

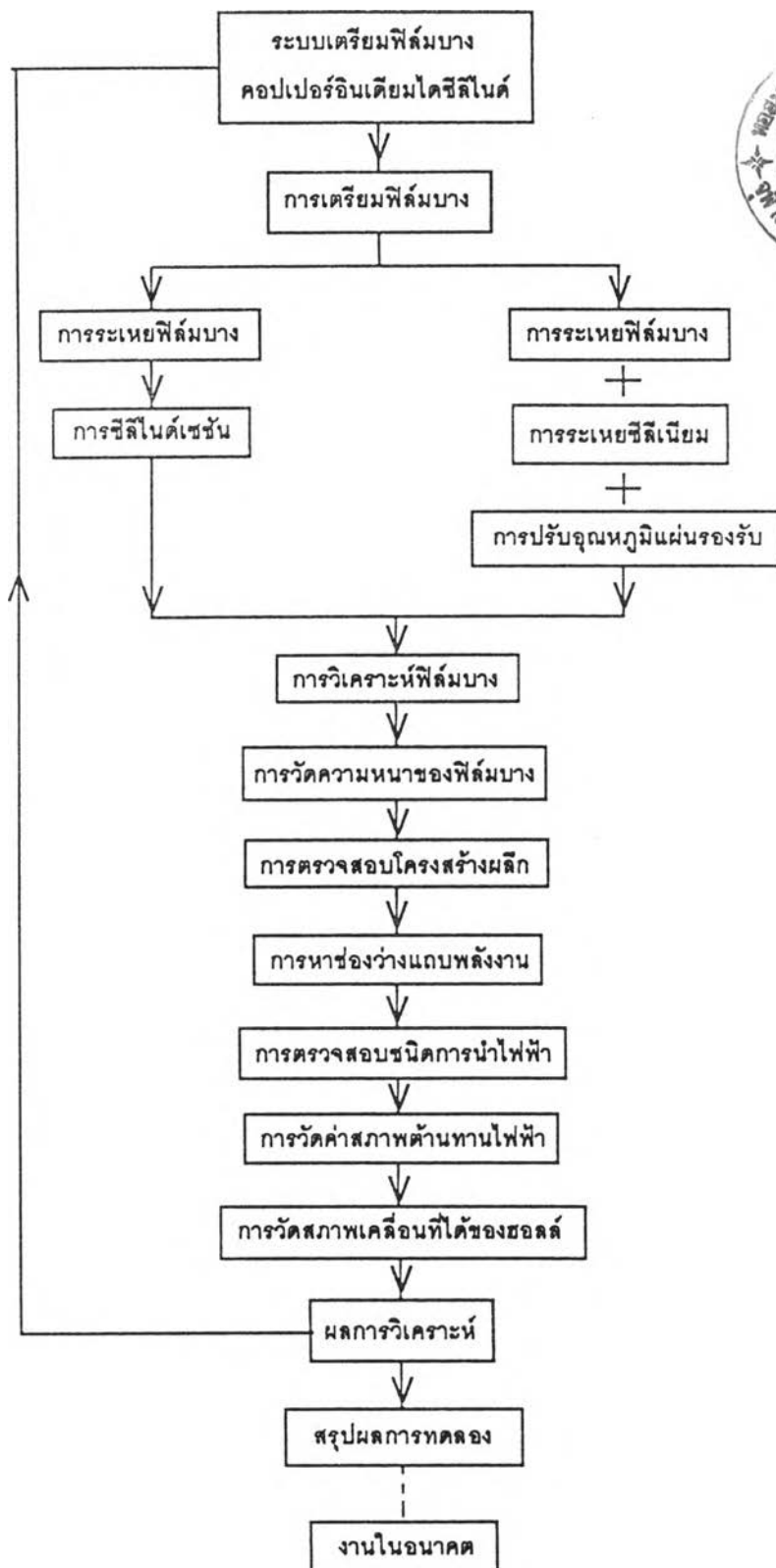
บทที่ 7

วิธีทดลองและผลการทดลอง

จากระบบเตรียมฟิล์มบางที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 ได้ทำการทดลองเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ด้วยเงื่อนไขและวิธีการต่างๆ กัน ควบคู่กับการปรับเปลี่ยนส่วนประกอบของระบบต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจสอบฟิล์มบางสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 7.1

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันอยู่สองกระบวนการคือ วิธีแรกเป็นการนำผลึกคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ไประเหยภายใต้ระบบสุญญากาศให้ได้ฟิล์มบาง แล้วปรับโครงสร้างของฟิล์มบางนั้นด้วยการซีลีไนต์เซชันในระบบแอนเนิลภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลาไม่เกิน 4 ชม. ส่วนวิธีที่สองเป็นการระเหยฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม พร้อมกับจัดโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับให้คงที่ ได้แก่ อุณหภูมิ 250, 300, 350, 400°C

ขั้นตอนการตรวจสอบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมีดังนี้คือ การวัดความหนาของฟิล์มบาง การตรวจสอบโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วความร้อน การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอเพอร์ การวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากระบบฮอลล์ ตามลำดับ



รูปที่ 7.1 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงาน

การเตรียมฟิล์มบาง

1. การเตรียมกระจกสำหรับเคลือบฟิล์มบาง

กระจกที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. นำกระจกสไลด์มาตัดและขัดรอยตัดด้วยกระดาษทราย ให้ได้ขนาดกว้าง 13 มม. และยาว 25 มม.
2. ล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกบนกระจกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ (deionized water) ผสม น้ำยาล้างจาน
3. แช่กระจกไว้ในน้ำดีไอออไนซ์ผสมน้ำยาล้างจาน แล้วนำไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) เป็นเวลานาน 5 - 10 นาที
4. ล้างน้ำยาล้างจานออกให้หมดในน้ำดีไอออไนซ์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก
5. เป่ากระจกให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน นำไปแช่กรดโครมิกเข้มข้น (chromic acid) เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมง
6. ล้างกระจกที่แช่กรดโครมิกในน้ำดีไอออไนซ์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกจนสะอาด
7. เป่ากระจกให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 45 - 60 นาที

2. การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมโคบอลต์

ในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมโคบอลต์ด้วยระบบเตรียมฟิล์มบางดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 นั้น สามารถแยกออกเป็น 2 วิธี ตามไดอะแกรม 7.1 ดังนี้

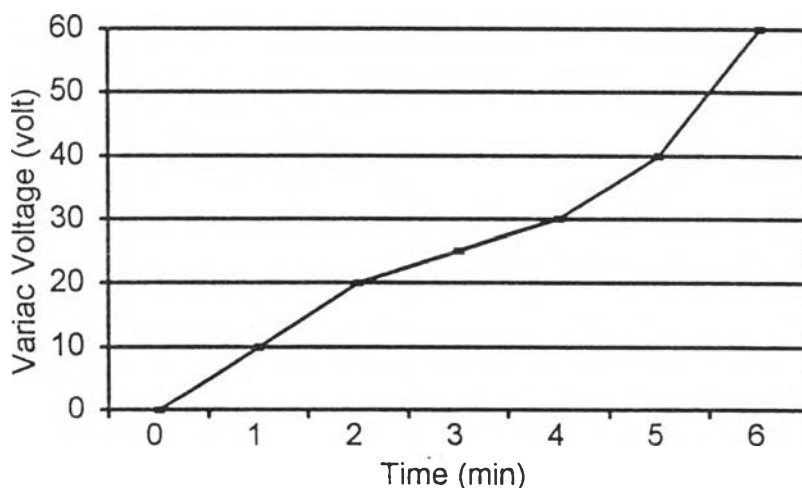
- 1) การระเหยฟิล์มบางแล้วปรับโครงสร้างด้วยการซีลีไนต์เซชัน
- 2) การระเหยฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม และปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

การระเหยฟิล์มบางแล้วปรับโครงสร้างด้วยการซีลีไนซ์

ในส่วนของการระเหยผลึกคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนซ์นี้ จัดเป็นส่วนหลักในการเตรียมฟิล์มบางของทั้ง 2 วิธี โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

