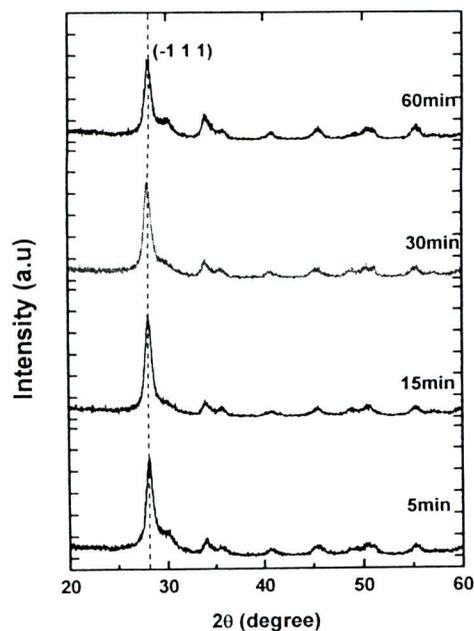
Sample No.	Deposition time (min)	%T at 550 nm	%Tavg _{vis}
T5	5	78.68	81.38
T6	15	86.89	82.93
T7	30	81.29	82.45
T8	60	84.67	83.04

4.2.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางเซอร์โคเนียมออกไซด์

เมื่อพิจารณาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่างกัน ดังภาพที่ 4.21 พบว่า เมื่อเวลาในการอบฟิล์มเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 30 นาที พีคที่ระนาบ (-1 1 1) และพีคที่ระนาบอื่น มีความเข้มพีคที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการอบฟิล์มถึง 60 นาที พีคที่ระนาบ (-1 1 1) มีความเข้มพีคลดลง

ภาพที่ 4.21

พีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที

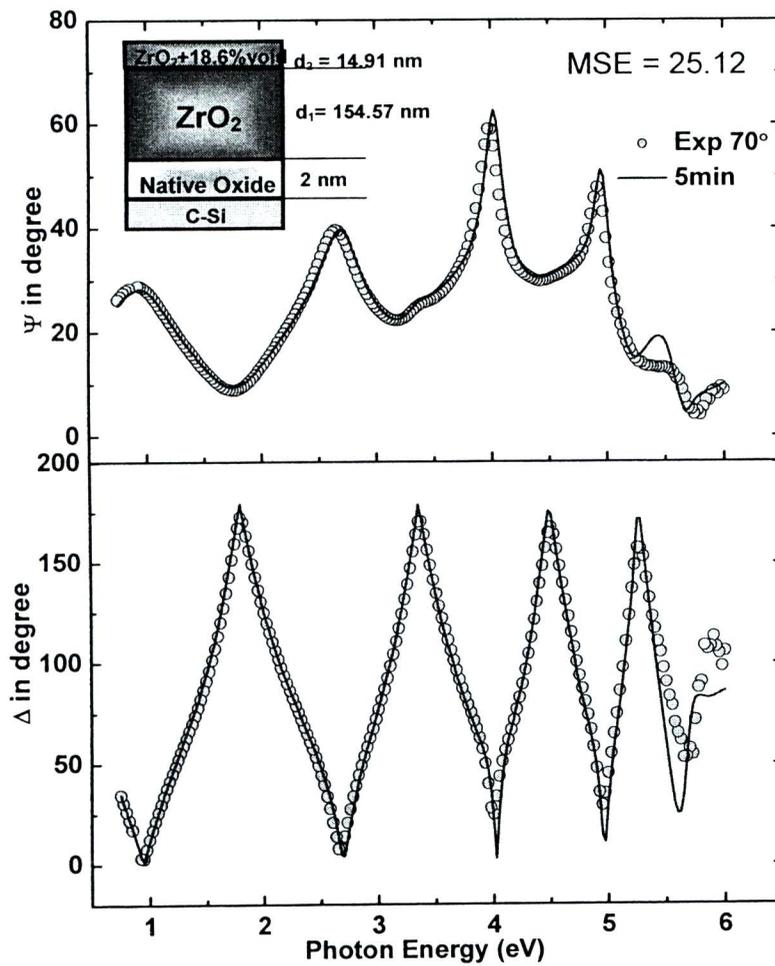


4.2.2.3 ค่าดัชนีหักเห ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญ ค่าช่องว่างพลังงานและความหนาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงและความหนาของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเวลาของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที โดยนำแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองทางกายภาพและแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมกับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ตอนที่ 4.1.1.2) มาประยุกต์ใช้กับฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน จากการทดลอง พบว่า แบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ 2 ออสซิลเลเตอร์ สามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เฉพาะในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-5 อิเล็กตรอนโวลต์ ทั้งนี้ในช่วงพลังงานโฟตอน 5-6 อิเล็กตรอนโวลต์ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบผลได้ เนื่องจากฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ด้วยวิธีนี้เนื้อฟิล์มมีความไม่สม่ำเสมอ โดยภาพที่ 4.22-4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดของฟิล์มที่ผ่านการอบเป็นเวลา 5 ถึง 60 นาที และได้ทำการเปรียบเทียบความหนาและค่าดัชนีหักเหที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงของทาวน์ลอเรนซ์โดยใช้ 2 ออสซิลเลเตอร์ ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน ดังตารางที่ 4.11

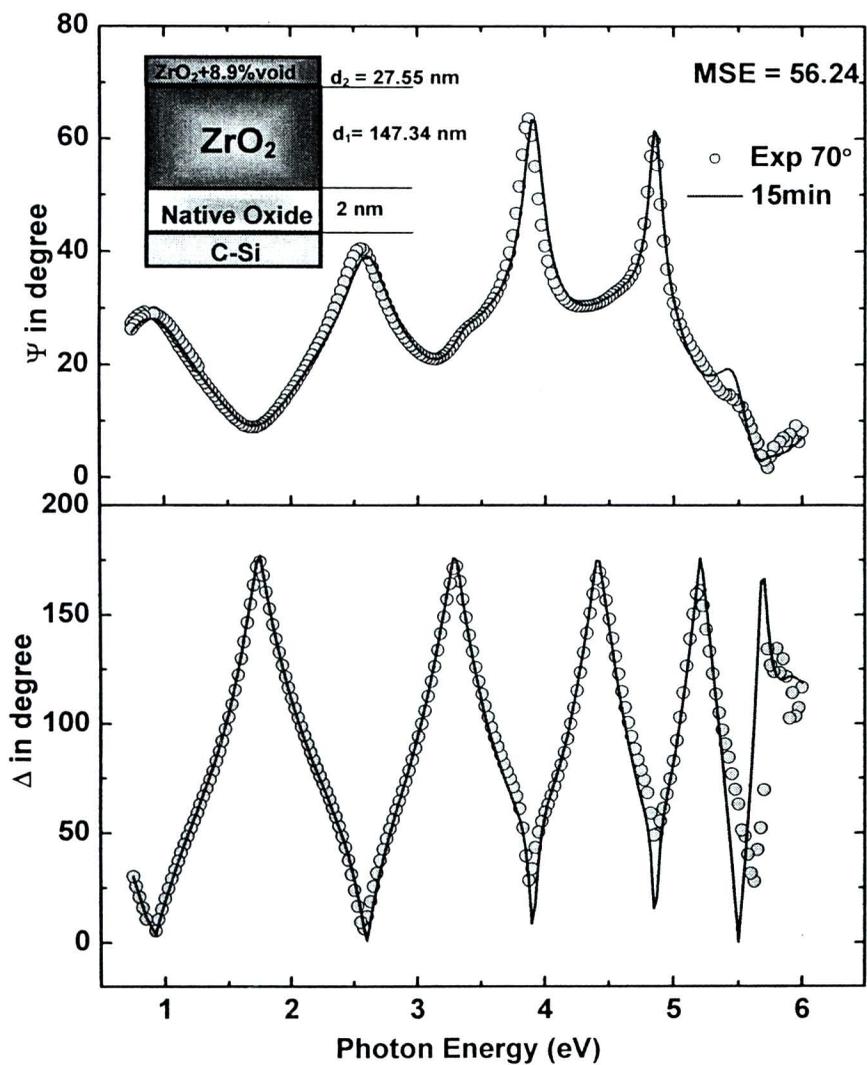
ภาพที่ 4.22

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



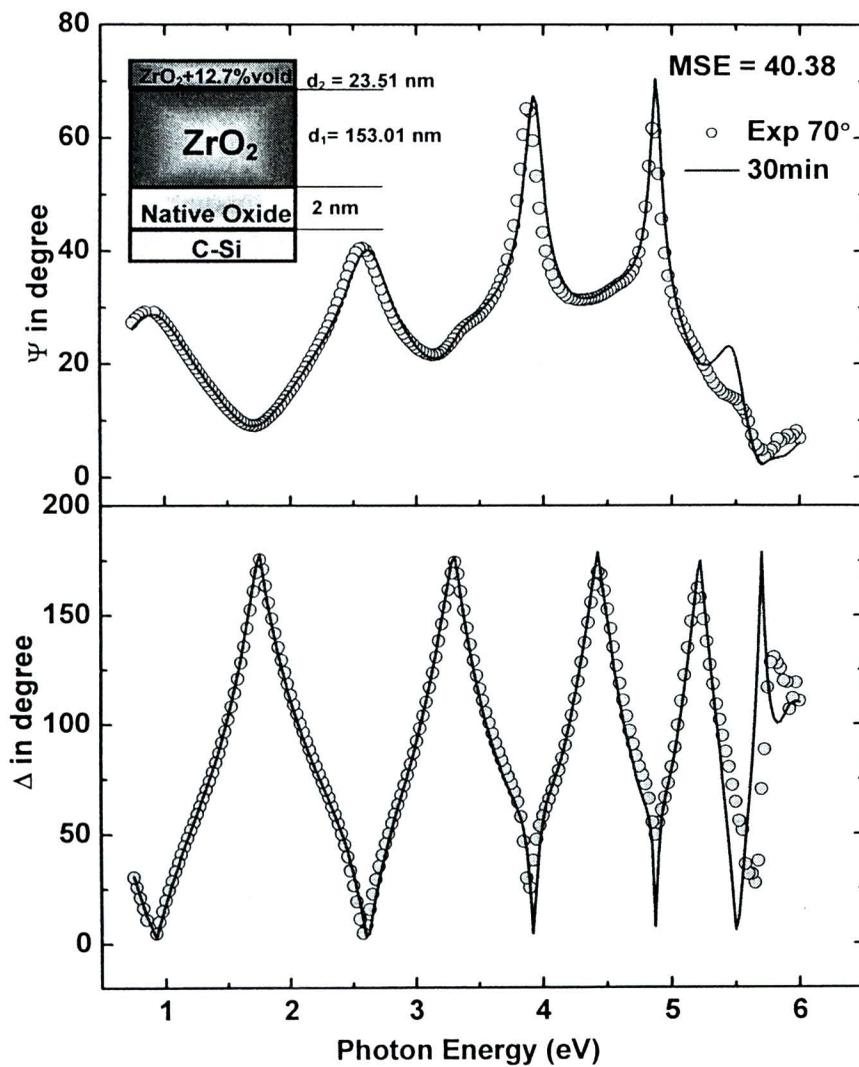
ภาพที่ 4.23

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปออสซิลโลสโคปอิมิตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 15 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



