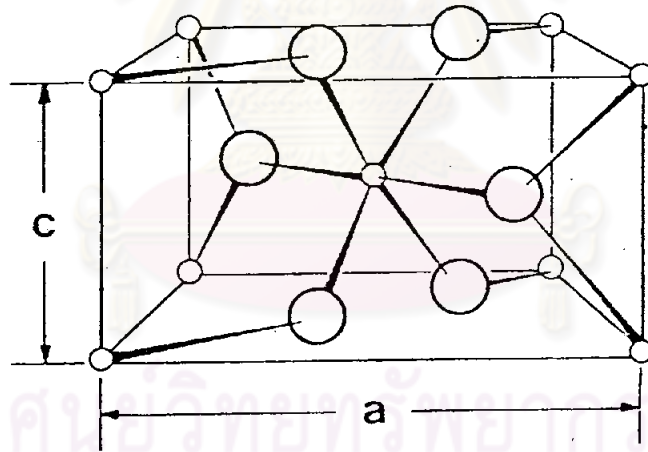




การเตรียมและคุณสมบัติของดีบุกออกไซด์

ดีบุกออกไซด์มีโครงสร้างผลึก (crystal structure) แบบ tetragonal rutile โดยมี space group แบบ D_{4h}^{14} หรือ $P4_2/mnm$ ซึ่งรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก. ในหนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) มีอะตอม 6 อะตอม โดยมีอะตอมของดีบุก 2 อะตอม อะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม⁽²⁵⁾ ดังรูปที่ 3.1 แต่ละอะตอมของดีบุกจะอยู่ตรงจุดศูนย์กลาง (center) ของรูป octahedron ที่มีอะตอมของออกซิเจนทั้ง 6 อยู่ที่มุม (โดยประมาณ) และอะตอมของออกซิเจนแต่ละอะตอมจะมีอะตอมของดีบุก 3 อะตอม อยู่ที่มุมของสามเหลี่ยมด้านเท่าล้อมรอบอยู่ ความยาวของแกน $a = b = 0.4737 \text{ nm}$ ความยาวของแกน $c = 0.3185 \text{ nm}$ อัตราส่วน $c/a = 0.673$ ⁽²⁶⁾ รัศมีของไอออนของ O^{-2} และ Sn^{+4} เป็น 1.40 และ 0.71 nm ตามลำดับ⁽²⁷⁾



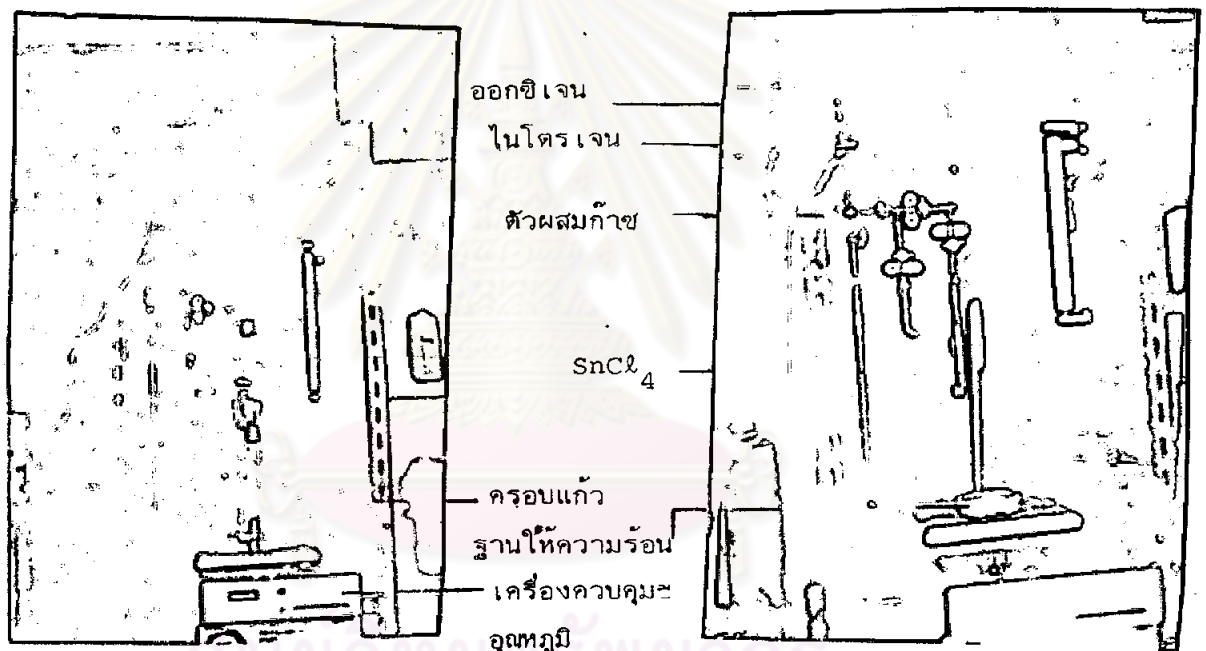
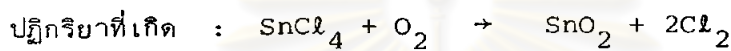
รูปที่ 3.1 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกของดีบุกออกไซด์ วงกลมโตแทนอะตอมของออกซิเจน ส่วนวงกลมเล็กแทนอะตอมของดีบุก⁽²⁵⁾

ดีบุกออกไซด์ที่ศึกษากันโดยทั่วไปเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาของสารประกอบของดีบุกต่างๆ กับ สารออกซิโดซ์บางชนิด เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน เป็นต้น⁽²⁸⁾⁻⁽³³⁾ ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ย่อมขึ้นอยู่กับวิธีการที่เตรียม ในการเตรียมฟิล์มบาง (thin film) ของดีบุกออกไซด์ วิธีการเตรียม มีหลายอย่าง เช่น spray pyrolysis⁽³⁴⁾⁻⁽³⁶⁾ การระเหยในสุญญากาศ (vacuum evaporation)⁽³⁷⁾⁻⁽³⁸⁾ reactive sputtering⁽³⁹⁾ dc glow discharge⁽⁴⁰⁾ และวิธีฉาบ

ไอเคมี (chemical vapour deposition) (41)-(44)

3.1 การเตรียมดีบุกออกไซด์โดยวิธีฉาบไอเคมี (CVD)

เครื่องมือที่ใช้เตรียมดังรูปที่ 3.2 วิธีการใช้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นตัวพาไอของดีบุกคลอไรด์จากขวดบรรจุสารมาผสมกับก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ในตัวผสม (gas mixer) แล้วไหลไปในกรอบแก้วตรงฐานให้ความร้อน (heat substrate) จะเกิดปฏิกิริยาของดีบุกคลอไรด์กับก๊าซออกซิเจนได้ดีบุกออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นที่วางบนฐานให้ความร้อน และก๊าซคลอรีนจะไหลออกมานอกกรอบแก้ว



รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้เตรียมดีบุกออกไซด์โดยวิธี CVD ของดีบุกคลอไรด์

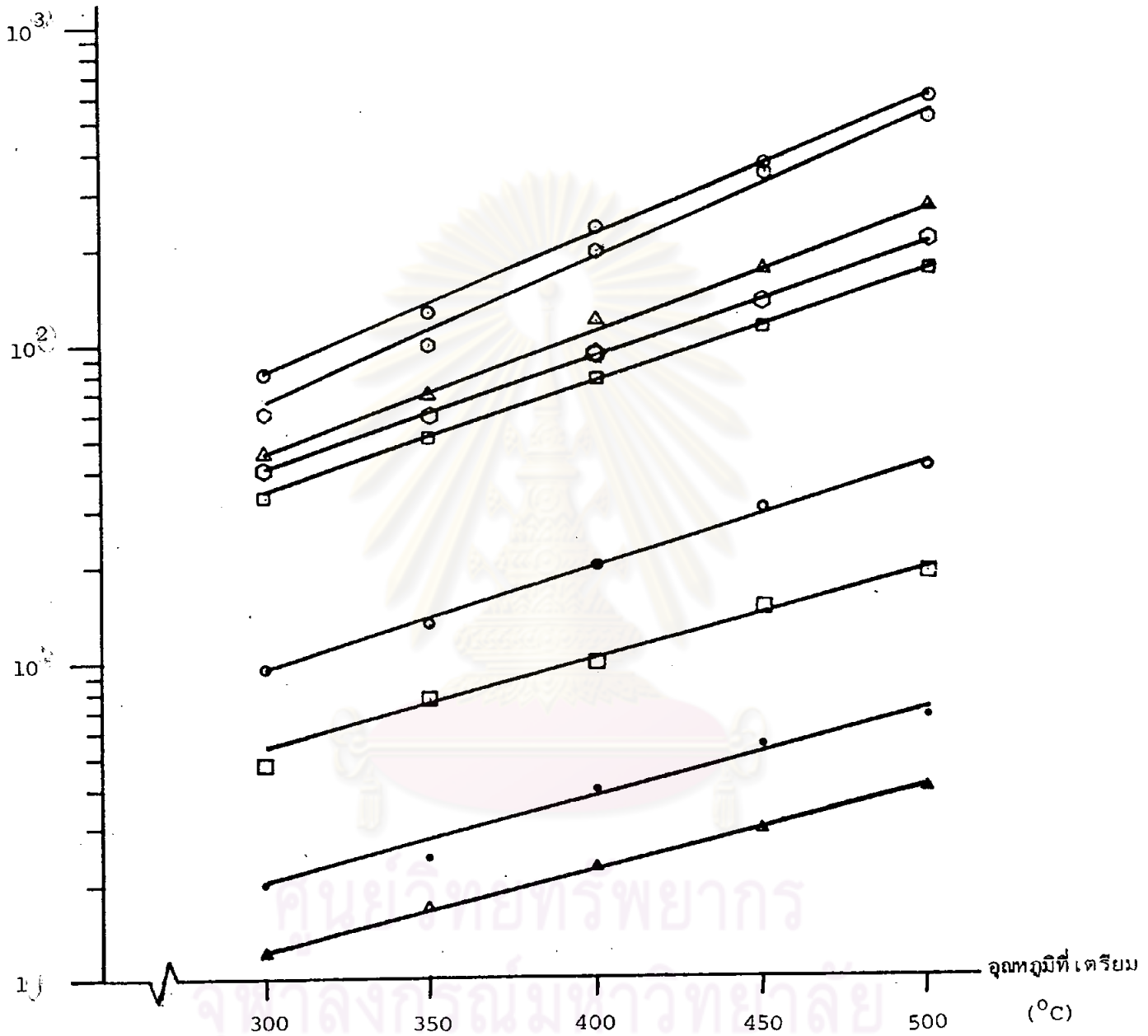
3.1.1 เงื่อนไขในการเตรียมดีบุกออกไซด์

ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้เตรียม อัตราการเกิดฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน ผลเป็นดังรูปที่ 3.3, 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.1 แสดงความหนาของดีบุกออกไซด์สีต่างๆ ที่ฉาบบนแว่นผลึกซิลิกอนขัดมัน
ซึ่งได้จากเครื่องวัดความหนา tylistep ที่ L.A.A.S ประเทศฝรั่งเศส

สี	ความหนา (nm.)
น้ำตาลอ่อน (tan)	36
น้ำตาล (brown)	50
ม่วงทึบ-ม่วงแดง (dark violet to red violet)	75
น้ำเงินเข้ม (royal blue)	87
น้ำเงินอ่อน-น้ำเงินโลหะ	95
โลหะ- เหลืองเขียวอ่อนมากๆ	125
ทองอ่อน- เหลืองผสมโลหะบางๆ	145
ทองมี เหลือง-ส้มปน	160
ส้ม-แดงโม	180
แดงม่วง	200
น้ำเงิน-ม่วงน้ำเงิน	220
น้ำเงิน	230
น้ำเงิน- เหลืองเขียว	235
เหลืองเขียว	250
เหลือง	255
ม่วงบาง	263
ชมพู (carnation pink)	270
ม่วงแดง	285
แดงม่วง	300
ม่วง	305

อัตราการเกิดดีบุกออกไซด์ (nm/min.)