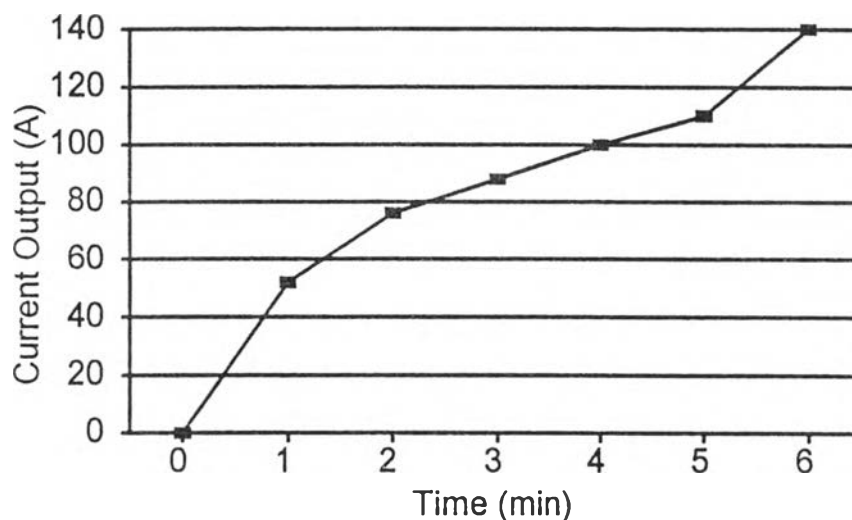
1. ชั่งสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนซ์ ขนาดพอเหมาะมีน้ำหนัก 0.3 กรัม
 2. นำสารใส่ไว้ในเบ้าโมลิบดีนัม แล้วปิดแผ่นกั้นการระเหย จากนั้นลดความดันลงด้วยระบบปั๊มสุญญากาศจนภายในห้องสุญญากาศมีความดันประมาณ 2×10^{-6} mbar เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 45 นาที
 3. เริ่มการระเหยโดยการเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 V 200 A ซึ่งเป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่เบ้าโมลิบดีนัม จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (Variable transformer) ตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 7.2 และได้กระแสไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 V 200 A ที่เข้าสู่เบ้าโมลิบดีนัมดังแสดงในรูปที่ 7.3
 4. เมื่อเข้าสู่หน้าที่ที่ 2 ปิดแผ่นกั้นการระเหย (เริ่มให้ฟิล์มเคลือบบนแผ่นรองรับ)
 5. เมื่อหมดหน้าที่ที่ 6 ปิดแผ่นกั้นการระเหย (สิ้นสุดการเคลือบฟิล์มบนแผ่นรองรับ)
- ซึ่งขั้นตอนการระเหยแบบนี้จะเหมาะสมกับขนาดของผลึก CuInSe_2 ทั้งเล็กและใหญ่

Evaporation CuInSe_2 Thin Films
Variac Voltage vs. Time



รูปที่ 7.2 แสดงการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้ในการระเหยฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนซ์

Evaporation CuInSe₂ Thin Films
Current Output vs. Time



รูปที่ 7.3 แสดงกระแสไฟฟ้าขาออกที่เข้าสู่เป้าโมลิบดีนัม

ฟิล์มบาง CuInSe₂ ที่ได้จากการระเหยจะมีโครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์ดังผลจากการตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แสดงในรูปที่ 7.10 จึงจำเป็นต้องปรับโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยวิธีการซีลีไนต์เซชัน (Selenization) โดยการแอนนัลฟิล์มบาง CuInSe₂ ในแคปซูลสแตนเลส (capsule stainless) ดังรูปที่ 6.12 ภายใต้บรรยากาศของธาตุซีลีเนียมที่มากเกินไป

การซีลีไนต์เซชัน มีขั้นตอนดังนี้

- นำฟิล์มบาง CuInSe₂ ที่ต้องการปรับโครงสร้างมาบรรจุใส่ในรางสแตนเลสโดยให้สารตัวอย่างอยู่ด้านบน และใส่สารซีลีเนียมประมาณ 1-2 เม็ด (ซีลีเนียมมีน้ำหนัก ≈ 0.06 กรัมต่อ 1 เม็ด) ไว้ในเบ้าควอทซ์หรือเบ้าเซรามิกส์ แล้วสอดไว้กลางรางสแตนเลส จากนั้นบรรจุทั้งรางสแตนเลสเข้าไปในแคปซูลขัดอัดฝาปิดลงบนวงแหวนทองแดงให้สนิทนำแคปซูลไปลดความดันลงด้วยระบบปั๊มสุญญากาศจนมีความดันต่ำกว่า 4×10^{-5} mbar. เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 4 ชั่วโมง

2. เมื่อได้แคปซูลที่ลดความดันตามต้องการแล้วจึงปิดวาล์ว นำไปเข้าในเตาแอนนัลของ LINDBREG ดังรูปที่ 6.13 เปิดเตาโดยตั้งอุณหภูมิเตาไว้ที่ 400°C แล้วแอนนัลเป็นเวลาไม่เกิน 4 ชั่วโมง

3. เมื่อแอนนัลเสร็จ ให้ปล่อยแคปซูลไว้จนกลับคืนสู่อุณหภูมิห้องจึงจะสามารถเปิดออกได้ เพื่อป้องกันอันตรายจากไอของซีลีเนียม

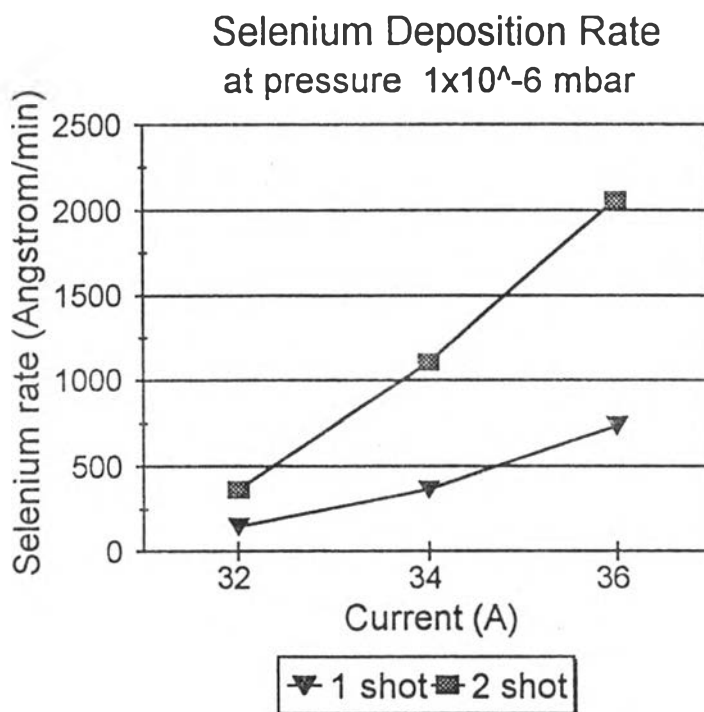
ฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธีนี้พบว่ามีความบริสุทธิ์สูง ผลการตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 7.11 ถึง 7.15 แต่ปัญหาที่สำคัญคือการลอกของฟิล์มบางที่เกิดจากซีลีเนียมที่อยู่ภายในเนื้อฟิล์มสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C และจากการเตรียมฟิล์มบางในกระบวนการซ้ำเดิม พบว่าให้ฟิล์มบางที่มีสมบัติทางไฟฟ้าไม่เหมือนเดิม เช่น การเตรียมบางครั้งได้ฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น และบางครั้งได้ฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี

ส่วนของการแก้ปัญหาฟิล์มลอกด้วยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางนี้ ได้ทำเป็นจำนวนประมาณ 250 ตัวอย่าง ได้แก่ การปรับเปลี่ยนอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในเตาแอนนัลจากอุณหภูมิห้องไปถึง 400°C ภายในเวลา 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ชม. การเพิ่มปริมาณซีลีเนียมในการแอนนัล และการเพิ่มความดันภายในแคปซูลด้วยกาซอาร์กอน เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวทำให้ต้องเปลี่ยนวิธีการเตรียมฟิล์มบางเป็นวิธีการระเหยฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมโดยมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

การระเหยฟิล์มบางภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม และปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีที่ 2 นี้ จะมีการระเหยผลึกคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์เหมือนกันกับที่ทำในวิธีที่ 1 เพียงแต่เป็นการระเหยภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมพร้อมกับการจัดโครงสร้างของฟิล์มบางโดยมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