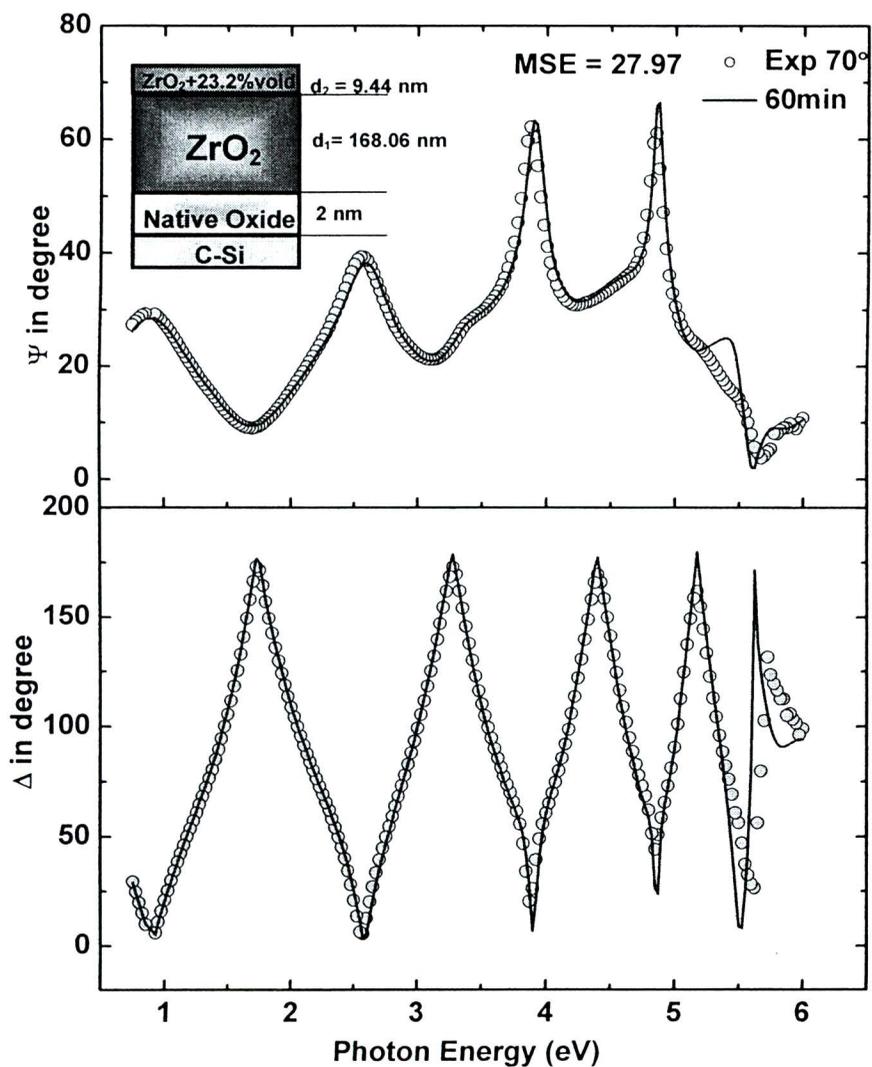
ภาพที่ 4.24

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



ภาพที่ 4.25

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างพลังงานโฟตอน 0.75-6 eV จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ (Tauc-Lorentz) 2 oscillator



ตารางที่ 4.11

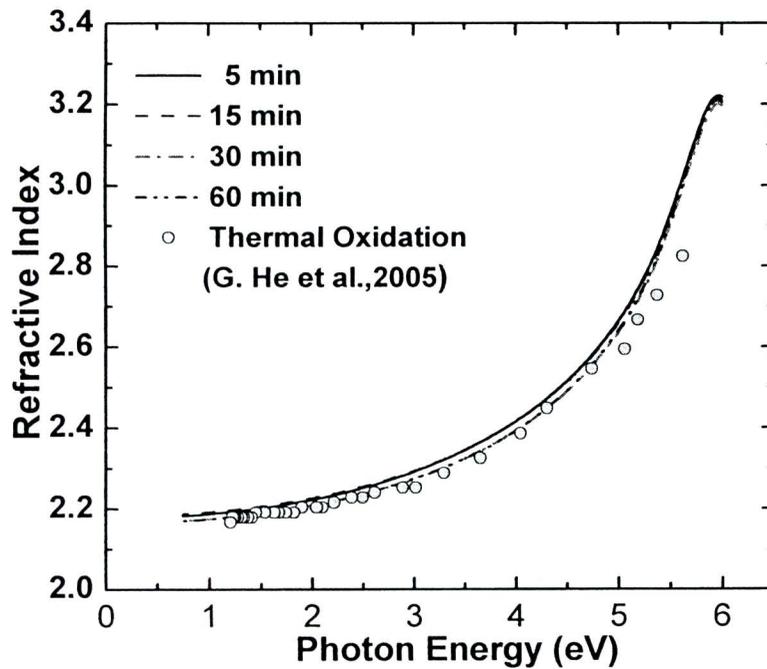
เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ฟิล์มโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้น และแบบจำลองทางแสงจากสมการทาวน์ลอเรนซ์ด้วย 2 ออสซิลเลเตอร์

Sample No.	Deposition Time (min)	Refractive	
		Index at 2.25 eV	Thickness(nm)
T1	5	2.23	169.48
T2	15	2.24	174.89
T3	30	2.22	176.53
T4	60	2.22	177.50

ภาพที่ 4.26 แสดงค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่อบด้วยเวลาต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าดัชนีหักเหที่พลังงานโฟตอน 2.25 eV อยู่ในช่วง 2.22-2.24 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน ที่ทำการอบฟิล์มในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (G. He et al., 2005) พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4.26

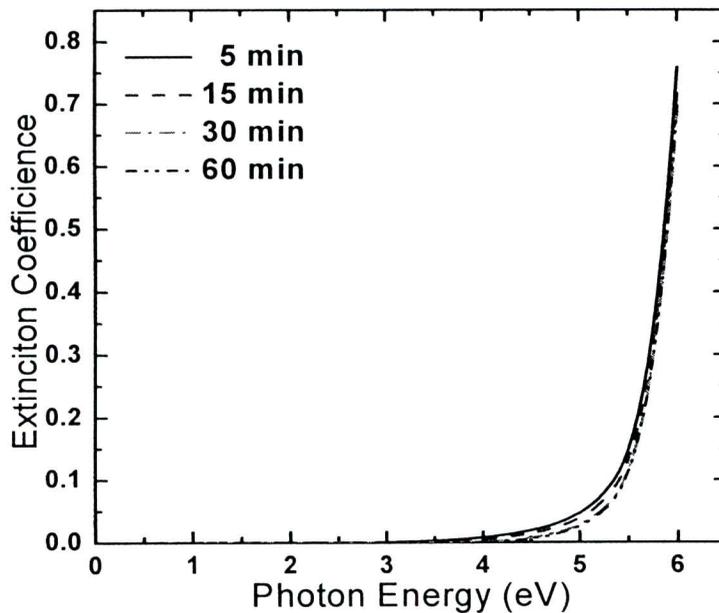
ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบ
ด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.27 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที พบว่า ในช่วงพลังงานโฟตอน 0.75-4 อิเล็กตรอน โวลต์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงพลังงานโฟตอนตั้งแต่ 4 อิเล็กตรอน โวลต์ ขึ้นไป ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงพลังงานโฟตอน 5 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นไป

ภาพที่ 4.27

ค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบ
ด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที



ในการคำนวณหาช่องว่างพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{1/2}$ กับ hv ดังภาพที่ 4.28 โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจากการนำค่าสัมประสิทธิ์การดับสูญของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE ไปแทนในสมการที่ (2.23) พบว่าฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกันมีค่าช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 5.25 eV ดังตารางที่ 4.12 โดยค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน ดังรายงานของ G. He และคณะ (G. He et al., 2005) ที่ทำการอบฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในบรรยากาศของออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600-900 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าช่องว่างพลังงานอยู่ในช่วง 4.13-4.59 eV และค่าช่องว่างพลังงานในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ L. Q. Zhu และคณะ (L. Q. Zhu et al., 2006) ที่ทำการอบฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในบรรยากาศของออกซิเจนและไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 และ 700 องศาเซลเซียส โดยมีค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5.06-5.18 eV ทั้งนี้ค่าช่องว่างพลังงานที่ได้กล่าวข้างต้นมีค่าต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงานของ Bulk เฟสโมโนคลินิก ที่มีค่าเท่ากับ 5.4 eV (B.