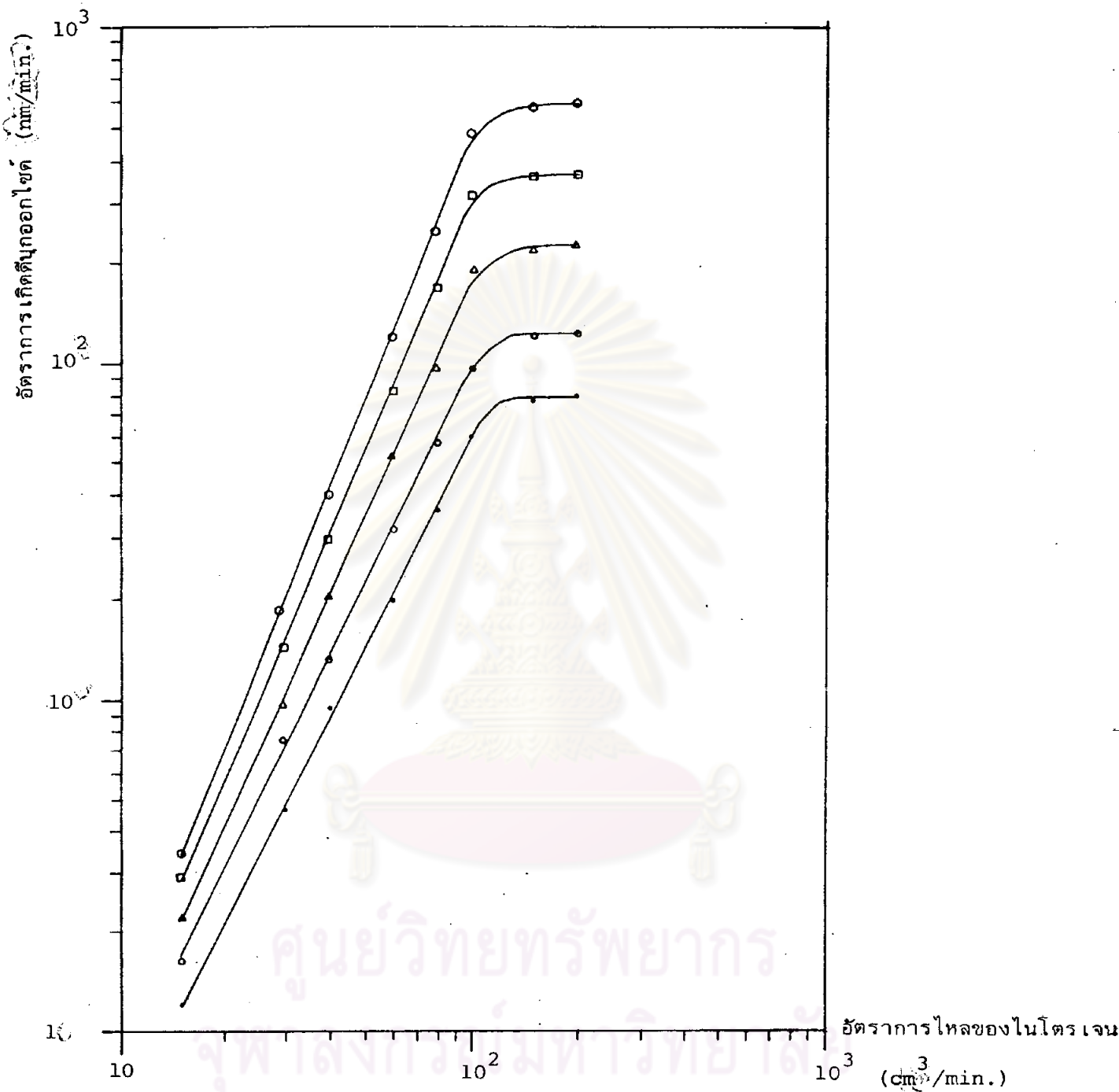
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดดีบุกออกไซด์กับอุณหภูมิที่เตรียม

โดยอัตราการไหลของไนโตรเจนและออกซิเจนเป็น Δ 15 : 100

• 40 : 40 □ 30 : 100 ◦ 40 : 100 □ 40 : 200

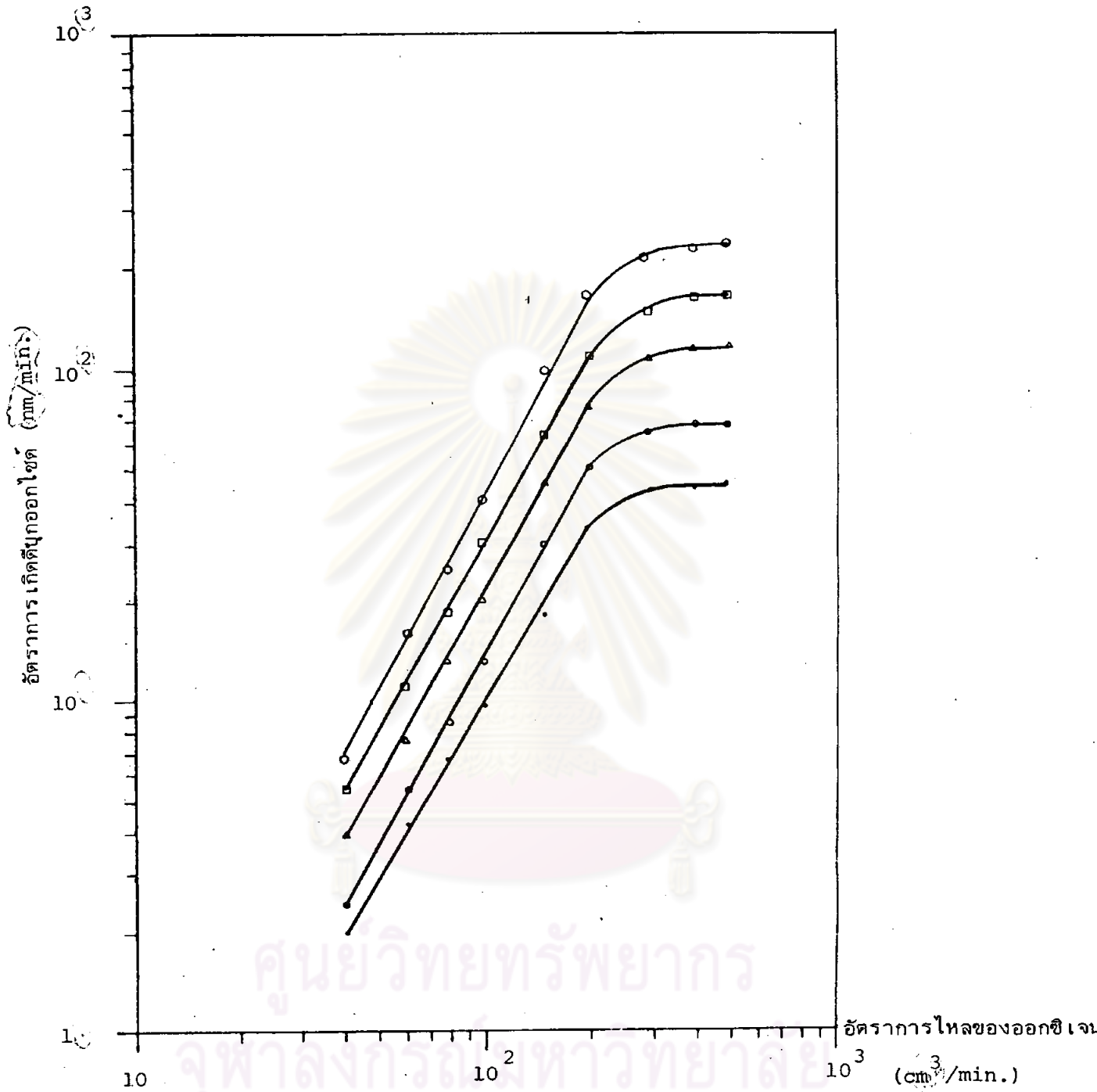
◦ 60 : 150 Δ 40 : 500 ◦ 100 : 100 ◦ 200 : 100

$\text{cm}^3/\text{min.}$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการไหลของไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอัตราการไหลของออกซิเจน = 100 cm³/min

• 300 °C ◦ 350 °C ▲ 400 °C ◻ 450 °C ◊ 500 °C



รูปที่ 3:5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดดีบุกออกไซด์กับอัตราการไหลของออกซิเจนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอัตราการไหลของไนโตรเจน = 40 cm³/min.
 • 300 °C ◦ 350 °C ▲ 400 °C ◻ 450 °C ◦ 500 °C

3.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดีบุกออกไซด์

เตรียมดีบุกออกไซด์บนแผ่นกระจก diborosilicate ให้มีปริมาณมากพอ แล้วกระเทาะดีบุกออกไซด์ออกนำไปคั่วให้ละเอียดแล้วผสมกับผงซิลิกอนบริสุทธิ์ โดยใช้ผงซิลิกอนกับผงดีบุกออกไซด์ในอัตราส่วน 1 : 3 โดยปริมาตร จากนั้นนำไปถ่ายภาพรังสีเอ็กซ์เพื่อพิสูจน์ว่าผงของสารที่เตรียมขึ้นมาเป็นดีบุกออกไซด์หรือไม่ หรือถ้าเป็นดีบุกออกไซด์จริงดูว่ามีสารอย่างอื่นผสมอยู่หรือไม่ ซึ่งวิธีการและผลที่ได้จะกล่าวไว้ละเอียดในภาคผนวก ข.