การระเหยธาตุซีลีเนียมนี้ เป็นส่วนที่จะปฏิบัติควบคู่ไปกับการระเหยผลึก CuInSe_2 เพื่อเป็นการเพิ่มซีลีเนียมให้กับฟิล์มบาง CuInSe_2 และอัตราการเคลือบของซีลีเนียมบนแผ่นรองรับที่กระแสขนาด 32, 34, 36 A สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.4



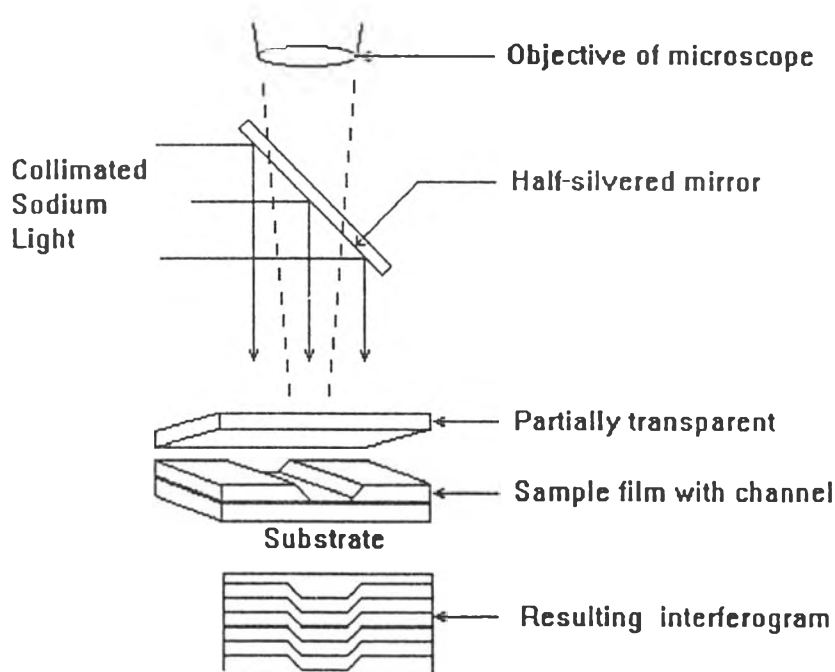
รูปที่ 7.4 แสดงอัตราการเคลือบของซีลีเนียมบนแผ่นรองรับ

ในการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับนี้จะทำงานร่วมกับการระเหยผลึก CuInSe_2 ภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมที่มากเกินไปจากส่วนระเหยธาตุซีลีเนียม โดยธาตุซีลีเนียมส่วนเกินจากการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างผลึกของ CuInSe_2 จะถูกกำจัดออกจากฟิล์มด้วยความร้อนบนแผ่นรองรับ ความร้อนที่กระจายอยู่บนแผ่นรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง ซึ่งในการทดลองจะปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับให้อยู่คงที่เป็นเวลาประมาณ 6 นาที ก่อนการเตรียมฟิล์มบาง CuInSe_2 ในแต่ละชั้น

ฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธีนี้มีผิวเรียบ เมื่อดูได้กล้องจุลทรรศน์จะเห็นเกรน (grain) กระจายสม่ำเสมอ โดยผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะแสดงในรูปที่ 7.16 ถึงรูปที่ 7.24

การวัดความหนาของฟิล์มบาง

1. การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี
(Tolansky technique)



รูปที่ 7.5 การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี [20,24]

การวัดความหนาของฟิล์มบาง CuInSe_2 โดยเทคนิคโทลานสกี สามารถแสดงหลักการของวิธีนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 7.5 ซึ่งเป็นการวัดรั้วการแทรกสอดของแสงโซเดียม ดังในรูปที่ 7.6

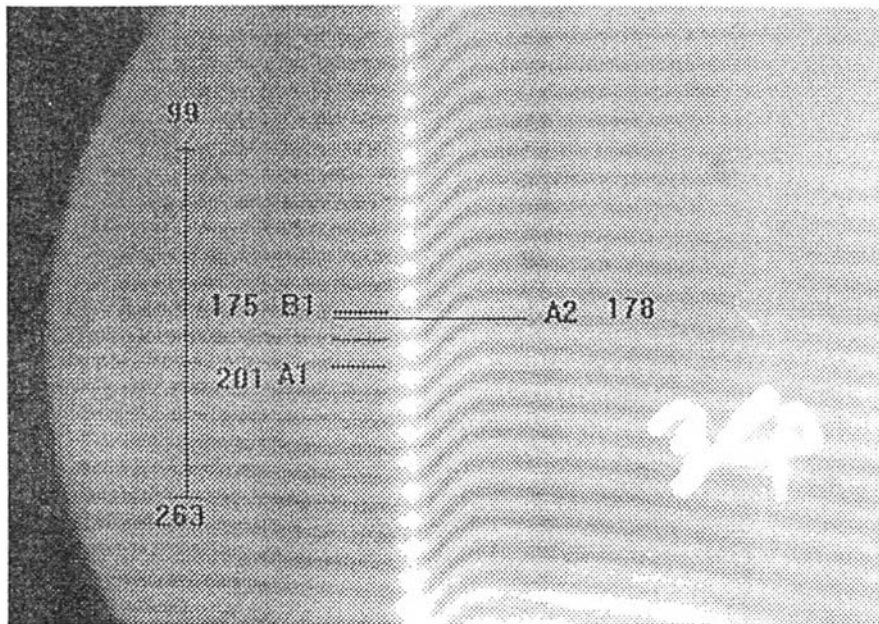
จากริ้วการแทรกสอดสามารถคำนวณความหนาของฟิล์มบาง โดยอ่านขนาดการเหลื่อมกันของรั้วการแทรกสอดจากภาพที่ขยายด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งการอ่านรั้วการแทรกสอดโดยวิธีนี้สามารถคำนวณความหนาของฟิล์มบางได้จากสมการที่ (7.1) และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2.5 ของความยาวคลื่น

$$t = \Delta n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (7.1)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของฟิล์มบาง มีหน่วยเป็นอังสตรอม

Δn คือ ขนาดการเหลื่อมกันของรั้วการแทรกสอด

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงโซเดียม มีหน่วยเป็นอังสตรอม



รูปที่ 7.6 แสดงขนาดการเหลื่อมกันของรีจการแทรกสอด
จากภาพที่ขยายด้วยคอมพิวเตอร์

จากในรูปที่ 7.6 รีจการแทรกสอดจาก A1 ไปยัง B1 มีจำนวนสองรีจ สามารถ
เทียบขนาดของการเหลื่อมกันของรีจการแทรกสอดจาก A1 ไปยัง A2 เนื่องจากความหนาของ
ฟิล์มบางได้เป็น 1.77 รีจ และได้ความหนาเป็น 5212 อังสตรอม

2. การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเครื่องวัดความหนา (Thickness monitor, FTM5)

การวัดความหนาของฟิล์มบาง CuInSe_2 ด้วยเครื่องวัดความหนาที่สำคัญคือ ต้องหาค่า Tooling factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นรองรับกับความ
หนาของฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นผลึกควอทซ์ และจากการติดตั้งให้แผ่นผลึกควอทซ์อยู่ในแนว
รัศมีเดียวกันกับแผ่นรองรับ ได้ผลการสอบเทียบดังนี้คือ ความหนาของฟิล์มบาง CuInSe_2 บนแผ่น
รองรับเป็น 5212 อังสตรอม สำหรับบนแผ่นผลึกควอทซ์เป็น 5385 อังสตรอม ได้ผลใกล้เคียง
กันคือ มีค่า Tooling factor ประมาณ 1 (โดยค่าความหนาแน่นของ $\text{CuInSe}_2 = 5.81 \text{ g/cm}^3$,
acoustic impedance หรือค่า Z-value = $8.83 \times 10^5 \text{ g/cm}^2\text{s}$)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมขึ้นมีขนาด 1 cm^2 . สามารถนำมาตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกในฟิล์มบางจะถูกบันทึกลงเป็นกราฟที่แปรกับค่ามุมสะท้อน (2θ) และจากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จะนำไปคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางต่อไป สำหรับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (wavelength, Cu- K_{α}) ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1.5405 อังสตรอม