Kralik et al., 1998) เนื่องจากฟิล์มที่ได้จากการเคลือบอาจมีความบกพร่อง (Defect) จึงทำให้มีค่าช่องว่างพลังงานต่ำกว่าของ Bulk

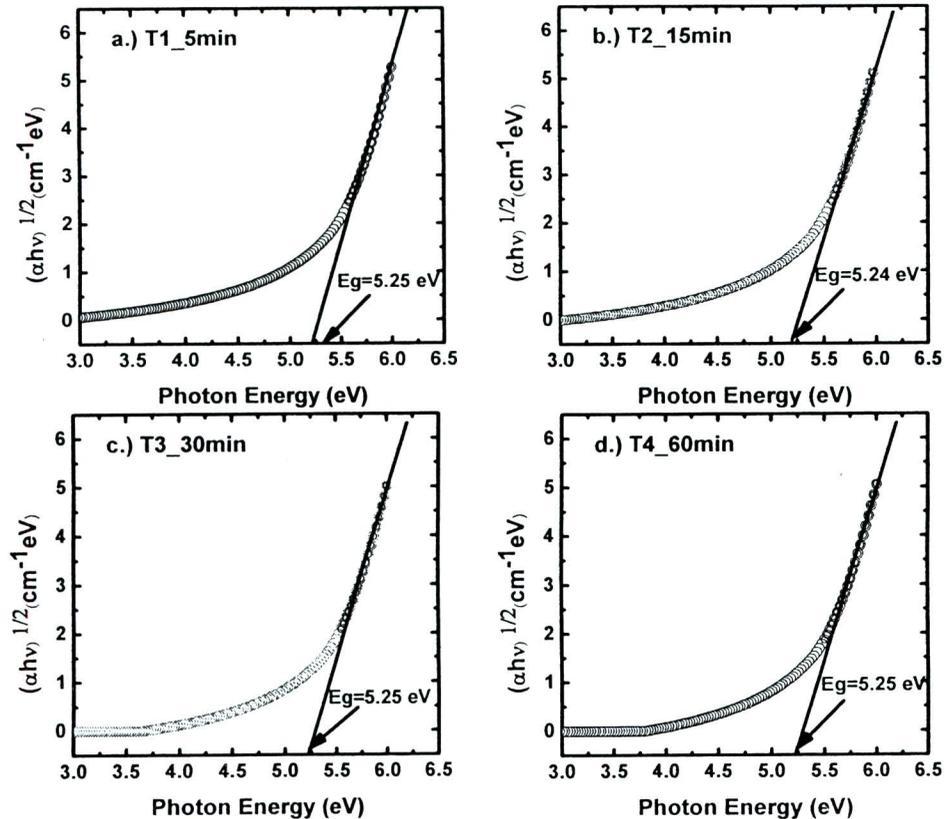
ตารางที่ 4.12

ช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยเวลาต่างกัน

Sample No.	Deposition Time (min)	Optical Bandgap	Thickness(nm)
T1	5	5.25	169.48
T2	15	5.24	174.89
T3	30	5.25	176.53
T4	60	5.25	177.50

ภาพที่ 4.28

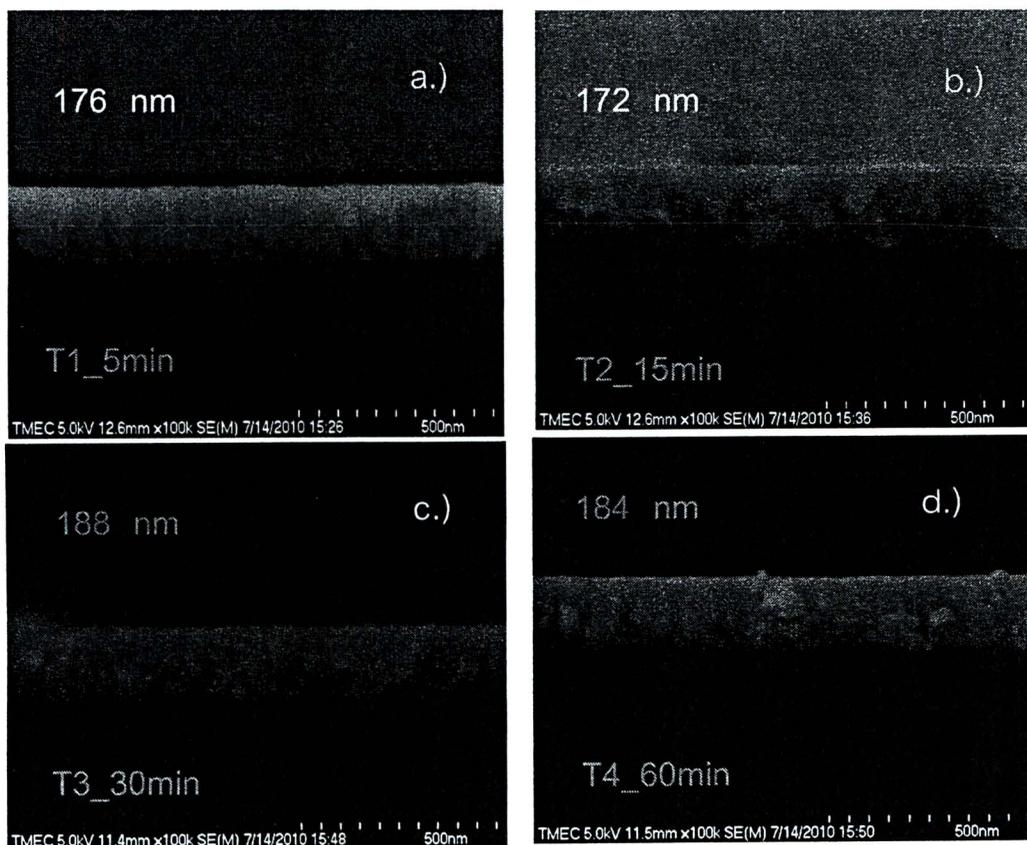
ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา a.) 5 b.) 15 c.) 30 และ d.) 60 นาที



หลังจากวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SE แล้ว จึงทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ความหนาของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM) ดังภาพที่ 4.29 พบว่า ความหนาของฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีความหนาเท่ากับ 176 172 188 และ 184 นาโนเมตร เมื่อทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 5 15 30 และ 60 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ สันนิษฐานว่าเมื่อเวลาในการอบฟิล์มนานขึ้นออกซิเจนสามารถแทรกตัวเข้าทำปฏิกิริยากับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดนาซัน ส่งผลทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ที่หนาเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM กับเทคนิค SE พบว่าความหนาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SE มีค่าใกล้เคียงกันกับความหนาจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FE-SEM ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ความหนาด้วยเทคนิค SE มีความหนาที่แตกต่างจากการวิเคราะห์ความหนาด้วยเทคนิค FE-SEM สูงสุดเพียง 6% ดังตารางที่ 4.13

ภาพที่ 4.29

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา a.) 5 b.) 15 c.) 30 และ d.) 60 นาที



ตารางที่ 4.13

เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FE-SEM และเทคนิค SE

Sample No	Deposition Time (min)	Thickness (nm)	
		FE-SEM	SE
T1	5	176	169
T2	15	172	174
T3	30	188	176
T4	60	184	177

4.3 การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์มบางป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflection coating: AR)

การเคลือบป้องกันการสะท้อนแสงเป็นการเคลือบเพื่อลดการสะท้อนแสงที่ไม่ต้องการบนผิวเลนส์ และเพิ่มปริมาณของแสงที่ผ่านเลนส์เข้าสู่ตามากขึ้น ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตา ในการเคลือบฟิล์มประเภทนี้จะประกอบด้วยชั้นฟิล์มที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำสลับกับชั้นฟิล์มที่มีค่าดัชนีหักเหสูง ในการทดลองตอนนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสง โดยฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารจากโรงงานอุตสาหกรรมเลนส์แว่นตา ซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ (Low-index) กับชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (High-index) สลับกันเป็นจำนวนทั้งหมด 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบฟิล์ม 3 เครื่อง โดยจะทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นฟิล์ม และตรวจสอบสภาวะการใช้งานของเครื่องเคลือบแต่ละเครื่องอีกเช่นกัน

ในการทดลองตอนนี้จะทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิค SE เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มในแต่ละชั้นได้เป็นอย่างดี และยังให้ค่าดัชนีหักเหตลอดทั้งช่วงความยาวคลื่นแสง ซึ่งในขั้นแรกของการวิเคราะห์จะทำการหาค่าดัชนีหักเหจากฟิล์มบางชั้นเดียว (SiO_2 , ZrO_2) ที่เคลือบลงบนกระจกที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ (Monitor glass) เพื่อหาแบบจำลองทางแสงและแบบจำลองทางกายภาพที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการสร้างแบบจำลองเพื่อหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์ม 5 ชั้น เพื่อป้องกัน

การสะท้อนแสง โดยตารางที่ 4.14 แสดงตัวอย่างของฟิล์มและระบบฟิล์มสำหรับป้องกันการสะท้อนแสงที่นำมาใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.14
ตัวอย่างฟิล์มบางสำหรับป้องกันการสะท้อนแสง