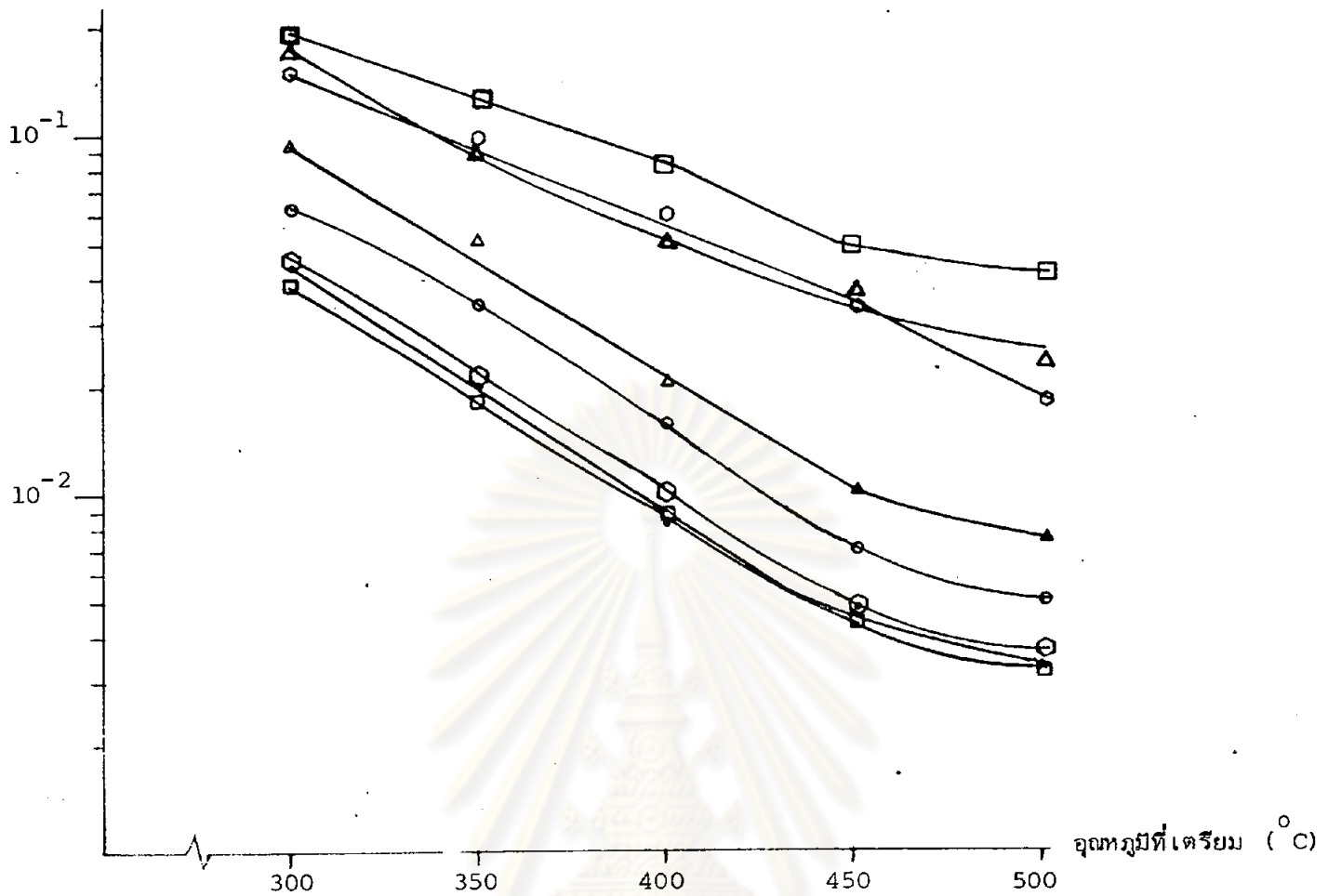
คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดีบุกออกไซด์ที่ศึกษามีดังนี้ การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (electrical conductivity) การดูดกลืนแสง (optical absorption) การเป็นชั้นกั้นการสะท้อนของแสงของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์บนแว่นผลึกซิลิกอนซึกมัน และสภาพการเป็นผลึก (crystallization) ของดีบุกออกไซด์ที่เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ

3.2.1 คุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์

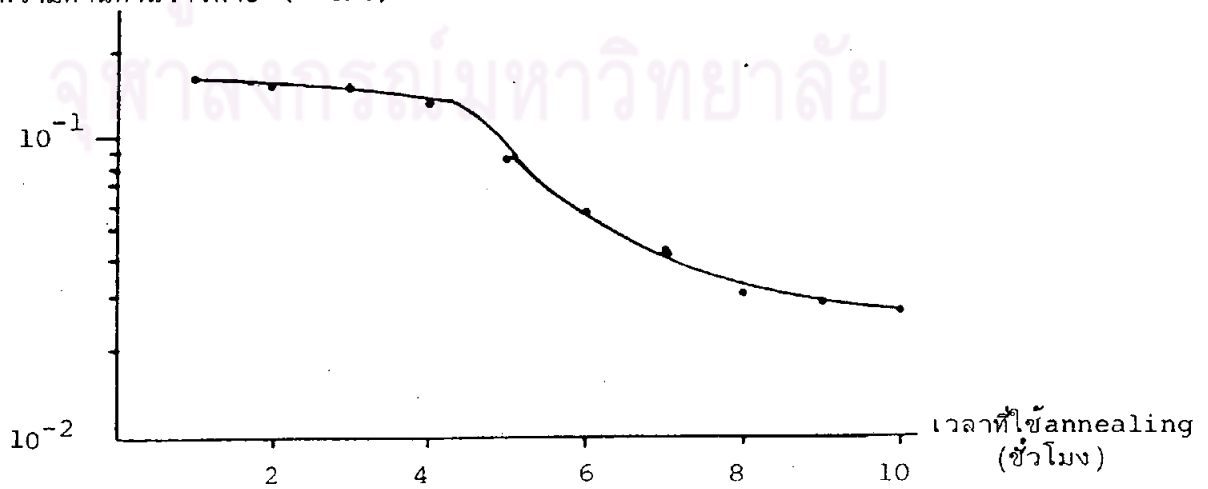
นำเอาฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เตรียมขึ้นบนแผ่นแก้ว diborosilicate ไปวัดค่าความต้านทานแผ่นจำเพาะ (sheet resistivity) ด้วยเครื่องวัดแบบ 4 เข็ม (four-point probe) Veeco model FPP-100 ซึ่งรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ค. ผลที่ได้ดังรูปที่ 3.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega\text{-cm.}$)



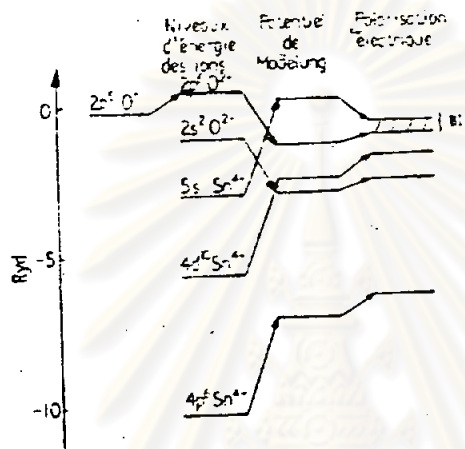
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะของแผ่นฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ กับอุณหภูมิที่เตรียม อัตราการไหลของไนโตรเจนและออกซิเจนเป็น $\text{cm}^3/\text{min.}$
 \square 15 : 100 ทนา $0.08 \mu\text{m}$ \bullet 40 : 100 ทนา $0.08 \mu\text{m}$ \circ 40 : 200 ทนา $0.08 \mu\text{m}$
 \circ 60 : 100 ทนา $0.08 \mu\text{m}$ \triangle 100 : 150 ทนา $0.08 \mu\text{m}$ \circ 100 : 150 ทนา $0.4 \mu\text{m}$
 \triangle 200 : 100 ทนา $0.08 \mu\text{m}$ \square 200 : 100 ทนา $0.4 \mu\text{m}$ ตามลำดับความต้านทานจำเพาะ ($\Omega\text{-cm.}$)



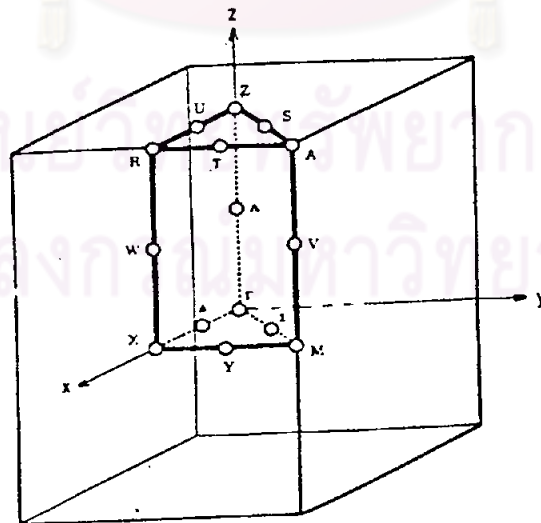
รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ annealing กับความต้านทานจำเพาะของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ อุณหภูมิ annealing เป็น 300°C

3.2.2 โครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band structure) และการดูดกลืนแสง

อะตอมของดีบุกมีอิเล็กตรอน 50 ตัว และมีการจัดเรียง (configuration) ของอิเล็กตรอนเป็น $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2, 4p^6, 4d^{10}, 5s^2, 5p^2$ อะตอมของออกซิเจนมีอิเล็กตรอน 8 ตัว และมีการจัดเรียงเป็น $1s^2, 2s^2, 2p^4$ ดังนั้นระดับพลังงานของโมเลกุลของดีบุกออกไซด์จึงเขียนได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภาพของระดับพลังงานต่างๆ ของดีบุกออกไซด์ (45)

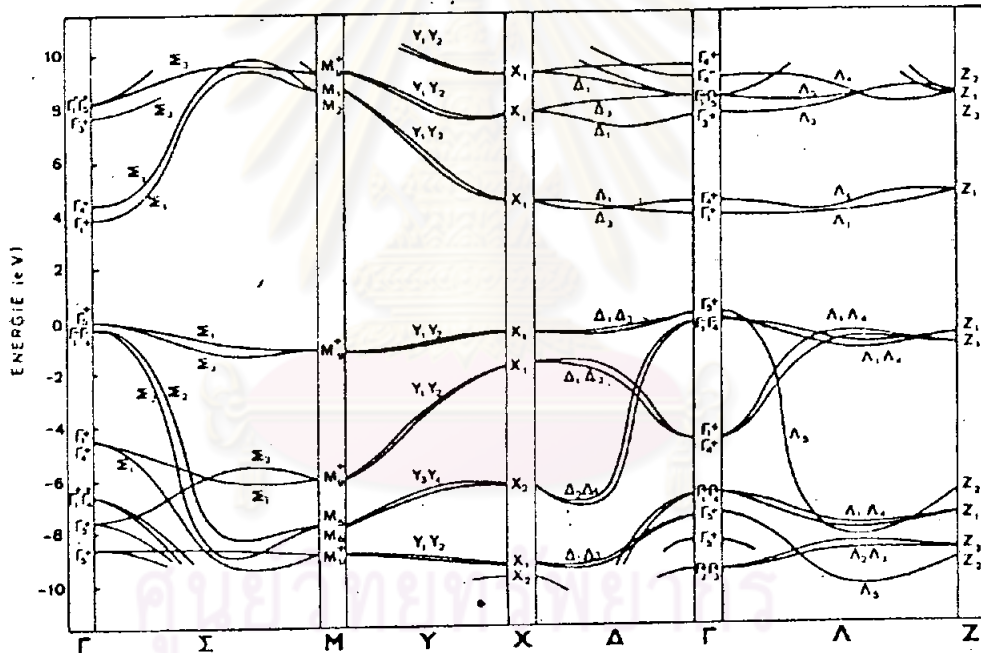


รูปที่ 3.9 เป็นรูปของ Brillouin zone และจุดสมมาตรต่างๆ ของโครงผลึก tetragonal (46)