เมื่อให้รังสีเอ็กซ์เข้าไปในฟิล์มบาง รังสีเอ็กซ์จะตกกระทบอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงสร้างผลึก แล้วอะตอมเหล่านี้จะทำให้รังสีเอ็กซ์กระเจิงออกมา โดยหน้าคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบในโครงสร้างผลึก จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (7.2)$$

สำหรับฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์จัดอยู่ในระบบเทตระโกนอล (tetragonal system, $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (7.3)$$

จากสมการที่ (7.2) เมื่อ $n=1$ แล้วแทนใส่ในสมการที่ (7.3) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (a, c) ดังนี้

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (7.4)$$

ในผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เนื่องจากระนาบ เราสามารถอ่านค่ามุมแบรกก์ (θ) จากยอดของระนาบ (h, k, l) ต่างๆ ที่ปรากฏ แล้วแทนค่าเหล่านั้นลงในสมการที่ (7.4) แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) เป็นค่าคงที่โครงสร้างผลึก (a, c) ดังนี้

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\sum_i (l_i^2)^2 \sum_i (h_i^2 + k_i^2) D_i - \sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \sum_i (l_i^2) D_i}{\sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 \sum_i (l_i^2)^2 - \left(\sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \right)^2} \quad (7.5)$$

$$\frac{1}{c^2} = \frac{\sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 \sum_i (l_i^2) D_i - \sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \sum_i (h_i^2 + k_i^2) D_i}{\sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 \sum_i (l_i^2)^2 - \left(\sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \right)^2} \quad (7.6)$$

เมื่อ $D_i = (4 \sin^2 \theta_i) / \lambda^2$

จากแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมด้วยวิธีที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7.10 ถึง 7.15 พบว่าฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่ได้จากการระเหยมีโครงสร้างผลึกไม่เป็นแบบซาลโคไพไรท์ และหลังจากปรับโครงสร้างผลึกด้วยกระบวนการซีลีไนด์เซชันโดยการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C นาน 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 3.5 ชม. พบว่าฟิล์มบาง CuInSe_2 มีการปรับโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไพไรท์ที่มีค่าคงที่โครงผลึกใกล้เคียงกัน คือ

ค่า $a \approx 5.7847 - 5.7947 \text{ \AA}$, $c \approx 11.5863 - 11.6156 \text{ \AA}$ และ $c/a \approx 2.0008 - 2.0101$

ผลการคำนวณค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมด้วยวิธีที่ 1 นี้ แสดงไว้ในตารางที่ 7.1

ฟิล์มบาง	แอนนัลที่ $T=400^\circ\text{C}$	a (Å)	c (Å)	c/a
CISP12	ก่อนแอนนัล	ไม่มีโครงสร้าง		
CISP06	0.5 ชม.	5.7899	11.6071	2.0047
CISP42	1.0 ชม.	5.7947	11.5997	2.0017
CISP13	1.5 ชม.	5.7784	11.6156	2.0101
CISP15	3.0 ชม.	5.7905	11.5863	2.0008
CISP43	3.5 ชม.	5.7847	11.5873	2.0031

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบาง CuInSe_2 โดยการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C ตามช่วงเวลาต่างๆ

จากแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 7.16 ถึง 7.24 ในฟิล์มบาง CuInSe_2 ชุดที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม $I_{\text{Se}} = 32 \text{ A}$ $\text{Se} = 1 \text{ shot/quartz}$ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 250, 300, 350, 400°C พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ที่มีค่าคงที่โครงสร้างผลึกใกล้เคียงกัน คือ

ค่า $a \approx 5.7883 - 5.7938 \text{ \AA}$, $c \approx 11.5748 - 11.5860 \text{ \AA}$ และ $c/a \approx 1.9992 - 2.0005$ สำหรับระนาบ (112) จะมีความเข้มมากขึ้นตามอุณหภูมิของแผ่นรองรับซึ่งแสดงถึงความสมบูรณ์ของผลึกในฟิล์มบางที่มีมากขึ้นตามอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

ส่วนฟิล์มบาง CuInSe_2 ชุดที่เตรียมโดยอุณหภูมิของแผ่นรองรับคงที่ ($T_{\text{sub}} = 300^\circ\text{C}$) โดยเปลี่ยนอัตราการเคลือบของซีลีเนียมตามในรูปที่ 7.4 พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเคลือบของซีลีเนียมที่สูงขึ้น และระนาบ (112) จะมีความเข้มมากขึ้นตามอัตราการเคลือบของซีลีเนียมที่สูงขึ้นด้วย

ผลการคำนวณค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 นี้ แสดงไว้ในตารางที่ 7.2

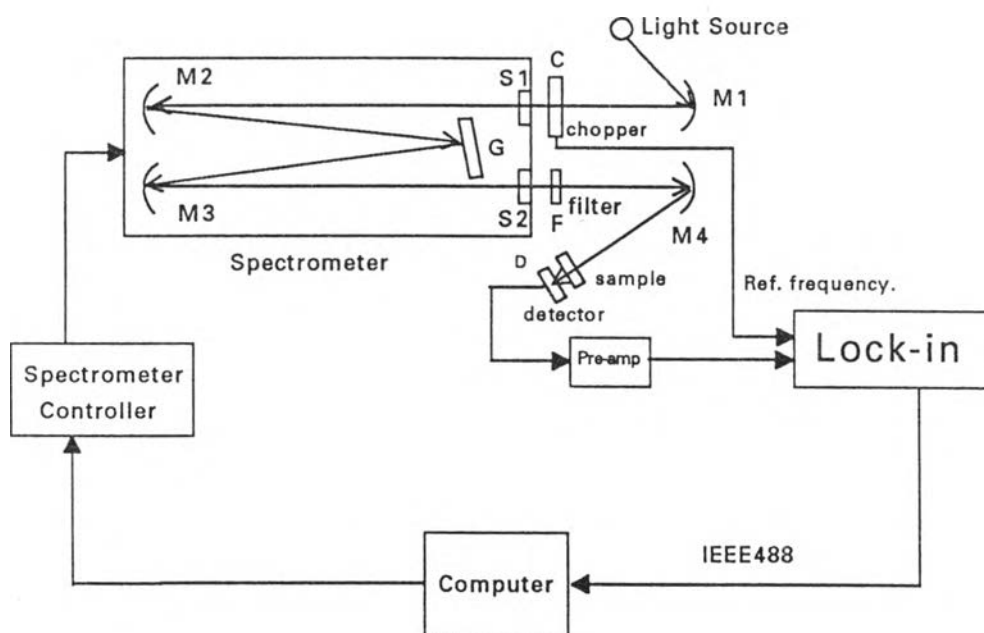
ฟิล์มบาง	$T_{\text{sub}} (^\circ\text{C})$	$I_{\text{Se}} (\text{A})$	$\text{Se} (\text{shot/quartz})$	$a (\text{\AA})$	$c (\text{\AA})$	c/a
CISAA1	250	32	1	5.7920	11.5845	2.0000
CISAB1	300	32	1	5.7883	11.5748	1.9997
CISAC1	350	32	1	5.7938	11.5835	1.9992
CISAD1	400	32	1	5.7914	11.5860	2.0005
CISAH1	300	34	1	5.8002	11.6043	2.0006
CISAG1	300	36	1	5.8001	11.6001	2.0000
CISAF1	300	32	2	5.7922	11.5848	2.0000
CISAJ1	300	34	2	5.7945	11.5937	2.0007
CISAI1	300	36	2	5.7976	11.5949	1.9999

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมและมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับในกรณีต่างๆ

ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน

การหาขนาดช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาขอบการดูดกลืนพื้นฐานซึ่งเป็นพลังงานที่น้อยที่สุดของแสงที่จะสามารถทำให้อิเล็กทรอนิกส์มีการย้ายสถานะพลังงานจากสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำพลังงานค่านี้จะเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การศึกษาขอบการดูดกลืนแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไปตามพลังงานของแสงที่ตกกระทบ และทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำที่เป็นแผ่นบางๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4

1. ระบบการทดลองและวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง



รูปที่ 7.7 แสดงระบบการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ ได้จัดเครื่องมือดังในรูปที่ 7.7 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกสะท้อนโดยกระจกเงา M1 ผ่านตัวตัดแสง (chopper) C ไปยังช่องแคบเดี่ยว (single slit) S1 แสงที่ออกจากช่องแคบเดี่ยวถูกสะท้อนต่อโดยกระจกเงา M2 ไปยังเกรตติง (grating) G ภายในเครื่องกำเนิดแสงเอกซเรย์ โดย

เกรตติงจะแยกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ตกกระทบลงบนกระจกเว้า M3 สะท้อนไปยัง
 ชั้นผลึก โดยผ่านช่องแคบเดี่ยว S2, แผ่นกรองแสง (filter) F และกระจกเว้า M4 ซึ่งหัววัดแสง
 (detector) D จะคอยวัดแสงที่ผ่านฟิล์มบาง (sample) ออกมา สัญญาณที่ได้จากหัววัดแสงจะถูก
 ขยายให้ได้สัญญาณโตขึ้นด้วยเครื่องขยายสัญญาณขั้นต้น (pre-amplifier) และส่งเข้าเครื่อง
 ลอคอินแอมพลิไฟเออร์ (lock-in amplifier) เครื่องลอคอินแอมพลิไฟเออร์จะคัดเลือกแต่สัญญาณ
 ที่มีความถี่เดียวกันกับตัววัดแสงเท่านั้น และขยายสัญญาณให้อยู่ในช่วง 0-1 V สัญญาณนี้จะถูก
 ส่งผ่านระบบเชื่อมโยงให้แก่คอมพิวเตอร์ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์
 ทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 9000 ถึง 18000 อังคstrom ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้หัววัดแบบ
 เยอรมาเนียม (Ge) ซึ่งสามารถตอบสนองได้ดีในช่วงความยาวคลื่นใกล้แสงใต้แดง (near infrared)
 กรองแสงที่ใช้สามารถขจัดแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 10500 อังคstrom และแหล่งกำเนิด
 แสงเป็นหลอดทังสเตนเฮไลน์ขนาด 250 W

สัญญาณความเข้มแสงที่ผ่านฟิล์มบาง CuInSe_2 (I_t) และสัญญาณความเข้มแสงที่วัด
 โดยไม่มีฟิล์มบาง (I_0) จะถูกนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0}{I_t} \right) \quad (7.7)$$

ความหนาของฟิล์มบาง CuInSe_2 คือ $d = 2.5 \mu\text{m}$. ในการทดลองค่าสัมประสิทธิ์
 การดูดกลืนที่คำนวณได้จะต้องลบออกด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (α_0) ซึ่งหาได้
 จากการคาดหมาย (extrapolation) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนอาจจะเกิดมาจากการดูดกลืน
 อันเนื่องมาจากพาหะอิสระ หรือจุดบกพร่อง (defect) ที่ได้รับพลังงานจากภายนอกมากกระตุ้น
 ให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ (interband transition)
 และได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเป็น $(\alpha - \alpha_0)$

2. การหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน

สำหรับฟิล์มบาง CuInSe_2 มีการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง โดยความสัมพันธ์
 ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่บริเวณขอบเขตการดูดกลืนแสงพื้นฐานกับขนาดช่องว่างแถบ

พลังงาน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 สมการที่ (4.9) คือ

$$((\alpha - \alpha_0)h\nu)^2 = A^2(h\nu - E_g) \quad (7.8)$$

ตามความสัมพันธ์ของเส้นกราฟระหว่าง $((\alpha - \alpha_0)h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ในช่วงของการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ตัดแกน $h\nu$ ที่จุด E_g

จากการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 7.25 ถึง 7.33 ในฟิล์มบาง CuInSe_2 ชุดที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม $I_{se} = 32 \text{ A}$ $Se = 1 \text{ shot/quartz}$ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 250, 300, 350, 400°C พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำสุดที่ $T_{sub} = 400^\circ\text{C}$ และค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของแผ่นรองรับ

ส่วนฟิล์มบาง CuInSe_2 ชุดที่เตรียมโดยอุณหภูมิของแผ่นรองรับคงที่ ($T_{sub} = 300^\circ\text{C}$) โดยเปลี่ยนอัตราการเคลือบของซีลีเนียมตามในรูปที่ 7.4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเพิ่มขึ้นตามอัตราการเคลือบของซีลีเนียมที่สูงขึ้นและช่องว่างแถบพลังงานมีค่าคงที่ประมาณ 1.01 eV.

ผลการหาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการหาขนาดช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CuInSe_2 (เฉพาะฟิล์มในชุดที่เลือกมาแสดง) จะแสดงผลไว้ในตารางที่ 7.3

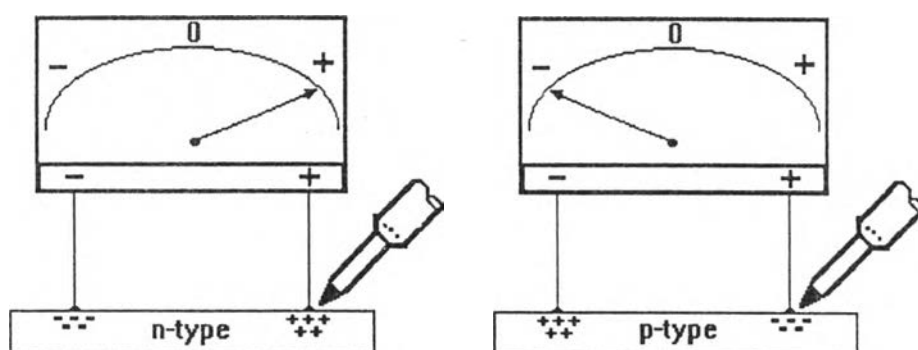
ฟิล์มบาง	T _{substrate} (°C)	I _{se} (A)	Se (shot/quartz)	E _g (eV) ± 0.005 eV	α (1/cm)
CISAA1	250	32	1	1.004	5.40E+05
CISAB1	300	32	1	1.007	6.00E+05
CISAC1	350	32	1	1.006	6.40E+05
CISAD1	400	32	1	1.012	4.80E+05
CISAH1	300	34	1	1.010	8.55E+05
CISAG1	300	36	1	1.010	8.40E+05
CISAF1	300	32	2	1.010	8.30E+05
CISAJ1	300	34	2	1.010	8.50E+05
CISAI1	300	36	2	1.009	8.50E+05

ตารางที่ 7.3 แสดงขนาดช่องว่างแถบพลังงานและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน
ของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซิลิเนียม
และมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับในกรณีต่างๆ

การตรวจสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า

1. การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีชั่วคราวความร้อน (hot probe method)

การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ด้วยวิธีชั่วคราวความร้อนนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว มีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้คือนำฟิล์มบางที่ต้องการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้ามาต่อขั้วเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ จากนั้นจึงหิ้วแรงบัดกรีไปที่บริเวณเหนือฟิล์มบางที่ต่อกับขั้วบวกของโวลต์มิเตอร์โดยไม่สัมผัสกับเนื้อฟิล์มบาง ถ้าเข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แสดงว่าฟิล์มบางนั้นเป็นชนิดเอ็น เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายมายังขั้วซึ่งเย็นกว่า ซึ่งเป็นขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ ทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก แต่ถ้าฟิล์มบางเป็นชนิดพีเข็มของโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบ เนื่องจากโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายมายังขั้วเย็น ซึ่งเป็นขั้วลบของโวลต์มิเตอร์ทำให้เข็มของโวลต์มิเตอร์ชี้ไปทางลบ ดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยวิธีชั่วคราวความร้อน

2. การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอเพอร์

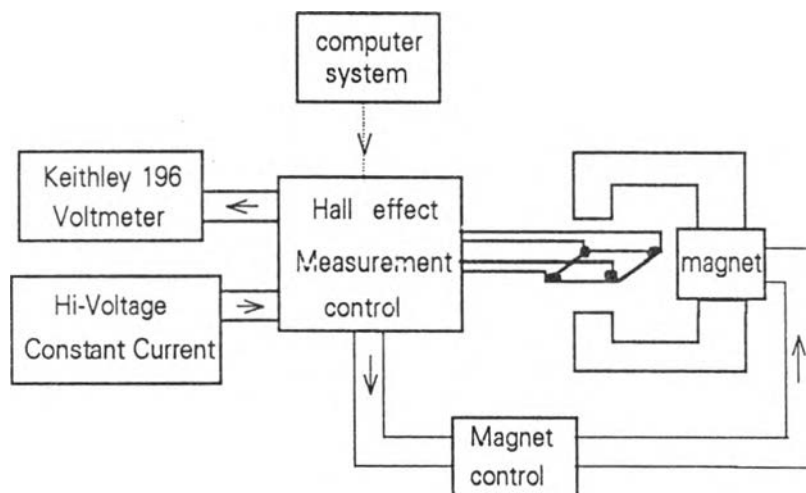
การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ พบว่าการใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนฟิล์มบางโดยตรง กระแสไฟฟ้าไหลผ่านฟิล์มบางได้น้อยมากเพราะเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมที่รอยต่อของปลายเข็มที่ใช้ทำขั้วสัมผัสกับฟิล์มบาง เพื่อให้การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ค่าถูกต้อง จึงต้องทำรอยต่อแบบอินทรมิกซ์บนฟิล์มบาง โดยใช้กาวยีนทำรอยต่อบน

ฟิล์มบางทั้งสองที่สุด แล้วจึงใช้ขั้วสัมผัสกดลงบนกาวเงินทั้งสองที่สุด วัดกระแส I_{MN} และวัดความต่างศักย์ V_{PO} ค่าต่างๆ รวมทั้งค่ากระแส I_{NO} และความต่างศักย์ V_{MP} แล้วนำข้อมูลที่วัดได้มาเขียนกราฟเพื่อหาค่า $R_{MN,OP}$ และ $R_{NO,PM}$ จากความชันของกราฟตามลำดับ และจากความหนาของฟิล์มบางเป็น (d) สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังสมการ

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{(R_{MN,OP} + R_{NO,PM})}{2} f\left(\frac{R_{MN,OP}}{R_{NO,PM}}\right) \quad (7.9)$$

3. การวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากระบบฮอลล์

ในการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของฟิล์มบาง CuInSe_2 ได้ทำการวัดด้วยระบบฮอลล์ของสมฤทธิ์ [22] เป็นระบบวัดและเก็บข้อมูลที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงผังการทำงานได้ดังรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 แสดงระบบการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์

สำหรับฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมด้วยวิธีที่ 2 เป็นฟิล์มบางที่มีผิวเรียบจึงสามารถนำมาวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ส่วนการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จะสามารถวัดได้เฉพาะฟิล์มบางที่มีความต้านทานไม่เกิน $15 \text{ M}\Omega$ (วัดได้จากขั้วไฟฟ้าในแต่ละคู่ของฟิล์มบาง)

ฟิล์มบางชุดที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียม $I_{Se} = 32 \text{ A}$ $Se = 1 \text{ shot/quartz}$ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น $250, 300, 350, 400^\circ\text{C}$ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำคือ $250,$

และที่อุณหภูมิสูงคือ 350, 400°C ฟิล์มบาง CuInSe_2 มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ($< 1 \Omega\text{cm}$.)

สำหรับค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จะมีค่าลดลงและความหนาแน่นของพาหะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับสูงขึ้น

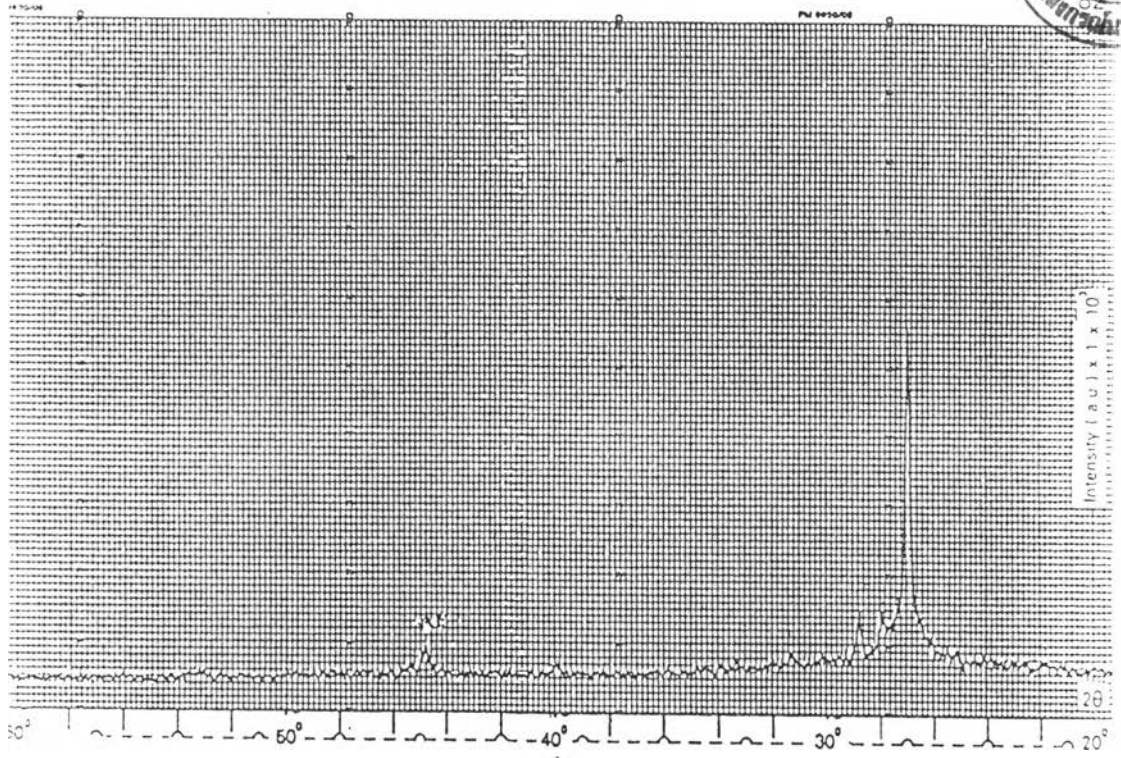
สำหรับฟิล์มบาง CuInSe_2 ชุดที่เตรียมโดยอุณหภูมิของแผ่นรองรับคงที่ ($T_{\text{sub}} = 300^\circ\text{C}$) โดยเปลี่ยนอัตราการเคลือบของซีลีเนียมตามในรูปที่ 7.4 พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นและชนิดการนำไฟฟ้าเปลี่ยนจากแบบเอ็นไปเป็นแบบพี ตามอัตราการระเหยของซีลีเนียม

ผลการวัดชนิดของการนำไฟฟ้า สภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ของฟิล์มบาง CuInSe_2 (เฉพาะในชุดที่เลือกมาแสดง) จะแสดงผลไว้ในตารางที่ 7.4