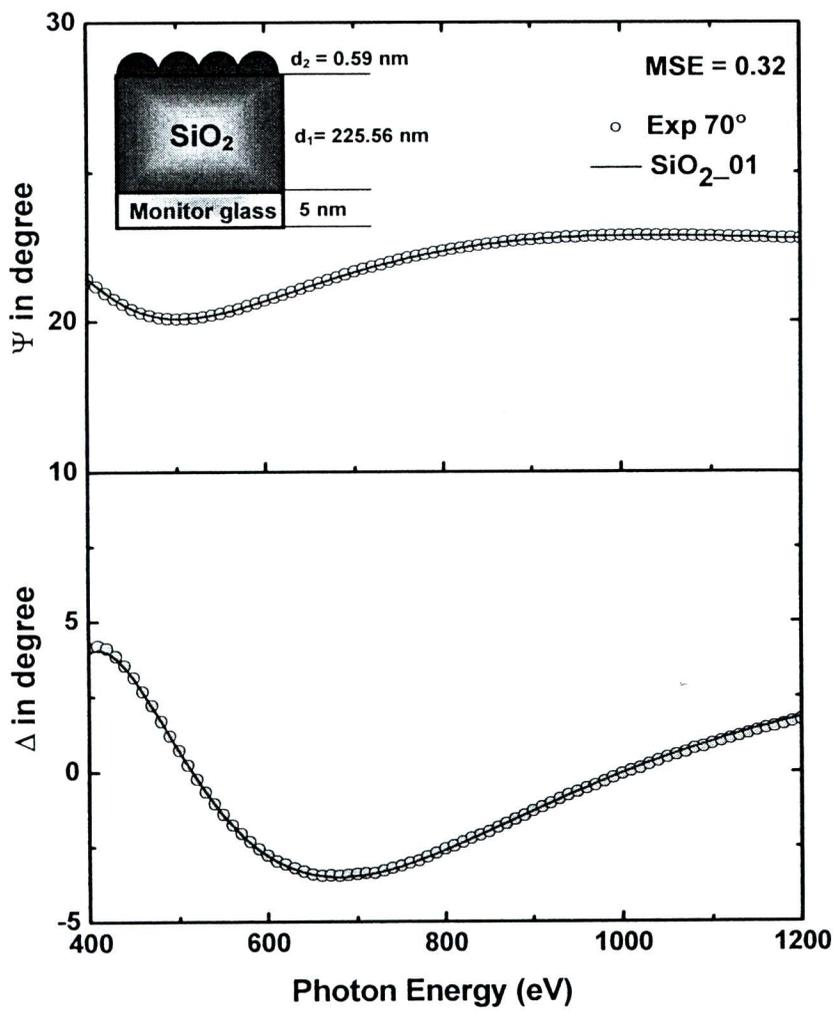
Sample No.	Coater No.	Number of Layer	Remark
SiO ₂ _01		1	-
ZrO ₂ _01	1	1	-
AR_01		5	SiO ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂
SiO ₂ _02		1	-
ZrO ₂ _02	2	1	-
AR_02		5	SiO ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂
SiO ₂ _03		1	-
ZrO ₂ _03	3	1	-
AR_03		5	SiO ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂ /ZrO ₂ /SiO ₂

4.3.1 การวิเคราะห์ฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂)

ในการทดลองตอนนี้จะทำการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มบาง SiO₂ ที่ทำการเตรียมจากเครื่องเคลือบ 3 เครื่อง โดยใช้สมการเซลล์มายด์ (Sellmier equation) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางแสงที่ใช้กับฟิล์ม SiO₂ อย่างแพร่หลาย จากภาพที่ 4.30 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลระหว่างผลการวัดกับแบบจำลองของฟิล์มบาง SiO₂ ที่ได้จากเครื่องเคลือบที่ 1 (Sample: SiO₂_01) โดยแบบจำลองสำหรับฟิล์ม SiO₂ ที่เหมาะสมนี้จะประกอบด้วยชั้นกระจกที่ใช้เป็นแผ่นรองรับ (Monitor glass) ที่มีความหนาประมาณ 5 นาโนเมตร ชั้นฟิล์ม SiO₂ ความหนา 225.56 นาโนเมตร และชั้นความขรุขระบนพื้นผิวที่มีความหนาเพียง 0.58 นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์ม SiO₂ โดยฟิล์มที่ได้มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.51 ที่ความยาวคลื่นแสง 550 นาโนเมตร ซึ่งจะมีค่าสูงกว่า Bulk material ของ SiO₂ ที่ทำการวิเคราะห์โดย Palik ดังภาพที่ 4.31

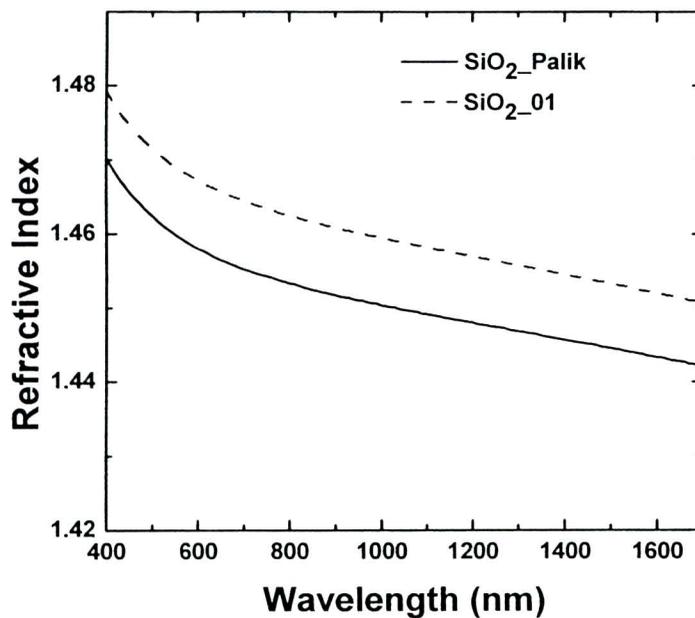
ภาพที่ 4.30

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปิกอีลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการเซลล์มายด์ (Sellmier equation)



ภาพที่ 4. 31

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้น
กับค่าดัชนีหักเหของ Bulk material ที่ทำการวิเคราะห์โดย Palik

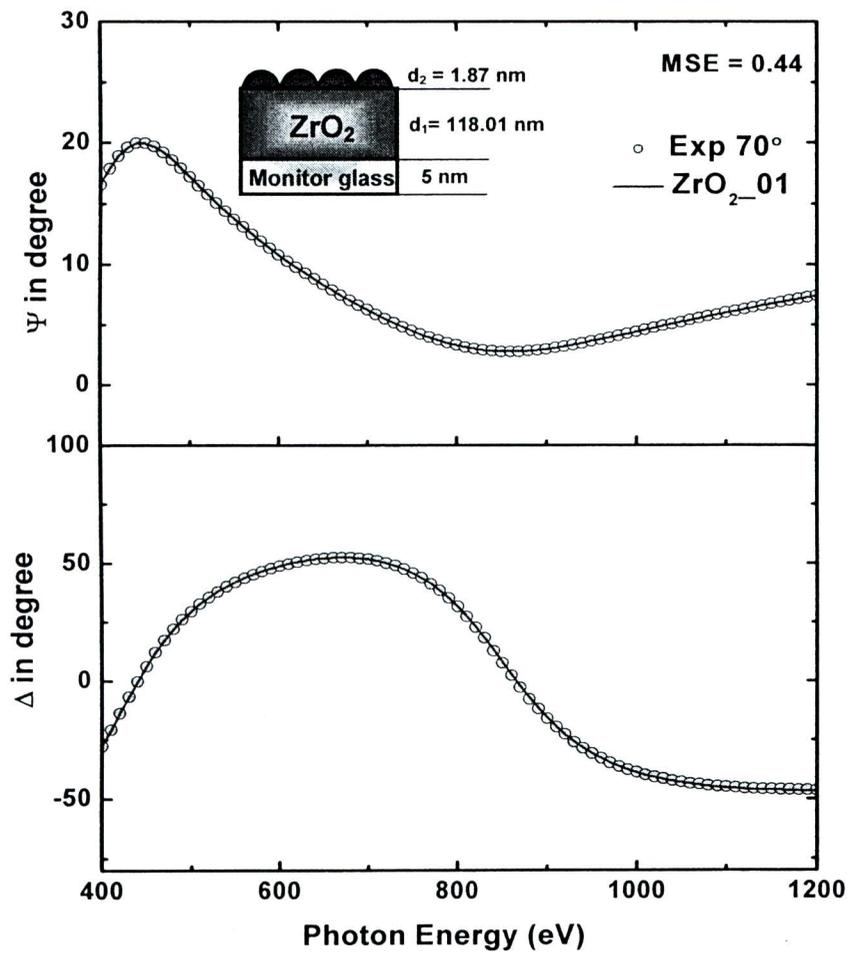


4.3.2 การวิเคราะห์ฟิล์มบางเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO₂)

จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ในหัวข้อที่ 4.1.1.2 พบว่าแบบจำลองทางแสงของคอร์ซีเป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 400-1200 นาโนเมตร ดังนั้น จึงนำแบบจำลองทางแสงดังกล่าวมาใช้เพื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้นบน Monitor glass ดังภาพที่ 4.32 จากการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดพบว่า สามารถทำการเปรียบเทียบ Curve fitting ได้ดี โดยมีค่า MSE เท่ากับ 0.44 ชั้นฟิล์มมีความหนา 118.01 นาโนเมตร และชั้นความขรุขระบนพื้นผิวมีความหนา 1.87 นาโนเมตร ฟิล์มมีความหนา 131 นาโนเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงาน AR coating ซึ่งเตรียมด้วยวิธีระเหยสารพบว่า มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากรายงานอ้างอิงที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกันและมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีสปัตเตอริง ดังภาพที่ 4.32

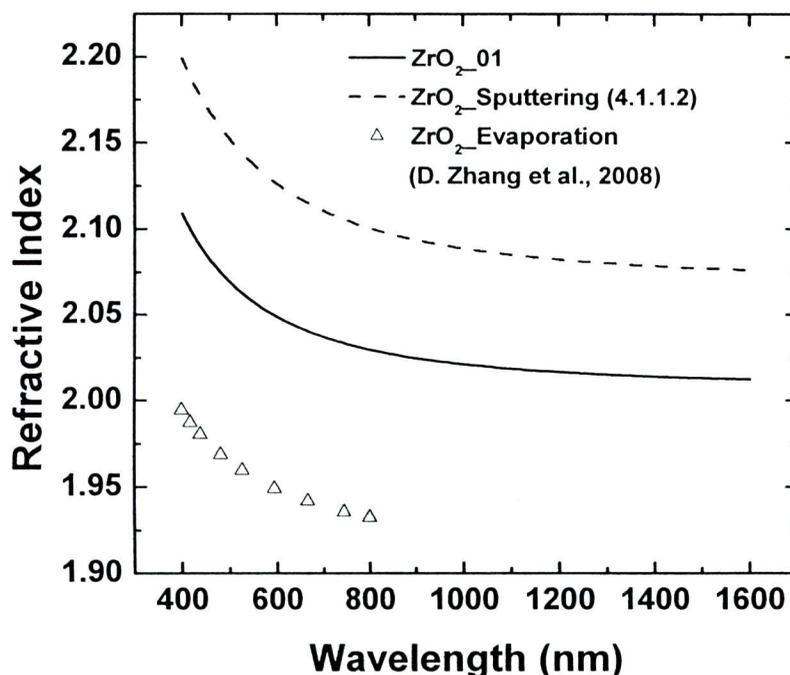
ภาพที่ 4.32

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างความยาวคลื่น 400-1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอีลิปโซมิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงจากสมการคอรซี (Cauchy equation)