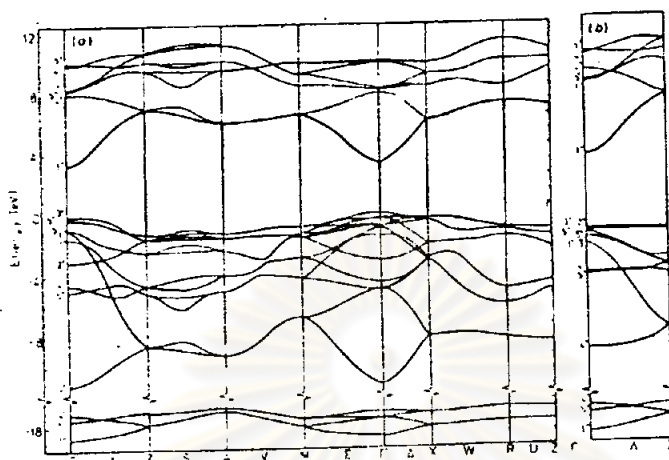
3.2.2.1 การคำนวณหาโครงสร้างแถบพลังงาน

ในการหาโครงสร้างแถบพลังงานนั้นมีวิธีต่างๆ ที่ใช้หลายวิธีเช่น แบบจำลองอิเล็กตรอนเกือบอิสระ (Nearly-free-electron model) ⁽⁴⁷⁾ วิธีแบบยึดแน่น (tight binding - method) ^{(47), (48)} วิธี Cellular ⁽⁴⁷⁾⁻⁽⁴⁹⁾ วิธี Augmented plane wave (APW) ^{(47) (48) (54)} วิธี Green's functions (KKR) ^{(47), (48), (52), (53)} ซึ่งการใช้วิธีเหล่านี้เข้าไปคำนวณหาโครงสร้างแถบพลังงานของสสาร จะใช้ได้ดีและสะดวกแค่ไหนขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางผลึกของสสารนั้นๆ และวิธีการหาค่าพลังงานศักย์ของอะตอมของสารที่ประกอบกันอยู่

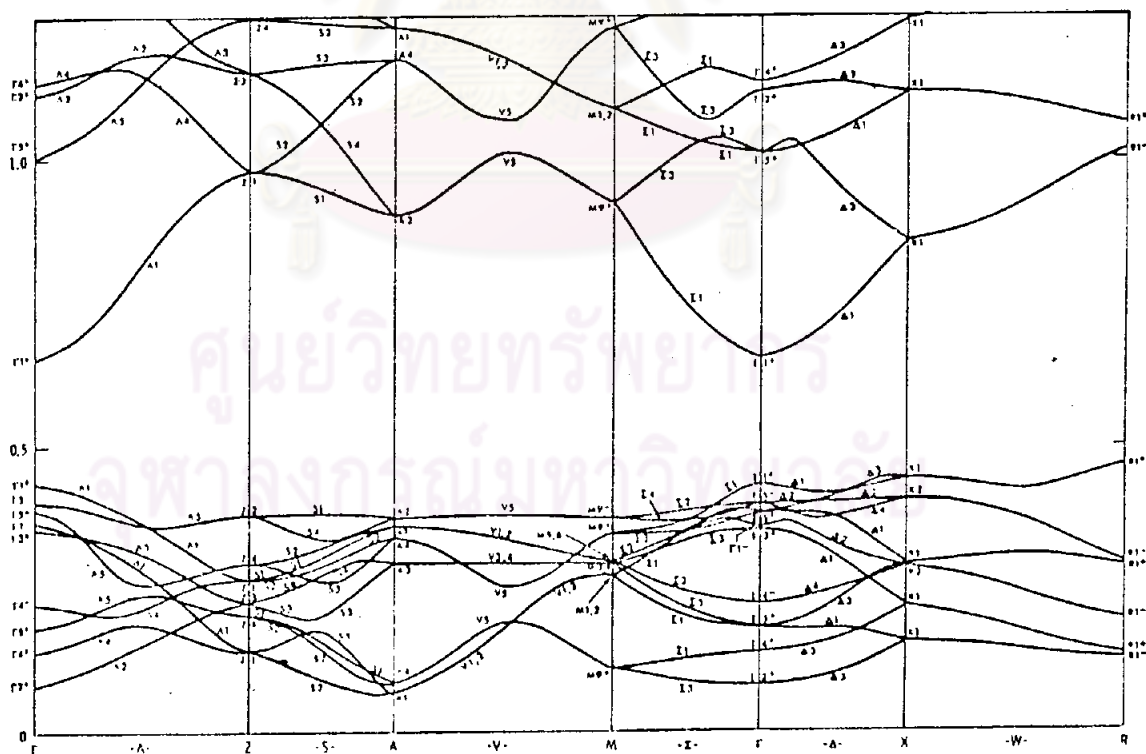
โครงสร้างแถบพลังงานของดีบุกออกไซด์ที่ได้มีการศึกษากันมีดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 a) เป็นโครงสร้างแถบพลังงานของดีบุกออกไซด์โดยใช้วิธี KKR และใช้ค่าของศักย์ของร่างแหเป็นแบบ Madelung potential ⁽⁴⁶⁾



รูปที่ 3.10 b) เป็นโครงสร้างแถบพลังงานของดีบุกออกไซด์โดยใช้วิธี tight binding (LCAO) (55)



รูปที่ 3.10 c) เป็นโครงสร้างแถบพลังงานดีบุกออกไซด์โดยใช้วิธี Augmented plane wave (APW) (56)

3.2.2.2 การดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงเกิดจากอิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ได้รับการกระตุ้นจากแสงขึ้นไปอยู่ในคอนดักชันแบนด์ ซึ่งเกิด transition จากจุดสูงสุดในวาเลนซ์แบนด์ไปยังจุดต่ำสุดในคอนดักชันแบนด์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานต้องห้ามของสารซึ่งเรียกว่า Absorption edge (57), (58)

Transition จากวาเลนซ์แบนด์ไปสู่คอนดักชันแบนด์มี 2 แบบ คือ แบบตรง (direct - transition) และแบบเฉียง (indirect transition) transition แบบตรงไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเวกเตอร์คลื่น (wave vector) ของอิเล็กตรอน ส่วน transition แบบเฉียงจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเวกเตอร์คลื่นของอิเล็กตรอนโดยจะมีการคายโฟนอน (phonon emission) หรืออาจมีการดูดกลืนโฟนอน (phonon absorption)

การดูดกลืนแสงโดยปกติจะพิจารณาความสัมพันธ์การดูดกลืน (absorption coefficient) ซึ่งนิยามในเทอมของ transition ใดคือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ทำให้เกิด transitions ต่อหนึ่งหน่วย เวลาต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรกับพลังงานของแสงตกกระทบ (incident flux) (48), (59)

$$\alpha = \frac{h\nu \times \text{จำนวน transitions/เวลา/ปริมาตร}}{\text{แสงตกกระทบ}} \dots (3.1)$$

จากอัตราในการเกิด transition สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนตรงเป็น (3), (57), (62)

$$\alpha_d = \frac{-6e^2}{m^2 h\nu c V_0^2} \left[\int u_0^* u_v dr \right]^2 [h\nu - E_g]^{1/2} \dots (3.2)$$

V_0 เป็น ปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell)

u_c เป็น Schrödinger wave function ที่ไม่ขึ้นกับช่วงเวลาชีวิตของอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์

u_v เป็น Schrödinger wave function ที่ไม่ขึ้นกับช่วงเวลาชีวิตของอิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์

โดยคิดว่ามวลของอิเล็กตรอนเท่ากับของโฮล = m

ส่วนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบเฉียงสามารถเขียนได้เป็น (3), (57) - (62)

$$\alpha_i = \frac{A(h\nu + h\nu_k - E_g)^2}{\exp(h\nu_k/kT) - 1} + \frac{B\{\exp(h\nu_k/kT)\}(h\nu - h\nu_k - E_g)^2}{\exp(h\nu_k/kT) - 1} \dots (3.3)$$

เมื่อมีการปล่อยให้เกิด transition ทางตั้ง

$$\alpha_i = \frac{C(h\nu + h\nu_k - E_g)^3}{\exp(h\nu_k/kT) - 1} + \frac{[D \exp(h\nu_k/kT)] (h\nu - h\nu_k - E_g)^3}{\exp(h\nu_k/kT) - 1} \dots (3.4)$$

เมื่อมีการห้าม transition ทางตั้ง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของดีบุกออกไซด์ วัดค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง double beam grating spectrometer ของ Perkin-Elmer model 124 ซึ่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ง. จากค่าการดูดกลืนแสงของดีบุกออกไซด์ที่วัดได้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสมการ (3.5) ⁽⁶³⁾