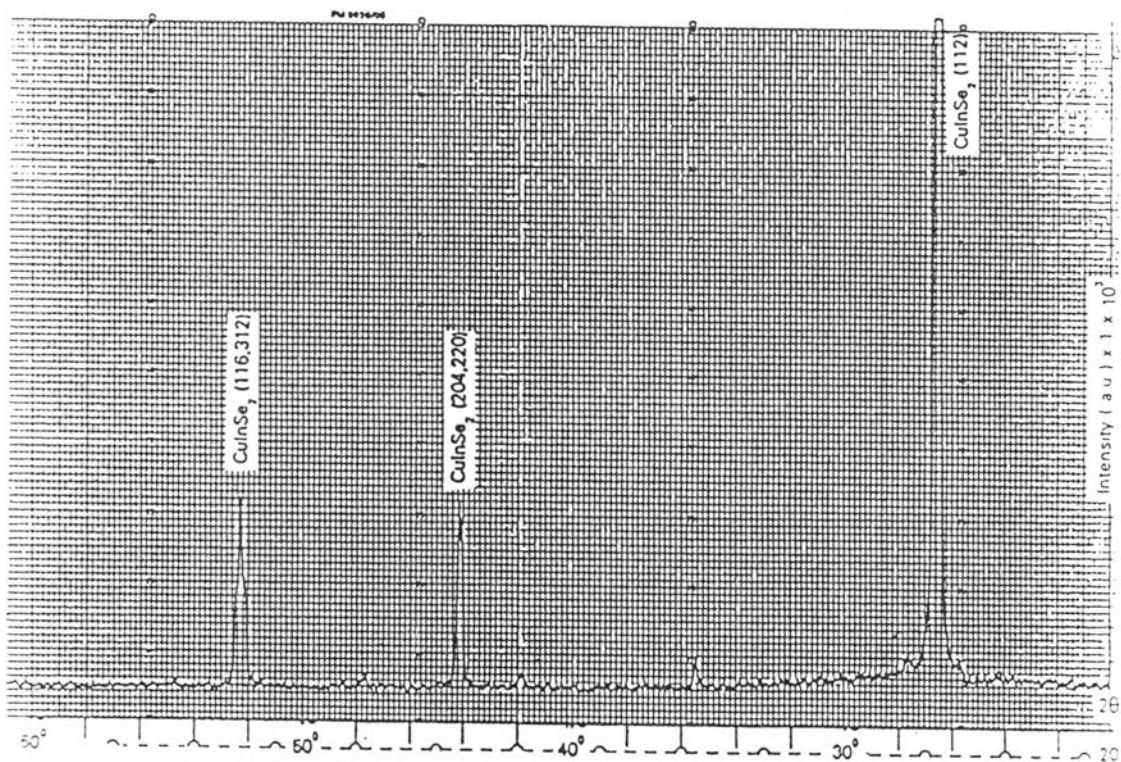
ฟิล์มบาง	$T_{\text{substrate}}$ ($^\circ\text{C}$)	I_{se} (A)	Se (shot/quartz)	type	ρ (ohm-cm)	μ $\text{cm}^2/\text{V.s}$	n $1/(\text{cm}^3)$
CISAA2	250	32	1	n	525.4079	77.5926	1.4402E+14
CISAB2	300	32	1	n	825.9660	***	***
CISAC2	350	32	1	p	0.1142	9.3874	4.2455E+17
CISAD2	400	32	1	p	0.0165	1.1344	3.4636E+20
CISAH2	300	34	1	p	1323.4035	***	***
CISAG2	300	36	1	n	4.3231	***	***
CISAF2	300	32	2	n	741.7706	***	***
CISAJ2	300	34	2	p	717.8233	***	***
CISAI2	300	36	2	p	14418.7526	***	***

*** ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากความต้านทานสูง

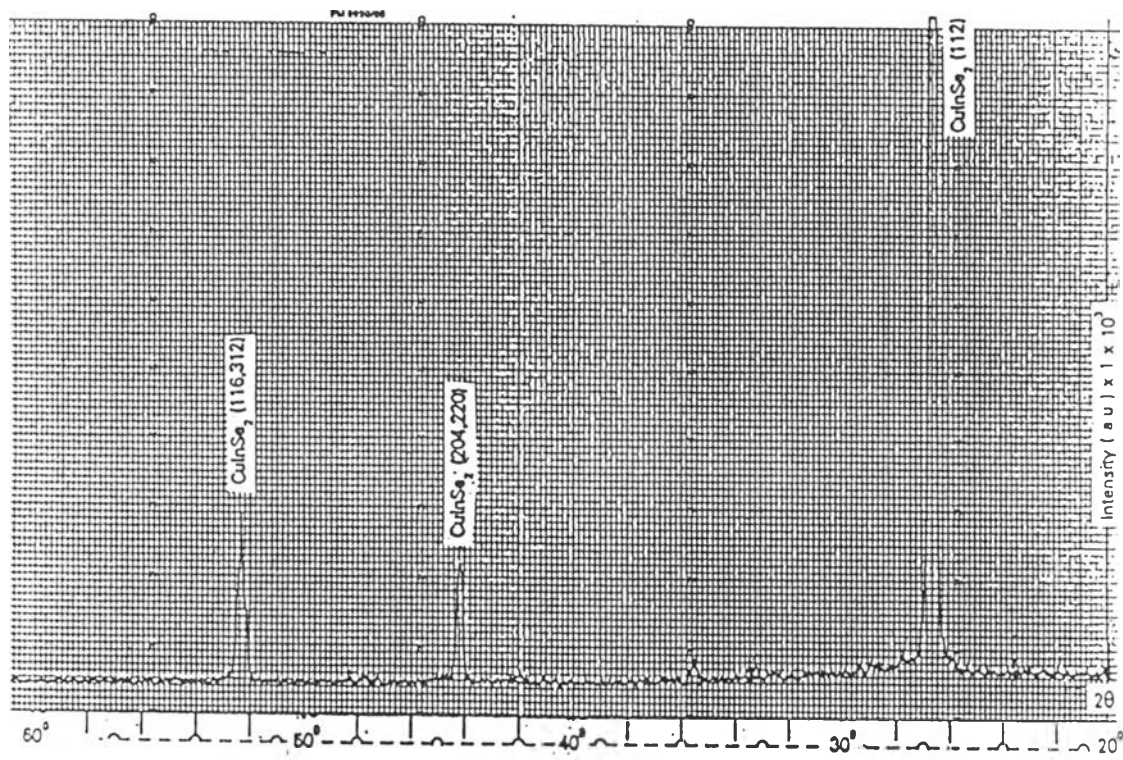
ตารางที่ 7.4 แสดงลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CuInSe_2 ที่เตรียมภายใต้บรรยากาศของซีลีเนียมและมีการปรับอุณหภูมิของแผ่นรองรับในกรณีต่างๆ



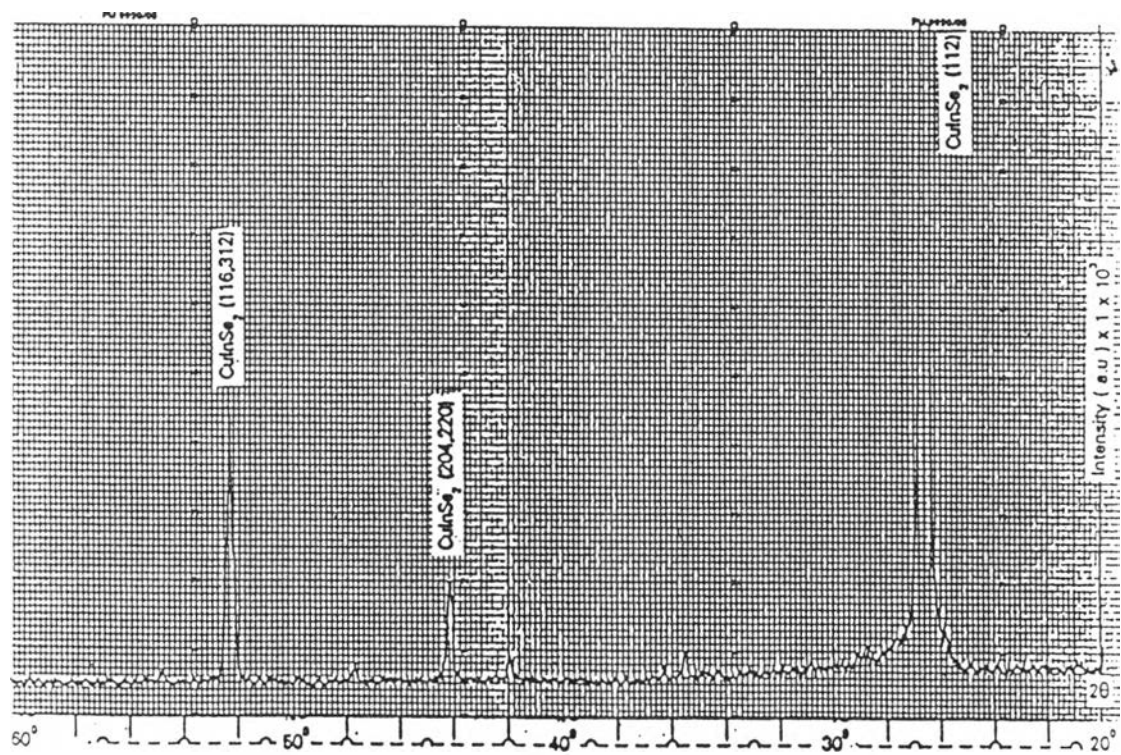
รูปที่ 7.10 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CIS12 ก่อนแอนนีสล