ภาพที่ 4.33

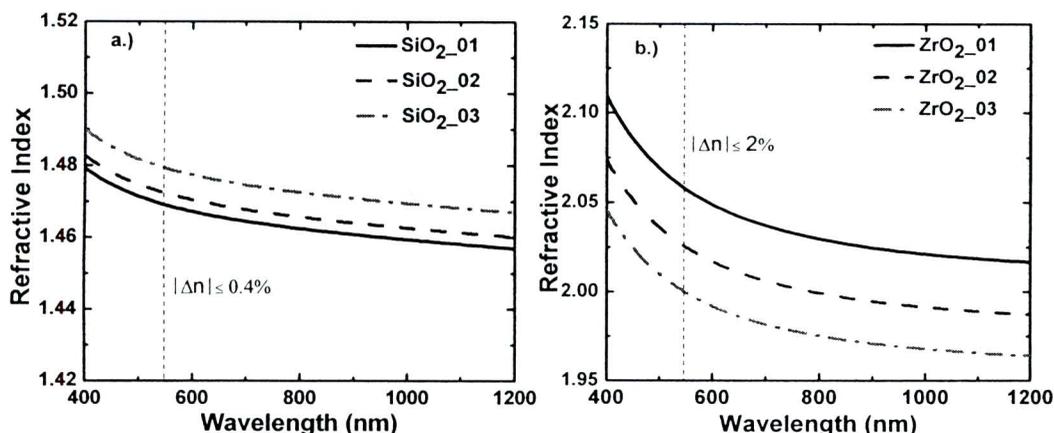
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นบน Monitor glass กับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ จากรายงานอ้างอิงที่เตรียมด้วยวิธีระเหยสารและวิธีสปัตเตอร์ริง



เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่เคลือบหนึ่งชั้นจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง ดังภาพที่ 4.34 พบว่า ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหเพียง 0.4% ส่วนฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหไม่เกิน 2% และเมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มดังตารางที่ 4.15 พบว่า ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามมีเปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างของความหนาสูงสุดไม่เกิน 2% ดังนั้น จะเห็นได้ว่าทั้งความหนาและค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่องมีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4.34

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์
b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์



ตารางที่ 4.15

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหและความหนาของแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้น
จากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้งสามเครื่อง

Coater No.	SiO ₂		ZrO ₂	
	d(nm)	n at 550 nm	d(nm)	n at 550 nm
1.	226.1	1.4691	119.9	2.0574
2.	232.4	1.4724	125.6	2.0251
3.	235.9	1.4794	130.9	1.9996

4.3.3 การวิเคราะห์ฟิล์มบาง 5 ชั้น

ในการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง 5 ชั้น จะพิจารณาจากการสร้างแบบจำลองที่เกิดจากการนำค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบ 1 ชั้น บน Monitor glass มาทำการสลับชั้นเป็นจำนวนทั้งหมด 5 ชั้น โดยแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับฟิล์มบาง 5 ชั้น เกิดจากการแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหในแต่ละชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ

เป็นฟิล์ม 5 ชั้น ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียม ไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบบน Monitor glass 1 ชั้น โดยแบบจำลองที่นำมาใช้วิเคราะห์มีทั้งหมด ด้วยกัน 4 แบบ ดังภาพที่ 4.35 แสดงแบบจำลองของฟิล์ม 5 ชั้น ซึ่งเกิดจากสมมติฐานว่า

a.) m1 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถเคลือบทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์ม เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้อย่างเสถียร (Stable) ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองจึงทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มชนิดเดียวกัน นั้นหมายความว่า ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ ในชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า จะมีค่าดัชนีหักเหเหมือนกัน และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ ทำการเคลือบในชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าดัชนีหักเหเหมือนกัน

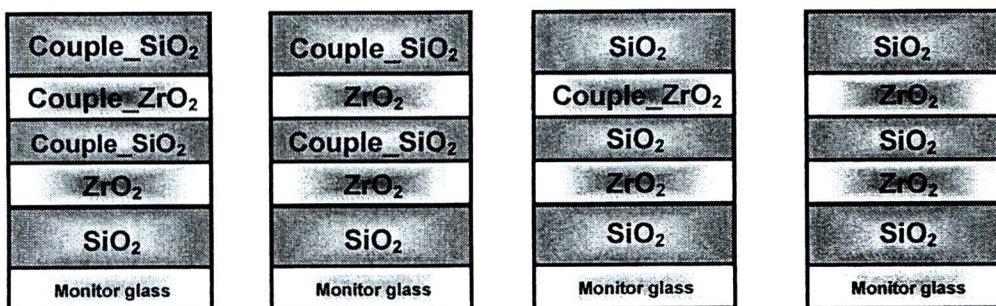
b.) m2 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถเคลือบฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ได้อย่างเสถียร จึงทำการ Couple ชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ ส่วนชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์นั้นอาจมีความ ไม่เสถียรในการเคลือบ ซึ่งอาจส่งผลให้แต่ละชั้นของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเห ต่างกัน

c.) m3 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถเคลือบฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้อย่าง เสถียร จึงทำการ Couple ชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ส่วนชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์นั้นอาจ มีความไม่เสถียรในการเคลือบ ซึ่งอาจส่งผลให้แต่ละชั้นของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าดัชนีหักเห ต่างกัน

d.) m4 ในกระบวนการเคลือบฟิล์มไม่สามารถเคลือบทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์ม เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ให้มีความเสถียร ดังนั้นฟิล์มแต่ละชั้นอาจมีค่าดัชนีหักเหต่างกัน

ภาพที่ 4.35

แบบจำลองฟิล์มบาง 5 ชั้น สำหรับเคลือบป้องกันการสะท้อนแสง



a.) m1

b.) m2

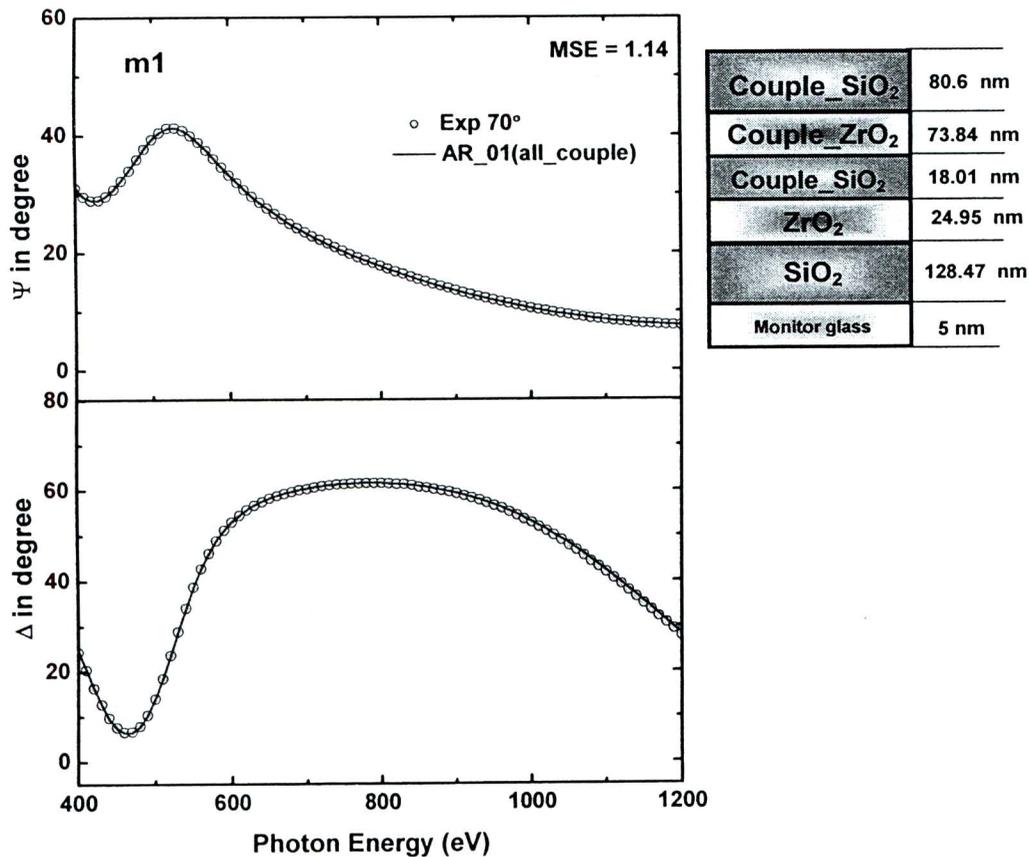
c.) m3

d.) m4

ภาพที่ 4.36 แสดงการเปรียบเทียบค่า (Ψ , Δ) จากการสร้างแบบจำลอง m1 (ภาพที่ 4.35a) กับผลการวัด พบว่าสามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า MSE เท่ากับ 1.14 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 128.47 18.01 และ 80.6 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 24.95 และ 73.84 นาโนเมตร ตามลำดับ

ภาพที่ 4.36

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปออปติคัลโพลาไรซ์มิเตอร์มุมตกกระทบ 70 องศา ของตัวอย่างฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ Couple ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