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T} \dots (3.5)$$

d เป็น ความหนาของดีบุกออกไซด์

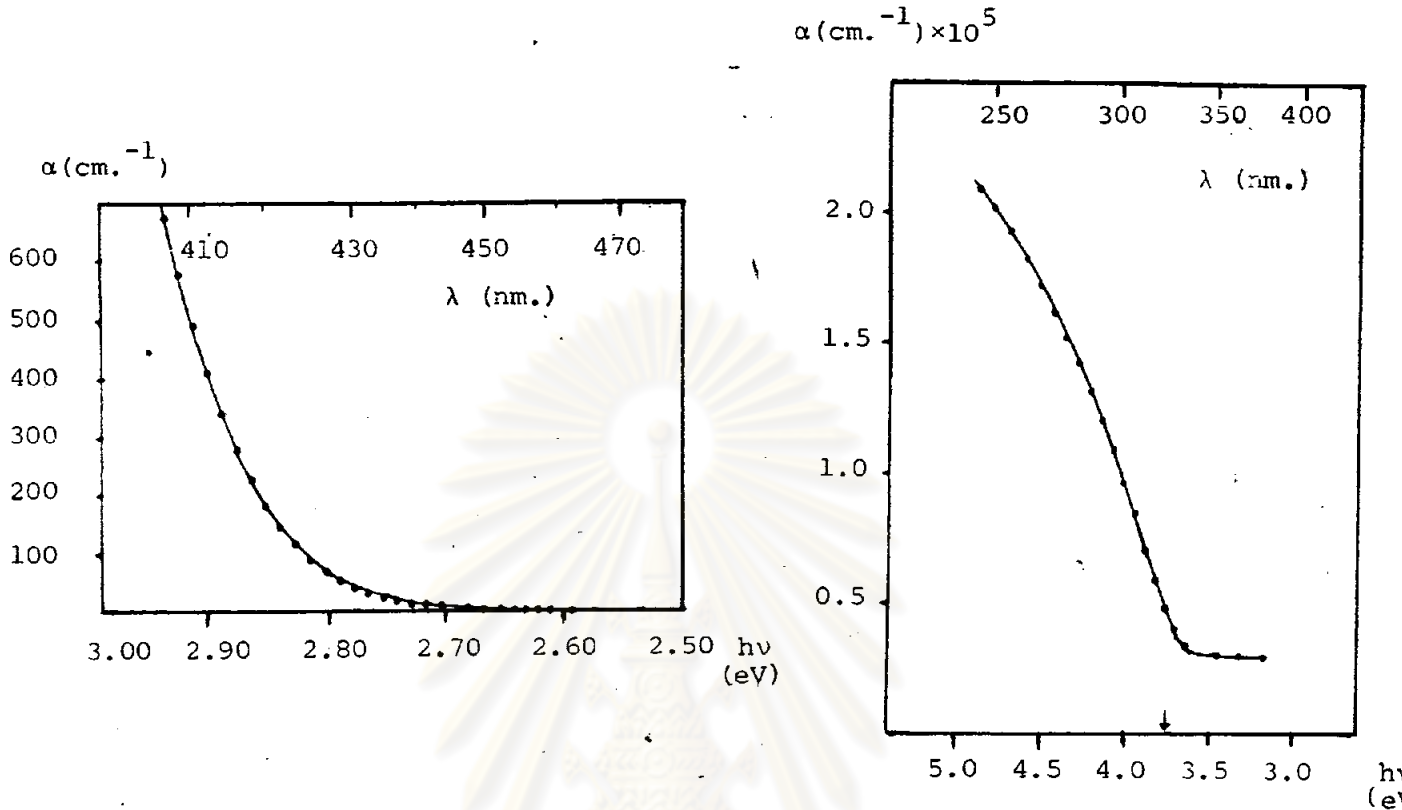
T เป็น การผ่านทะลุของแสงของดีบุกออกไซด์ ก็คือผลกลับของค่าการดูดกลืน

การดูดกลืน (%)

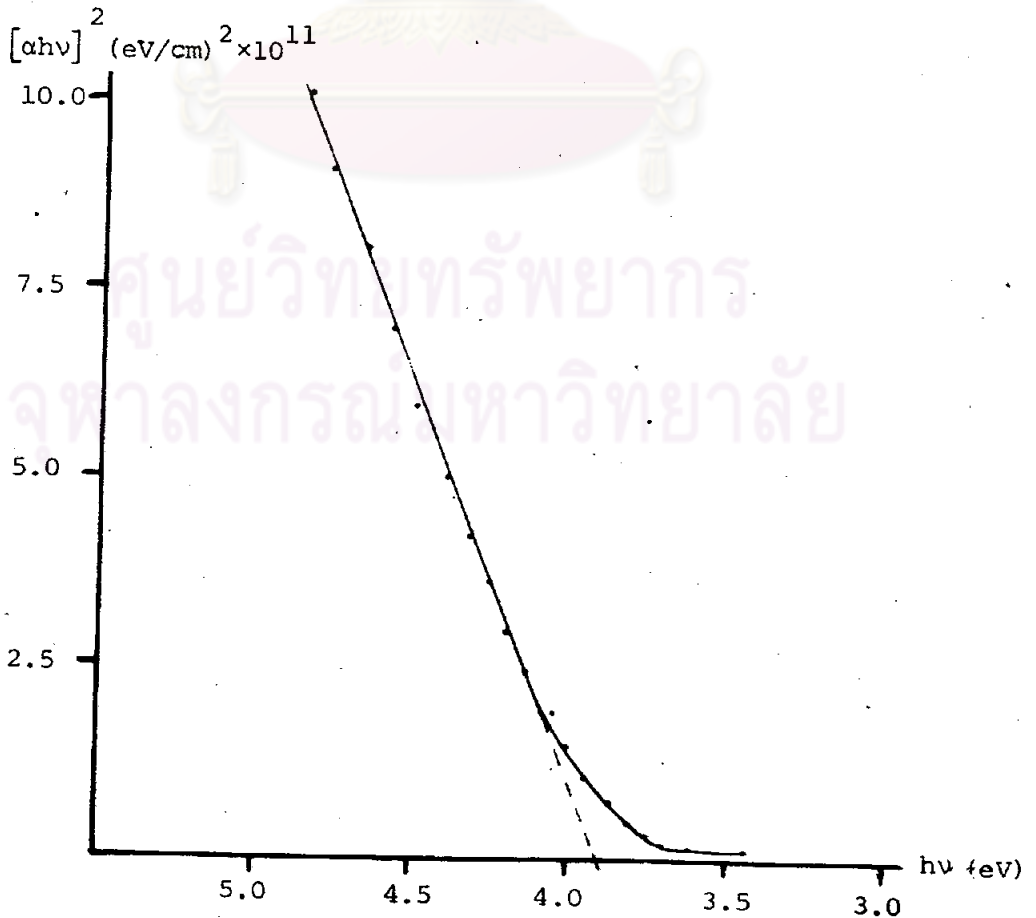


รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงของดีบุกออกไซด์กับความยาวคลื่นของแสง

หาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของดีบุกออกไซด์ได้ผลดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของดีบุกออกไซด์กับพลังงานแสง

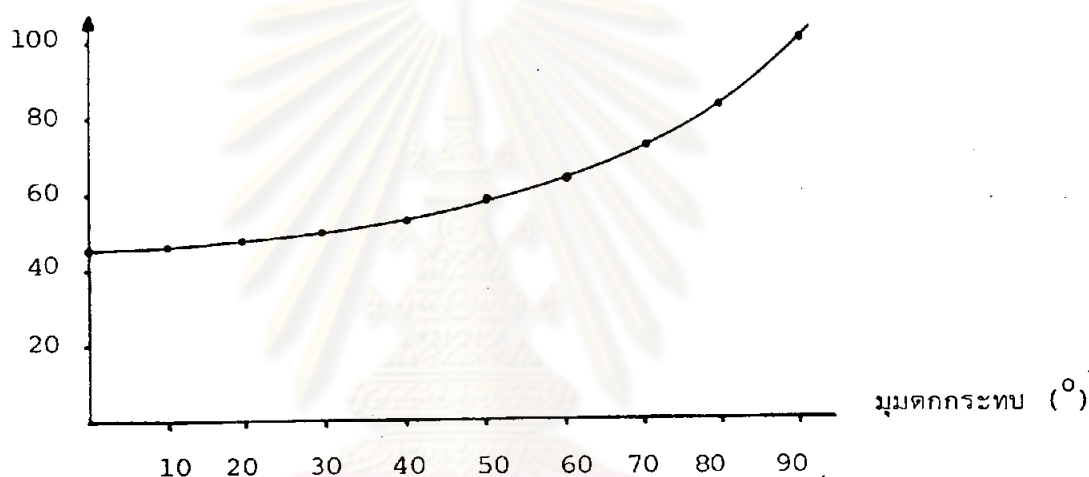


รูปที่ 3.13 กราฟระหว่าง $[\alpha h\nu]^2$ กับ $h\nu$

การดูดกลืนแสงแบบตรง $\propto hv \cdot [hv - E_g]^2$ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $[hv]^2$ กับ hv จะได้กราฟเส้นตรง ตรงจุดตัดแกน hv จะได้ค่าของ E_g จากรูปที่ 3.13 ได้ค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรงของดีบุกออกไซด์เป็น 3.90 eV จุดที่มีการดูดกลืนแสงเริ่มต้นที่ ค่าของพลังงาน ≈ 2.62 eV

3.2.3 คุณสมบัติในการกั้นการสะท้อนของแสงบนผิวซิลิกอน

ผิวซิลิกอนชนิดมันมีการสะท้อนแสงสูง ทำให้ปริมาณแสงที่ทะลุผ่านเข้าไปได้น้อย การทำชั้นกั้นการสะท้อนแสงจึงเป็นวิธีการอันหนึ่งในการเพิ่มปริมาณแสงให้ผ่านเข้าไปในเนื้อซิลิกอน การสะท้อน (%)



รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับเปอร์เซ็นต์ของการสะท้อนของแสงจากผิวซิลิกอนชนิดมัน โดยใช้แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 632.8 nm จากเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

ในการฉาบฟิล์มโปร่งใสบางของชั้นกั้นการสะท้อนของแสงชั้นเดียว เมื่อแสงตกกระทบบังจากกับชั้นกั้นการสะท้อนของแสง อำพันของแสงสะท้อนสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.6) (64)

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-2i\psi_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\psi_1}} \quad \dots (3.6)$$

r_1 เป็นสัมประสิทธิ์ Fresnel การสะท้อนของแสงตรงรอยต่อของชั้นกั้นการสะท้อนของแสงกับอากาศ $= \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$ (66)

r_2 เป็นสัมประสิทธิ์ Fresnel การสะท้อนของแสงตรงรอยต่อของชั้นกั้นการสะท้อนของแสงกับชั้นผลึกฐาน (substrate) $= \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s}$



- n_o เป็น ดรรชนีหักเหของอากาศ
 n_1 เป็น ดรรชนีหักเหของชั้นกั้นการสะท้อนของแสง
 n_s เป็น ดรรชนีหักเหของชั้นผลึกฐาน

$$\psi_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda \quad \dots (3.7)$$

d_1 เป็น ความหนาของชั้นกั้นการสะท้อนของแสง

λ เป็น ความยาวคลื่นของแสง

ค่าของ r จะมีค่าต่ำสุดก็ต่อเมื่อ

$$r_1 + r_2 \cos 2\psi_1 = 0 \quad \dots (3.8)$$

$$r_2 \sin 2\psi_1 = 0 \quad \dots (3.9)$$

คำตอบของสมการทั้ง 2 มี 2 ชุด แต่ชุดที่จะให้ผลตรงกับความเป็นจริง คือ

$$n_1^1 = n_o n_s \quad \dots (3.10)$$

$$\psi_1 = (2m - 1)\frac{\pi}{2}; \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad \dots (3.11)$$

ความเข้มของการสะท้อน $R = (r)^2$ สามารถเขียนได้เป็น

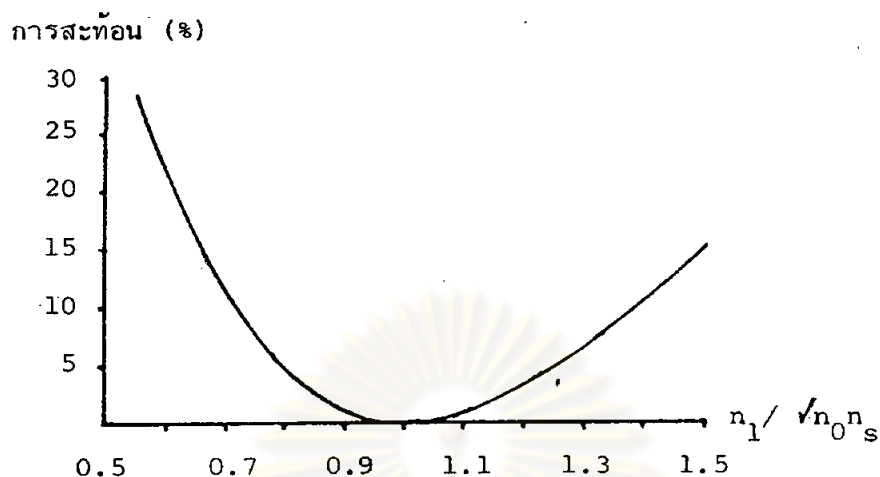
$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\psi_1}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\psi_1} \quad \dots (3.12)$$

ดังนั้นถ้าชั้นกั้นการสะท้อนของแสงมีความหนาเป็น $1/4$ ของความยาวคลื่นของแสงจะได้

$$\psi_1 = 90^\circ$$

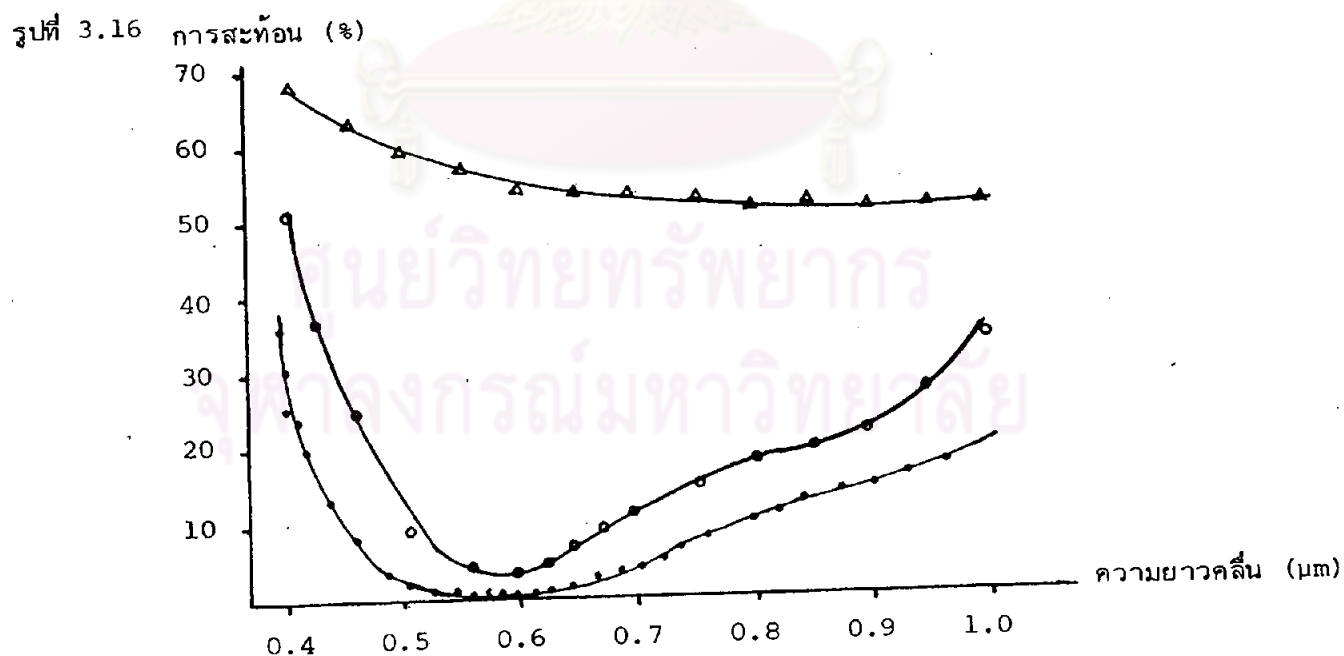
$$R_{\lambda/4} = \frac{n_1^2 - n_o n_s^2}{n_1 + n_o n_s} \quad \dots (3.13)$$

จะเห็นว่าสมการ (3.10) เป็นจริงก็จะทำให้ $R_{\lambda/4} = 0$ แต่ถ้าสมการ (3.10) ไม่เป็นจริงค่า $R_{\lambda/4}$ จะมีค่าอย่างไรขึ้นอยู่กับว่า $n_1 < n_s$ หรือ $n_1 > n_s$



รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนกับค่า $n_1/\sqrt{n_0 n_s}$ ของชั้นกั้นการสะท้อนของแสงที่หนา $\frac{\lambda}{4}$ ของความยาวคลื่นของแสง โดยถือว่าสารทั้งสองไม่ดูดกลืนแสง (64)

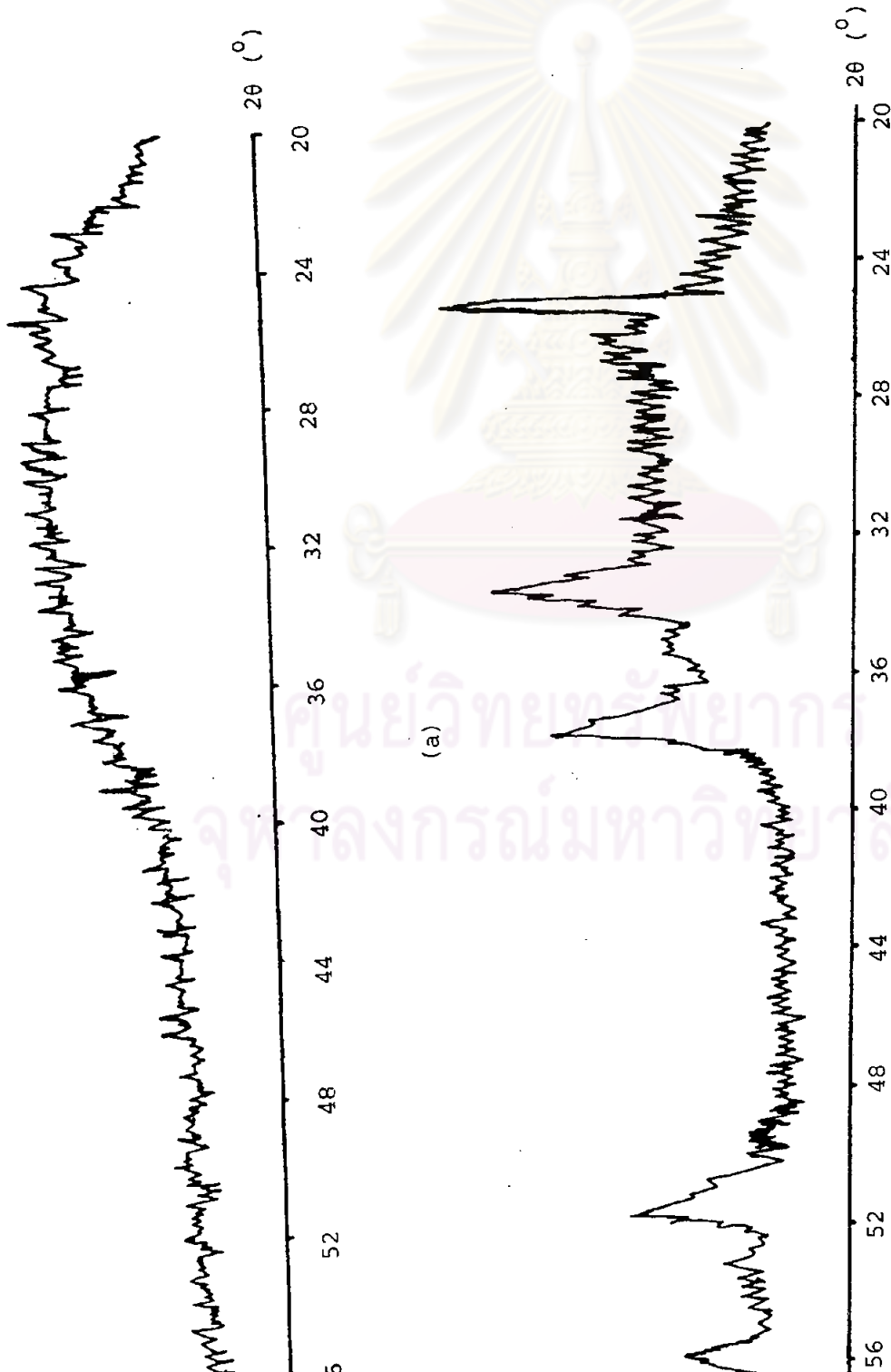
ได้ทำการวัดการสะท้อนของแสงจากแว่นผลึกซิลิกอนชนิดมันที่ฉาบด้วยฟิล์มบางดีบุกออกไซด์, ซิลิกอนออกไซด์ และไม่ได้ฉายโดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง $400 \text{--} 1000 \text{ nm}$ จะได้ผลดัง



รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแสงกับการสะท้อนจาก Δ เป็นของแผ่นซิลิกอนชนิดมัน \bullet เป็นของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์หนา 80 nm .
 บนแว่นผลึกซิลิกอนชนิดมัน \circ เป็นของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์หนา 100 nm .
 บนแว่นผลึกซิลิกอนชนิดมัน โดยมีมุมตกกระทบ = 15°

3.2.4 สภาพทางผลึกของดีบุกออกไซด์

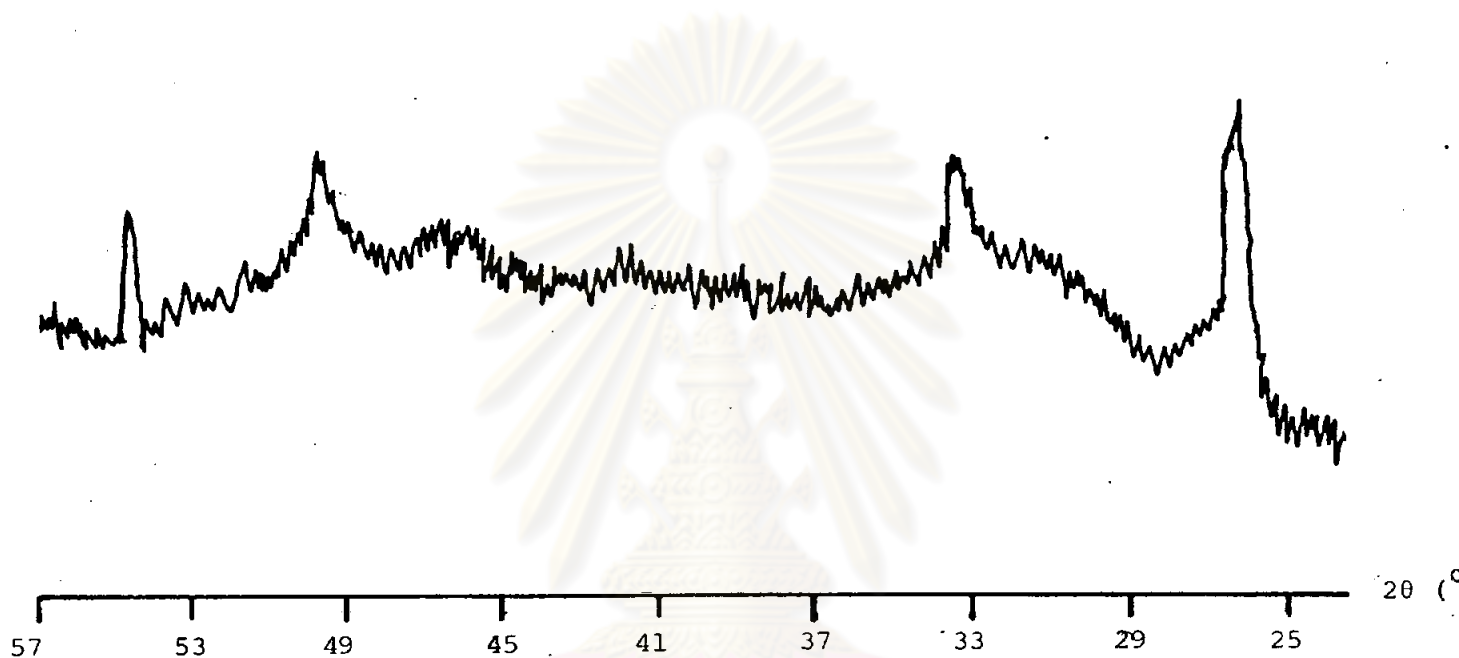
เตรียมดีบุกออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300° , 350° , 400° , 450° และ 500°C บนแผ่นแก้ว dibosilicate จากนั้นนำ去打ายภาพเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง diffractometer Philips ซึ่งผลจะเป็นดังรูป 3.17 ซึ่งจะเห็นว่าการเตรียมที่อุณหภูมิ 400° , 450° และ 500°C จะมีสภาพทางผลึกดีกว่าที่ 300° และ 350°C และจะยิ่งเห็นชัดเมื่อเอาดีบุกออกไซด์ทั้งสองไปทำ annealing แล้วนำมา去打ายภาพเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อีกครั้ง ยอด (peak) จะค่อยๆ ปรากฏชัดขึ้น หรือสภาพทางผลึกจะดีขึ้น