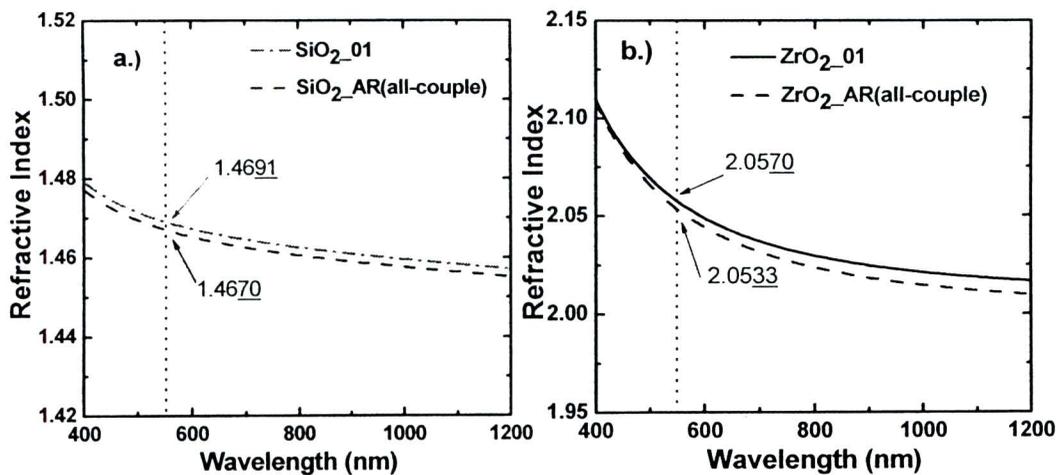


เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในฟิล์มบาง 5 ชั้น กับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น พบว่า ค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีความแตกต่างเพียง 0.002 ดังภาพที่ 4.37a.) เช่นเดียวกับ ค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น โดยมีความแตกต่างกันเพียง 0.004 ดังภาพที่ 4.37b.) ดังนั้น แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองหนึ่งที่สามารถนำมาใช้หาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง 5 ชั้น เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น

ภาพที่ 4.37

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

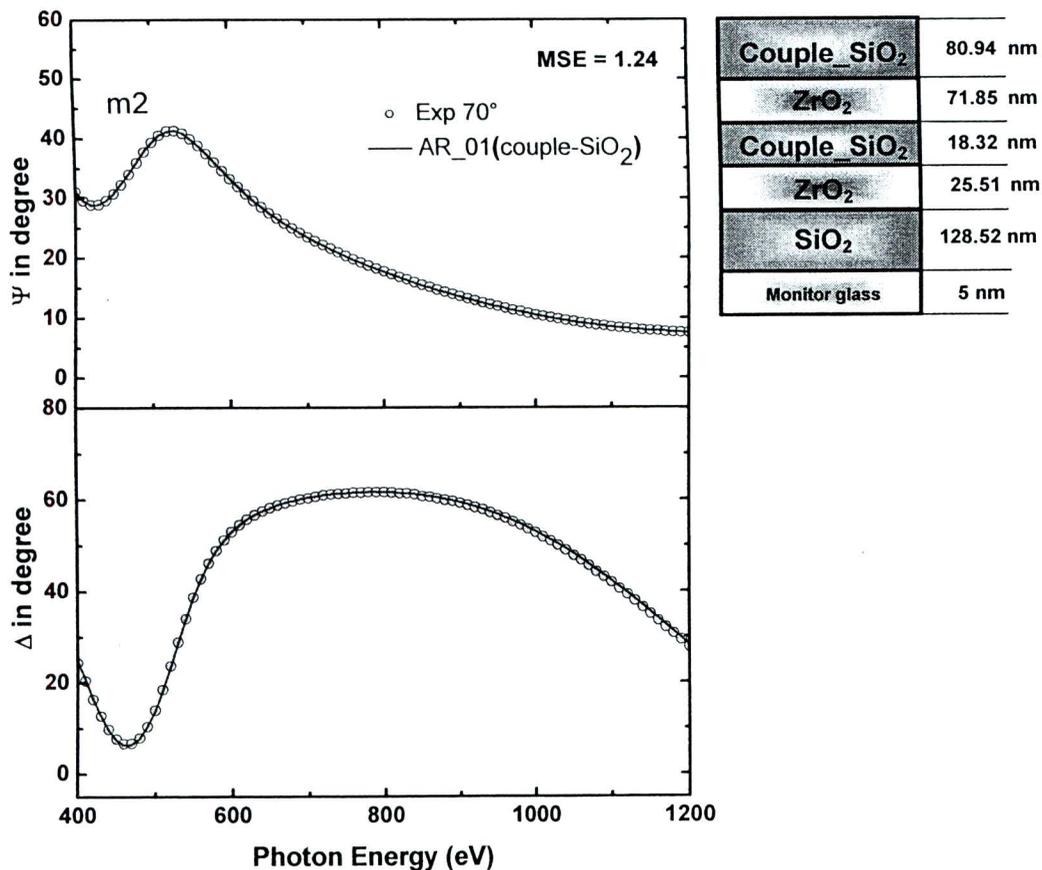


เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า (Ψ, Δ) จากการสร้างแบบจำลอง m2 ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหเฉพาะชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ (ภาพที่ 4.35b) กับผลการวัด ดังภาพที่ 4.38 พบว่า สามารถทำการเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้ดีเช่นเดียวกับแบบจำลองแรก โดยมีค่า MSE เท่ากับ 1.24 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 128.53 18.32 และ 80.94 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์ม

เซอริโคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 25.51 และ 71.85 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ของฟิล์ม 5 ชั้นกับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ของฟิล์ม 1 ชั้น พบว่า มีค่าดัชนีหักเหเท่ากัน ดังภาพที่ 4.39 a.) โดยค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบเป็นชั้นที่สองและชั้นที่สี่ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น มีค่าเท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอริโคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์ม 1 ชั้น ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.39 b.) พบว่ามีค่าใกล้เคียงโดยมีค่าแตกต่างกันเพียง 0.001 ดังนั้น จะเห็นได้ว่า แบบจำลองนี้ก็เป็นแบบจำลองหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น

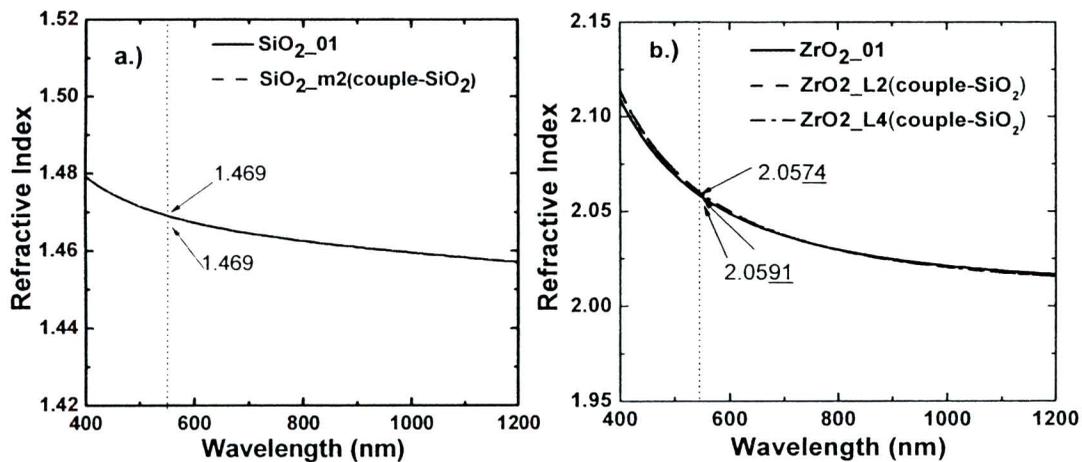
ภาพที่ 4.38

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงระหว่างในช่วงความยาวคลื่น 400 -1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปออปติคัลโพลาไรซ์มิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบาง 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยการ couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์



ภาพที่ 4.39

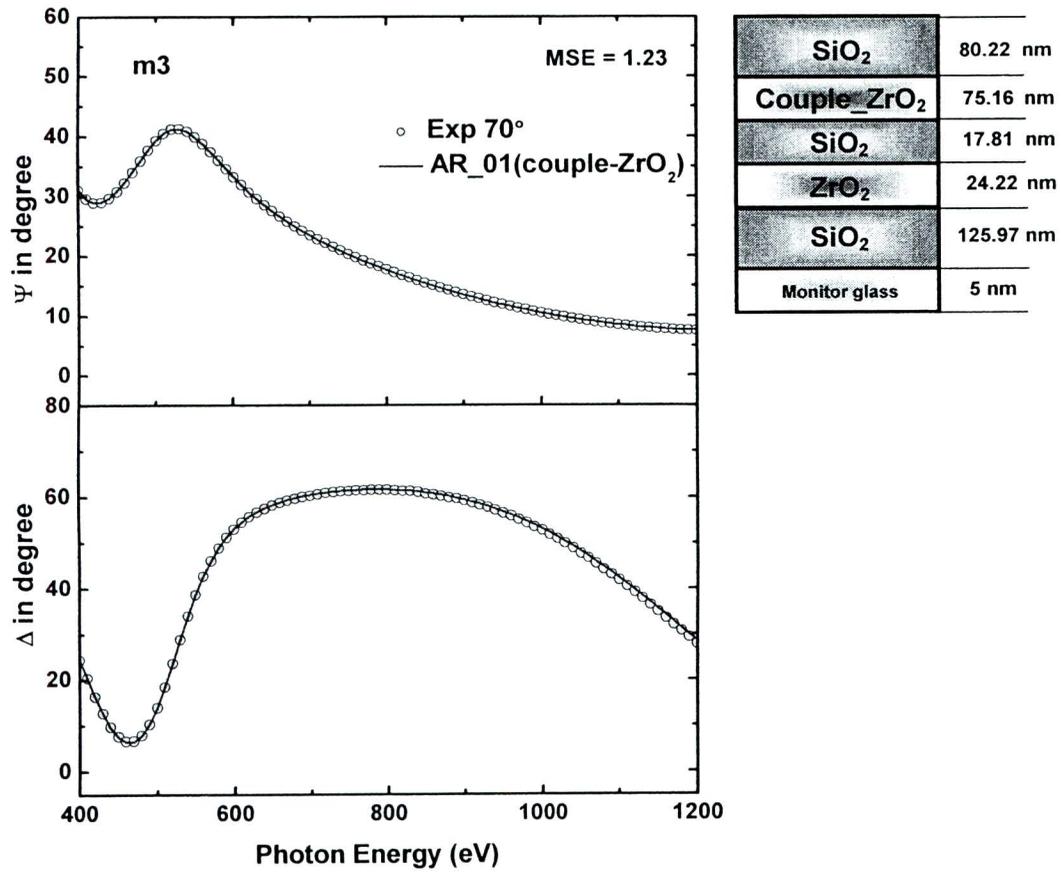
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์



เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า (Ψ, Δ) จากการสร้างแบบจำลอง m3 (4.35c) กับผลการวัด ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหเฉพาะชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์ ดังภาพที่ 4.40 พบว่า สามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี มีค่า MSE เท่ากับ 1.23 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 125.97 17.81 และ 80.22 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์ชั้นที่สอง และชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 24.22 และ 75.16 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อสังเกตค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบในชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า กับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ 1 ชั้น ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร พบว่า ค่าดัชนีหักเหมีความแตกต่างกันถึง 0.02 ดังภาพที่ 4.41 a.) ส่วนความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์ 1 ชั้น กับฟิล์มเซอร์โคเนียไดออกไซด์ในชั้นฟิล์มบาง 5 ชั้น มีค่าเท่ากับ 0.004 ซึ่งเป็นค่าดัชนีหักเหที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.41 b.) ดังนั้นแบบจำลองนี้ไม่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มที่ทำการเคลือบ 5 ชั้น เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในชั้นฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าแตกต่างจากค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้น

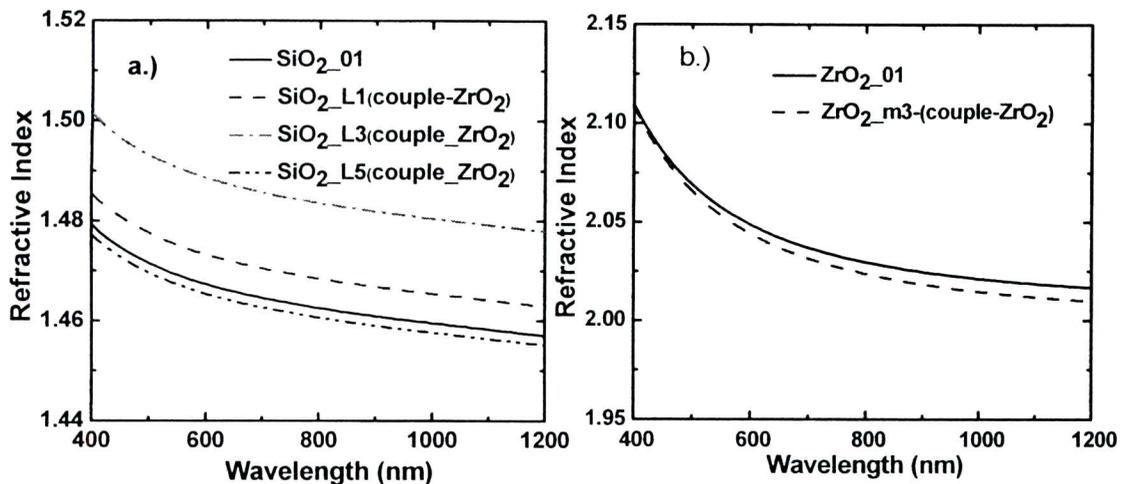
ภาพที่ 4.40

เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปอิลิปโซมิเตอร์ มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์มบาง 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4.41

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

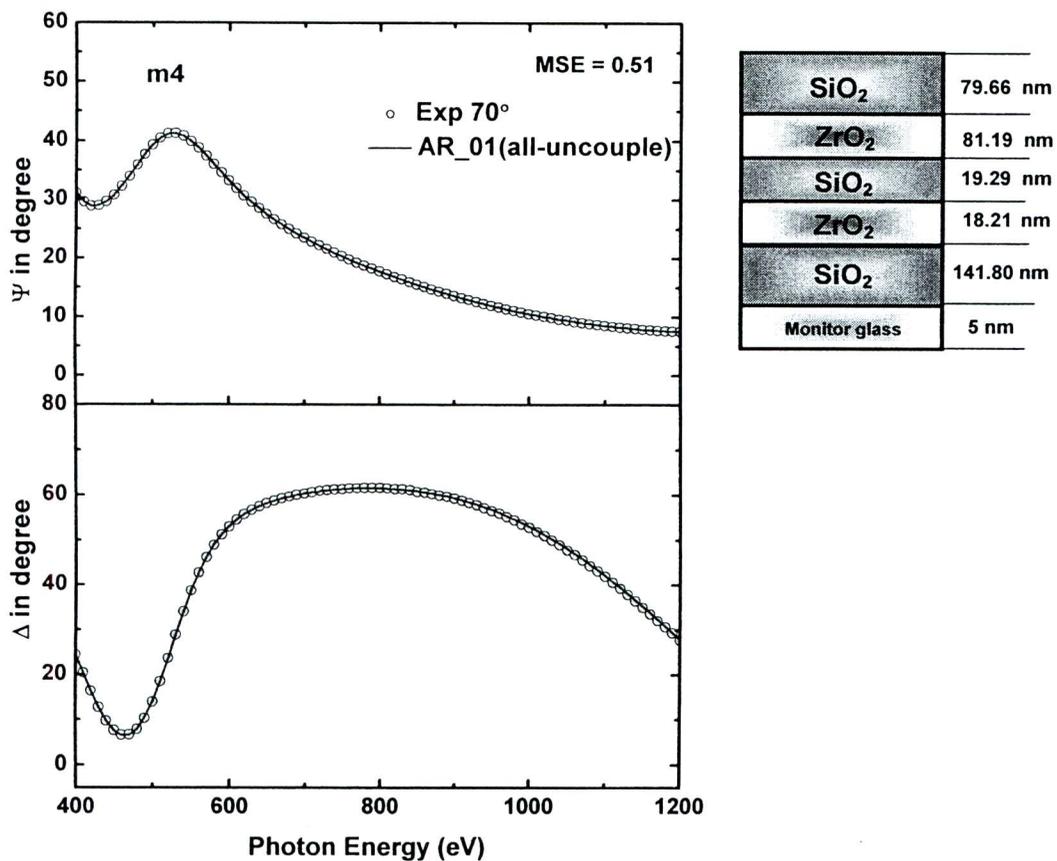


จากผลการเปรียบเทียบค่า (Ψ, Δ) ที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง m4 (ภาพ 4.35d) กับ ผลการวัด ซึ่งได้จากแบบจำลองที่ไม่ทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ และชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 4.42 พบว่าสามารถเปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลการวัดได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า MSE ต่ำสุด เท่ากับ 0.51 ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ชั้นที่หนึ่ง ชั้นที่สาม และชั้นที่ห้า มีค่าเท่ากับ 141.80 19.29 และ 79.66 นาโนเมตร ตามลำดับ และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ชั้นที่สองและชั้นที่สี่มีค่าเท่ากับ 18.21 และ 81.19 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น กับฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4.43 a.) พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในแต่ละชั้นฟิล์มมีความแตกต่างกัน 0.095 ซึ่งถือว่าค่าดัชนีหักเหในแต่ละชั้นฟิล์มมีความแตกต่างกันอย่างมาก และเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ 1 ชั้น กับฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในชั้นฟิล์ม 5 ชั้น พบว่ามีค่าแตกต่างกันถึง 0.028 ดังภาพที่ 4.43 b.) ดังนั้น แบบจำลองนี้เป็นอีกแบบจำลองหนึ่งที่ไม่มีความเหมาะสมเพื่อทำการ

วิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์ม 5 ชั้น เนื่องจากมีความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นและในชั้นของฟิล์มบาง 5 ชั้น

ภาพที่ 4.42

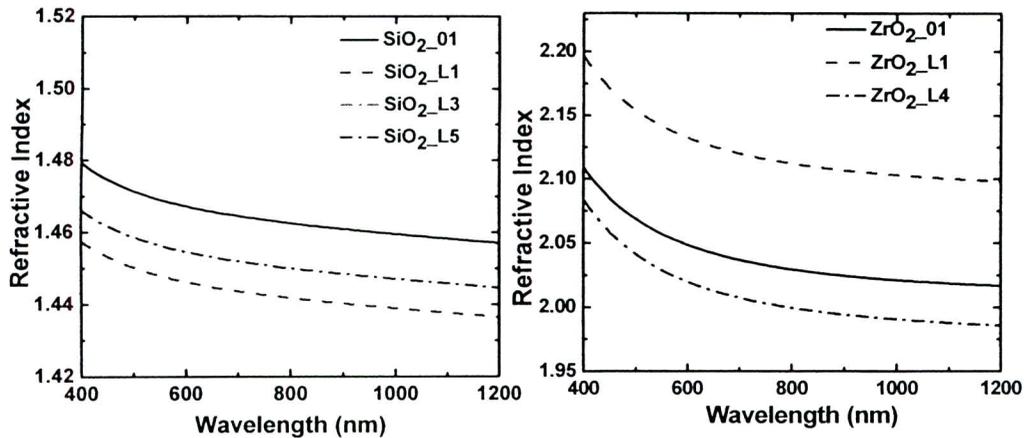
เปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Ψ) และการเปลี่ยนแปลงเฟส (Δ) ของแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1200 nm จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปออปติคัลโพลาไรซ์มุมตกกระทบ 70 องศา ของฟิล์ม 5 ชั้น ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่หนึ่ง โดยทำการสร้างจากแบบจำลองด้วยการไม่ Couple ค่าดัชนีหักเหทั้งฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 4.43

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์มบาง 5 ชั้นกับฟิล์มที่เคลือบ 1 ชั้น โดยไม่ทำการ Couple ทั้งค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