รูปที่ 3.17 เป็นแบบ (pattern) ของดีบุกออกไซด์จากเครื่อง diffractometer

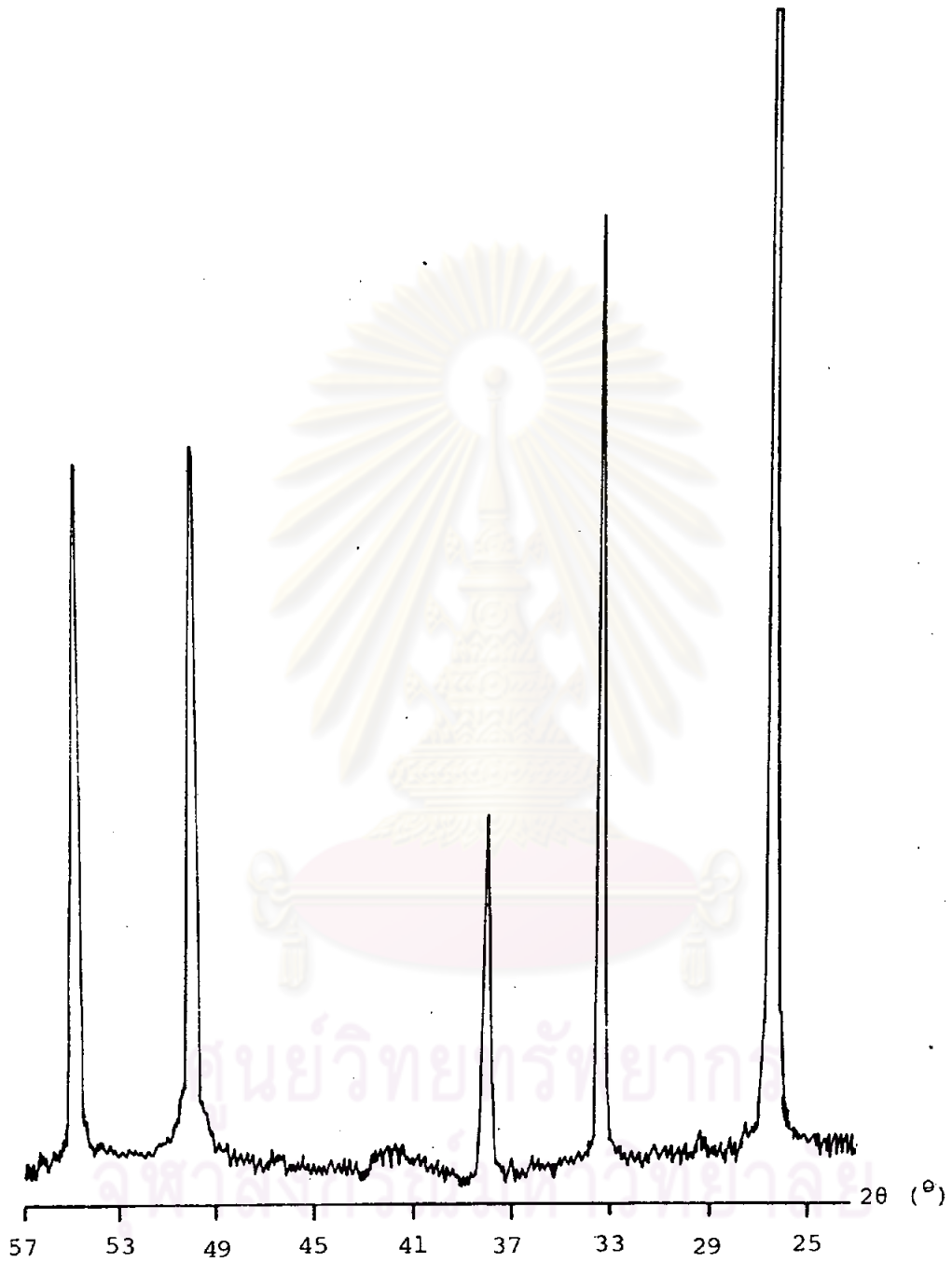
(a) อุณหภูมิที่เตรียม = 300°C

(b) อุณหภูมิที่เตรียม = 300°C แล้ว annealing อยู่ 10 ชั่วโมง

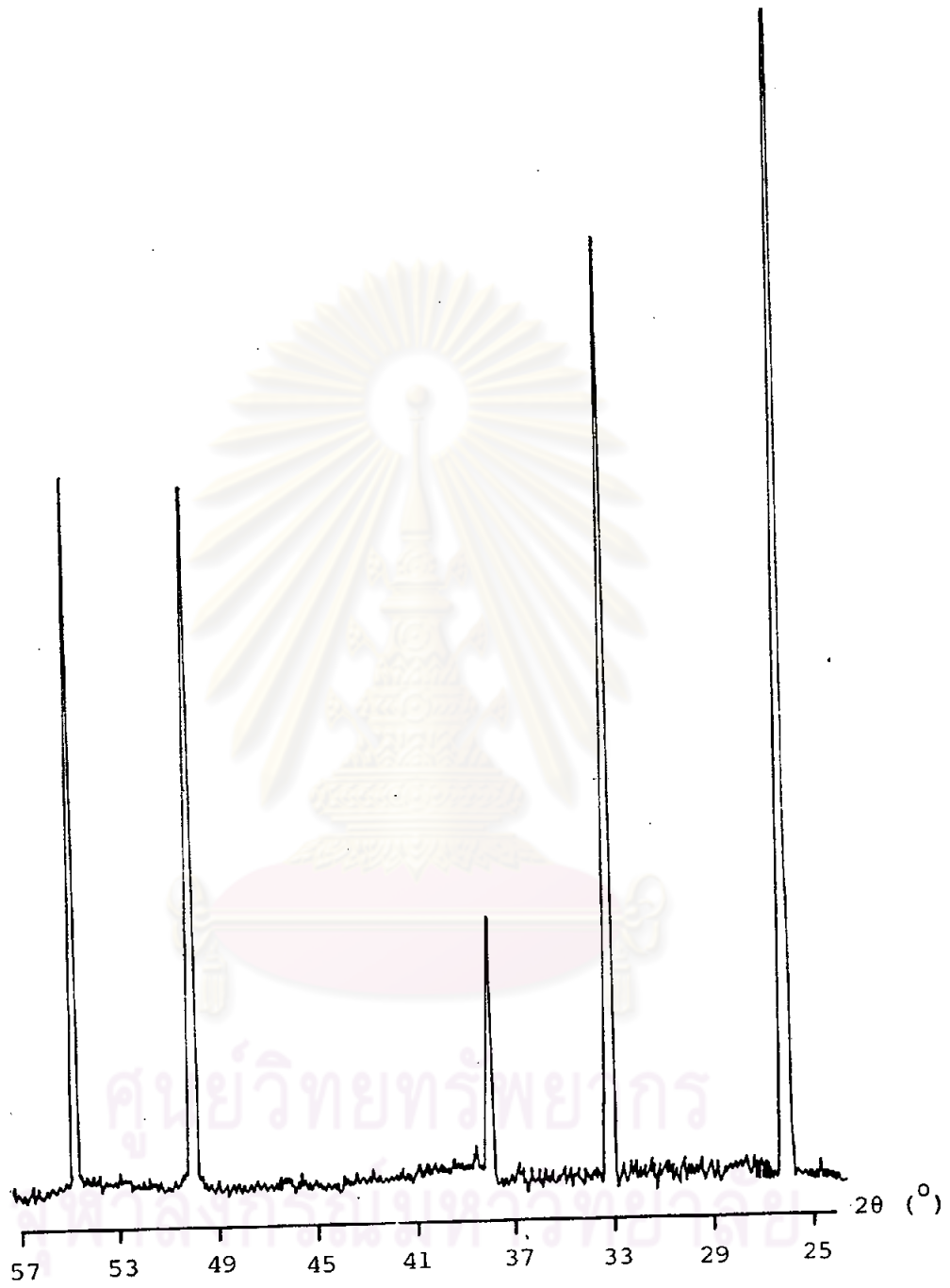


รูปที่ 3.17 (c) เป็นแบบของดิฟแฟกชันจากเครื่อง diffractometer ซึ่งเตรียมที่ อุณหภูมิ 350 °C

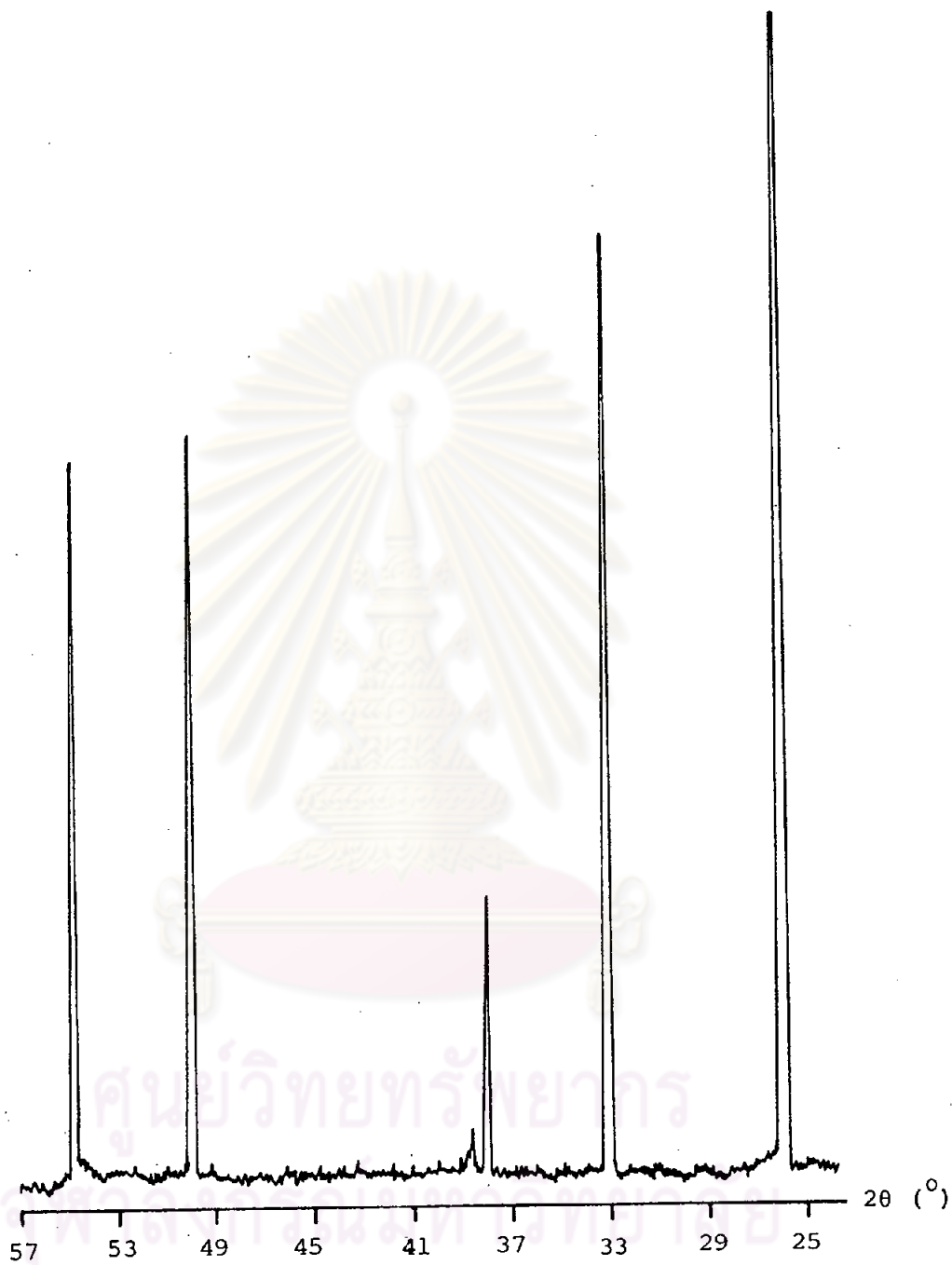
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 d) เป็นแบบของสัณฐานผลึกจากเครื่อง diffractometer ซึ่งเตรียมที่ อุณหภูมิ 400°C



รูปที่ 3.17 e) เป็นแบบของดีบุกออกไซด์จากเครื่อง diffractometer ซึ่งเตรียมที่ อุณหภูมิ 450°C



รูปที่ 3.17 f) เป็นแบบของดีบุกออกไซด์จากเครื่อง diffractometer ซึ่งเตรียมที่ อุณหภูมิ 500°C

3.3 คุณสมบัติของดีบุกออกไซด์ที่นักฟิสิกส์ได้ทดลองมาก่อน

ได้รวบรวมค่าของปริมาณทางกายภาพที่น่าสนใจจากเอกสาร ซึ่งนักฟิสิกส์ได้ตีพิมพ์ขอเป็น
สังเขปดังนี้

ตารางที่ 3.2 เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์ที่มีผู้ทดลองหามาก่อน

ผู้ทดลอง	สภาพของดีบุกออกไซด์	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้และข้อสรุป
Kohnke ⁽⁶⁷⁾	แร่ Cassiterite ซึ่ง ตรวจสอบว่ามี Si Al และ Fe ไม่เกิน 0.5 %	การนำไฟฟ้าและ ปรากฏการณ์ของ ฮอลล์	ที่อุณหภูมิ 300°K ได้ $n_i = 10^{11} - 10^{15}$ ต่อ cm^3 $\mu_H = 10 - 300$ cm^2/Vsec $m_e^* = 0.8 m_0$
Nagasawa Shionoya และ Makeshima ⁽⁶⁸⁾	ผลึกเดี่ยวบริสุทธิ์ มีความหนาแน่นของ พาหะใน order 10^{17} cm^{-3}	ปรากฏการณ์ของ ฮอลล์ การนำ- ไฟฟ้าและปรากฏ- การณ์ของซีเบค (Seebeck effect)	$\mu_H \propto T^{-2}$ เมื่อ $T > 160^\circ\text{K}$ $m_e^* = (0.41 \pm 0.10) m_0$ และ $0.33 m_0$ วัดโดยปรากฏการณ์ ของฮอลล์ และปรากฏการณ์ ของซีเบค ตามลำดับ
Nagasawa และ Shionoya ⁽⁶⁹⁾	ผลึกเดี่ยวบริสุทธิ์	ปรากฏการณ์ของ ฮอลล์ และ Magnetoresis- tance	ที่อุณหภูมิ 300°K, $\rho = 0.11 - 0.33 \Omega\text{-cm}$. $n_i = (1.3 - 4.0) \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $\mu_H = 200 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$
Crabtree, Mehdi และ Wright ⁽⁷⁰⁾	ผลึกบริสุทธิ์	การนำไฟฟ้า ปรากฏการณ์ของ ฮอลล์	ที่อุณหภูมิ 300°K $n_i = 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ $\mu_H = 200 - 300 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ $m_e^* = 0.17 m_0$ ที่ 77°K ได้ค่า μ_H สูงสุด = 700 cm^2/Vsec

ตารางที่ 3.2 เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์ที่มีผู้ทดลองหามาก่อน (ต่อ)

ผู้ทดลอง	สภาพของดีบุกออกไซด์	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้และข้อสรุป
Fonstad Rediker ⁽⁷¹⁾	ผลึกเดี่ยว	ปรากฏการณ์ของฮอลล์ การนำไฟฟ้า Schottky barrier	ที่อุณหภูมิ 300°K, $n_i = 8.5 \times 10^{15}$ - $2.2 \times 10^{18} \text{ cm.}^{-3}$ $\mu_H = 150-260 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ n_i จาก Schottky barrier = $7.9 \times 10^{15} - 1.5 \times 10^{18}$ cm.^{-3} ที่ 45°K $\mu_H = 13000 \text{ cm}^3/\text{Vsec}$
Button, Fonstad และ Dreybrodt ⁽⁷²⁾	ผลึกเดี่ยวบริสุทธิ์	ปรากฏการณ์ของฮอลล์ Submillimeter cyclotron resonance	ที่ 300°K $n_i = 7 \times 10^{15}$ cm.^{-3} $\mu_H = 250 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ ที่ 77°K $n_i = 2 \times 10^{15} \text{ cm.}^{-3}$ $\mu_H = 9000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ $m_{\perp}^* = 0.299 m_0$ $m_{\parallel}^* = 0.234 m_0$ density of states $m^* = 0.275 m_0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 เป็นคุณสมบัติของแสงสีนูกออกไซด์ที่มีผู้ทดลองหามาก่อน

ผู้ทดลอง	สภาพของตึนูกออกไซด์	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้และข้อสรุป
Arai (73)	ฟิล์มบาง	การดูดกลืน การส่งผ่าน และการสะท้อนของแสง	จุดซึ่งเริ่มดูดกลืน = $(3.71 \pm 0.025) \text{ eV}$
Kohnke (67)	ผลึกในธรรมชาติ	การดูดกลืนและการส่งผ่านแสง	พลังงานต้องห้าม = 3.54 eV
Summit, Marley และ Borrelli (74)	ผลึกเดี่ยวที่เตรียมขึ้นมา	การดูดกลืนแสงเหนือม่วง	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเหนือม่วง = 10^3 cm^{-1} จุดเริ่มดูดกลืนแสงเมื่อใช้แสงโพลาไรซ์ขนานและตั้งฉากกับแกน c ของผลึก เป็น 3.93 และ 3.57 eV ตามลำดับ และ Threshold สำหรับการดูดกลืนที่มีโฟนอนร่วมด้วยเป็น 3.7 และ 3.4 eV ตามลำดับ
Reddaway และ Wright (75)	ผลึกเดี่ยวที่เตรียมขึ้นมา	การดูดกลืนแสง	จุดดูดกลืนเชิงมีค่า 2.55 และ 2.45 eV และจุดดูดกลืนตรงเป็น 3.7 และ 4.1 eV โดยใช้แสงโพลาไรซ์ตั้งฉากและขนานกับแกน c ของผลึกตามลำดับ
Nagasawa, Shionoya และ Makeshima (68)	ผลึกเดี่ยวเตรียมจากปฏิกิริยาของ $\text{SnCl}_4 + \text{H}_2\text{O}$	การส่งผ่านของแสง	แถบพลังงานต้องห้ามกว้าง 3.5 eV

ตารางที่ 3.3 เป็นคุณสมบัติของแสงดีบุกออกไซด์ที่มีผู้ทดลองหามา ก่อน (ต่อ)

ผู้ทดลอง	สภาพของดีบุกออกไซด์	คุณสมบัติที่ศึกษา	ผลที่ได้และข้อสรุป
Houston และ Kohnke (76)	ผลึกในธรรมชาติ	Photoconduction	แถบพลังงานต้องห้าม = 4.0 eV
Summit และ Borrelli (77)	ผลึกเดี่ยวที่เตรียมขึ้นมา	การดูดกลืนแสงเหนือม่วง	ได้สูตรที่ใช้กับการทดลองเป็น $E_g(T) = E_g^0 - C \left(\exp\left(\frac{\theta}{T}\right) - 1 \right)^{-1}$ $\theta = 196^\circ, 414^\circ \text{K}$ เป็นของแสงที่โพลาไรซ์ขนานและตั้งฉากกับแกน c ของผลึกตามลำดับ
Spence (63)	ฟิล์มโดยการระเหย	การดูดกลืนแสง	จุดดูดกลืนเฉียงที่ 2.7 eV และจุดดูดกลืนตรงที่ 4.3 eV
Van Daal (78)	ผลึกเดี่ยวในธรรมชาติ	การสะท้อนแสง	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตย์เป็น 9 ± 0.5 และ 14 ± 0.5 ในทิศทางขนานและตั้งฉากกับแกน c ของผลึกตามลำดับ
McRoberts Fonstad และ Hubert (79)	ผลึกเดี่ยวจากปฏิกิริยาของ $\text{SnCl}_4 + \text{H}_2 + \text{O}_2$	Thermoabsorption	แสงโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกับแกน c โครงสร้างละเอียด (fine structure) เกิดแสงนี้ร่วมกับ exciton-phonon quasi-bound state แสงที่ขนานกับแกน c จะก่อให้เกิด transition แบบตรงที่ 4.0 eV