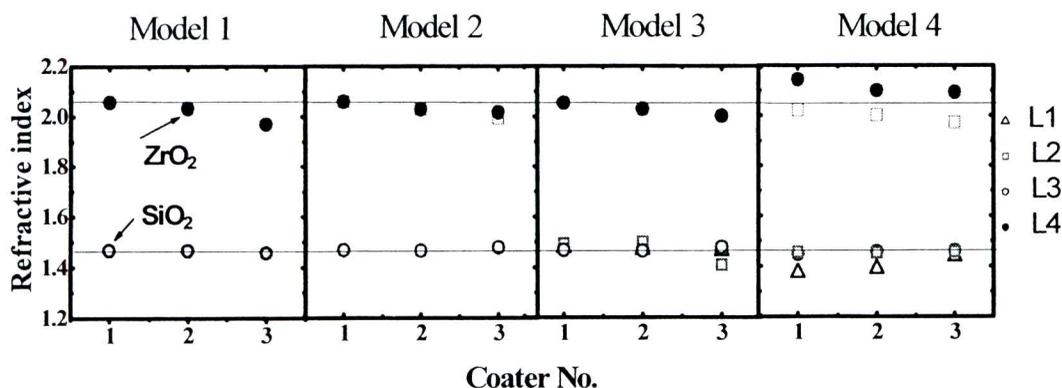


จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหและความหนาของฟิล์มจากการใช้แบบจำลองทั้ง 4 แบบ พบว่า แบบจำลอง m1 ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มชนิดเดียวกันในแต่ละชั้นฟิล์ม และแบบจำลอง m2 ซึ่งทำการ Couple ค่าดัชนีหักเหเฉพาะชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสม แต่ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาโดยละเอียด พบว่า แบบจำลอง m2 นั้นมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเคลือบ 1 ชั้นกับชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในระบบฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าเท่ากัน และค่าดัชนีหักเหที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ 1 ชั้น ก็มีค่าใกล้เคียงกับชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ในระบบฟิล์ม 5 ชั้น

หลังจากทดลองหาแบบจำลองทางแสงที่มีความเหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์ม 5 ชั้นที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 1 แล้ว จึงทำการทดลองหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับระบบฟิล์ม 5 ชั้นที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 2 และเครื่องเคลือบที่ 3 โดยภาพที่ 4.44 แสดงการเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบ โดยสังเกตเห็นได้ว่า แบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการหาค่าดัชนีหักเหและความหนาของระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบทั้ง 3 เครื่องเนื่องจากค่าดัชนีหักเหของฟิล์มชนิดเดียวกันในแต่ละชั้นฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 4.44

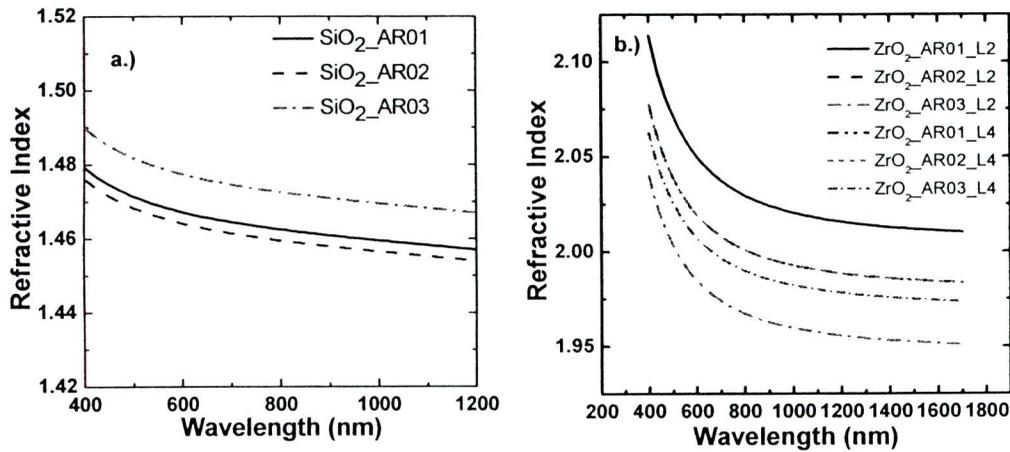
เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ใน
ระบบฟิล์มบาง 5 ชั้น จากการสร้างแบบจำลองทั้ง 4 แบบ



เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์และฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้ง 3 เครื่อง ที่ทำการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ 2 ดังภาพที่ 4.44 พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบที่ 2 มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงมากกว่าค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 3 แสดงดังภาพที่ 4.45a.) สำหรับภาพที่ 4.45b.) แสดงค่าดัชนีหักเหของชั้นฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 พบว่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบทั้งสามเครื่อง มีค่าดัชนีหักเหไม่ใกล้เคียงกัน แต่ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ที่เคลือบจากเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2 มีค่าดัชนีหักเหเท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่ 2 และชั้นที่ 4 ที่เคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 3 ที่มีค่าดัชนีหักเหไม่เท่ากัน ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่าดัชนีหักเหแต่ละชั้นฟิล์มของระบบฟิล์ม 5 ชั้น จะพบว่าเครื่องเคลือบที่ 3 มีค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่แตกต่างจากเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 1 และเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 2

ภาพที่ 4. 45

เปรียบเทียบค่าดัชนีหักเหของฟิล์มที่ทำการ Couple เฉพาะค่าดัชนีหักเหของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์จากเครื่องเคลือบที่ 1 (AR_01) เครื่องเคลือบที่ 2 (AR_02) และเครื่องเคลือบที่ 3 (AR_03) โดย a.) ฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ b.) ฟิล์มเซอร์โคเนียมชั้นที่สอง (L2) และชั้นที่สี่ (L4)

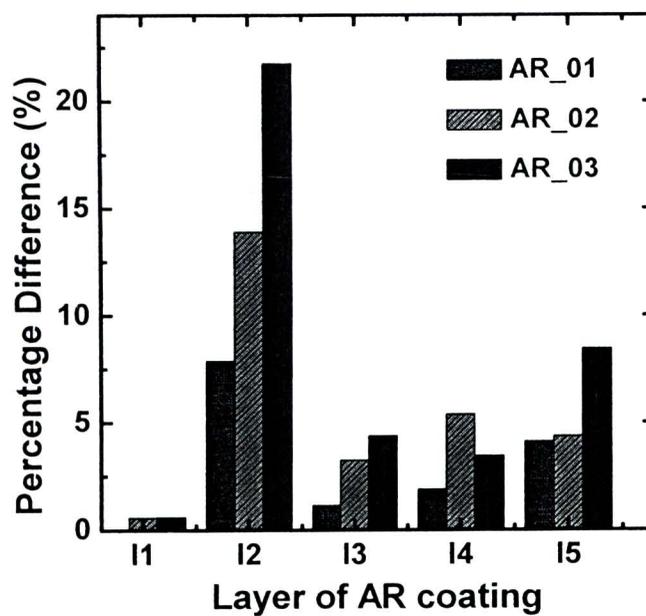


ตารางที่ 4.16 แสดงความหนาในแต่ละชั้นฟิล์มของระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบฟิล์มด้วยเครื่องเคลือบทั้ง 3 พบว่า ความหนาในแต่ละชั้นฟิล์มและความหนาโดยรวมจากเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 3 มีความหนาที่แตกต่างจากความหนาในแต่ละชั้นฟิล์มและความหนาโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4.46 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนา โดยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนาจากเครื่องเคลือบที่สามมีความของชั้นฟิล์มที่ 2 และชั้นฟิล์มที่ 5 มีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ทำการเคลือบฟิล์มจากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 2 ได้อย่างชัดเจน ดังนั้น ในการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องเคลือบฟิล์มด้วยการวิเคราะห์ความหนาและค่าดัชนีหักเหของแต่ละชั้นฟิล์ม พบว่าเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 3 น่าจะมีปัจจัยที่ส่งฟิล์ม 5 ชั้น มีค่าดัชนีหักเหและความหนาที่แตกต่างจากฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 2

ตารางที่ 4.16
 เปรียบเทียบความหนาแต่ละชั้นฟิล์มในระบบฟิล์ม 5 ชั้น ที่เคลือบฟิล์ม
 จากเครื่องเคลือบทั้ง 3 เครื่อง

Coater No.	Films Thickness (nm)					Total
	SiO ₂ _L1	ZrO ₂ _L2	SiO ₂ _L3	ZrO ₂ _L4	SiO ₂ _L5	
AR_01	128.53	25.51	18.32	71.85	80.93	325.15
AR_02	127.84	23.84	17.30	77.13	80.72	327.49
AR_03	129.33	33.71	19.34	70.71	91.51	344.61

ภาพที่ 4.46
 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความหนาของฟิล์ม 5 ชั้น ที่ทำการเคลือบจากเครื่อง
 เคลือบฟิล์มเครื่องที่ 1 (AR_01) เครื่องที่ 2 (AR_02) และเครื่องที่ 3 (AR_03)



ทั้งนี้ การตรวจสอบคุณภาพของฟิล์ม 5 ชั้น เพื่อป้องกันการสะท้อนแสงนั้น จะพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง ดังภาพที่ 4.47 a.) พบว่า สเปกตรัมค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มจากเครื่องเคลือบเครื่องที่ 3 มีความแตกต่างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2 แต่เนื่องจากฟิล์ม 5 ชั้น ถูกนำมาใช้งานในช่วงตามองเห็น จะพิจารณาเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็น ดังภาพที่ 4.47 b.) พบว่า ฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มทั้ง 3 เครื่องมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ใกล้เคียงกัน ซึ่งในส่วนของ การนำฟิล์ม 5 ชั้น มาใช้งานเพื่อป้องกันการสะท้อนแสงนั้นฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบฟิล์มเครื่องที่ 3 ก็ยังคงสามารถมีประสิทธิภาพในการป้องกันการสะท้อนแสงได้ดีเทียบเท่ากับฟิล์มที่ทำการเคลือบจากเครื่องเคลือบที่ 1 และเครื่องเคลือบที่ 2

ภาพที่ 4.47

เปรียบเทียบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง 5 ชั้น จากเครื่องเคลือบที่ 1 (AR_01) เครื่องเคลือบที่ 2 (AR_02) และเครื่องเคลือบที่ 3 (AR_03) a.) สเปกตรัมเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสง
b.) เปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านเฉลี่ยในช่วงตามองเห็นและเปอร์เซ็นต์ค่าการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