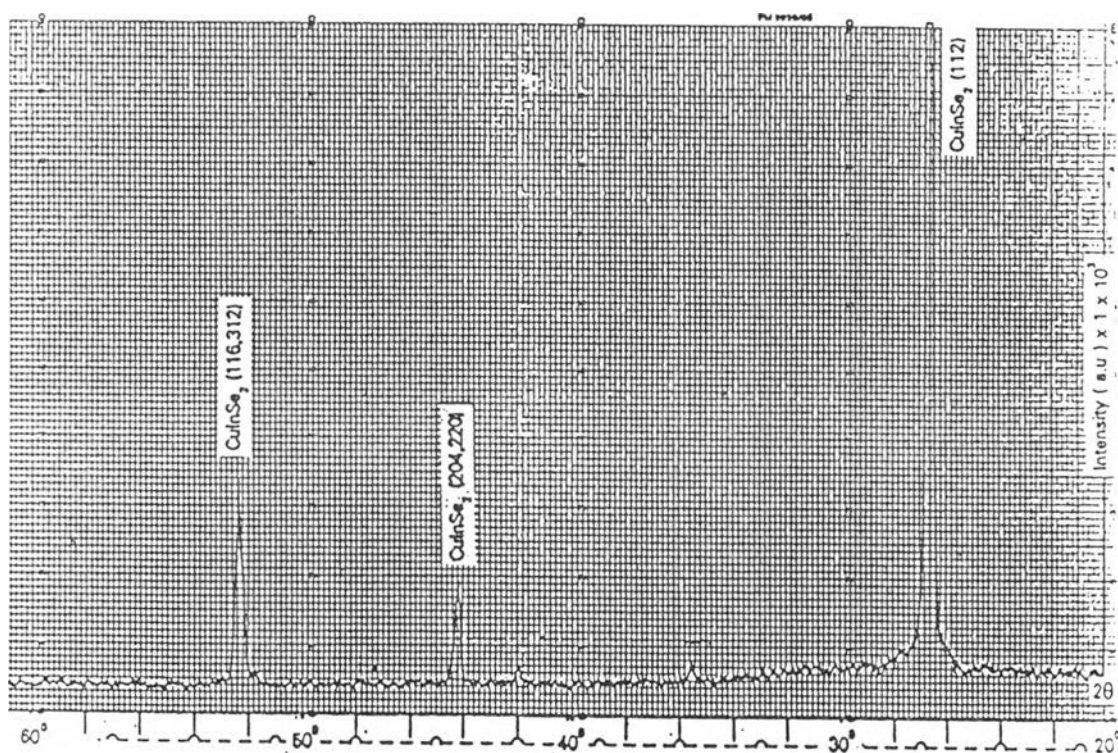
รูปที่ 7.11 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CIS06 แอนนีสลที่ $T=400^{\circ}\text{C}$ นาน 0.5 ชม.



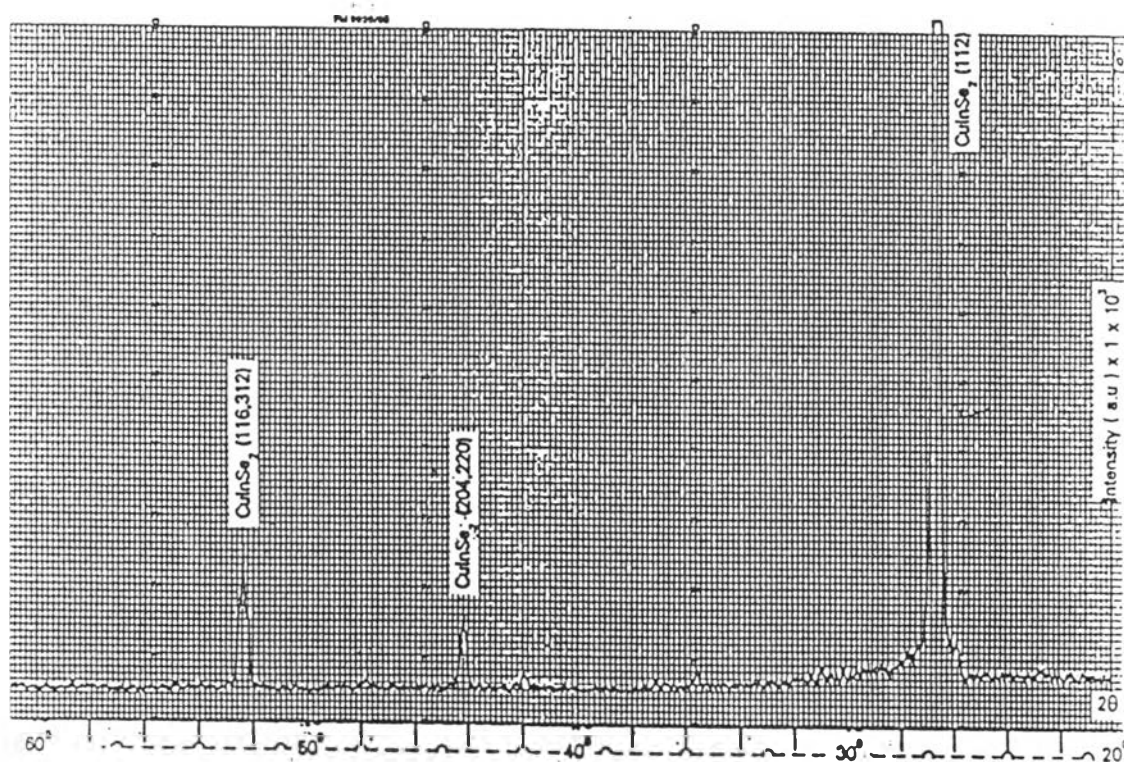
รูปที่ 7.12 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISF42 แอนนัลที่ $T=400^{\circ}\text{C}$ นาน 1.0 ชม.



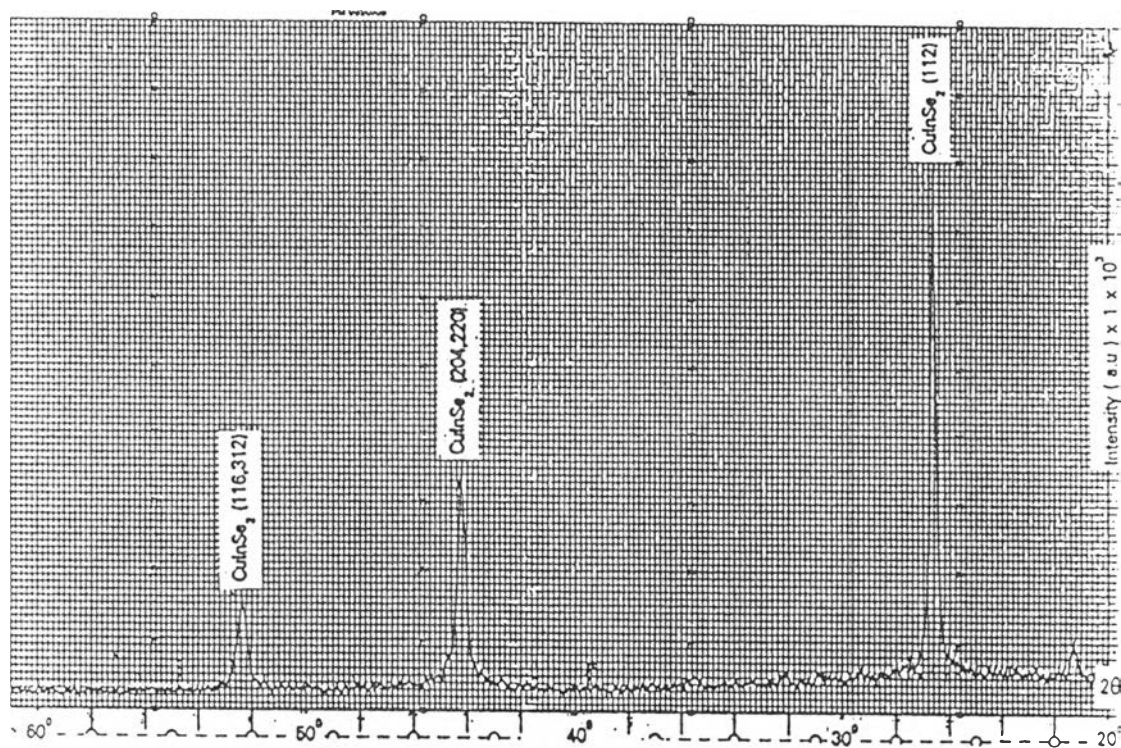
รูปที่ 7.13 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISF13 แอนนัลที่ $T=400^{\circ}\text{C}$ นาน 1.5 ชม.



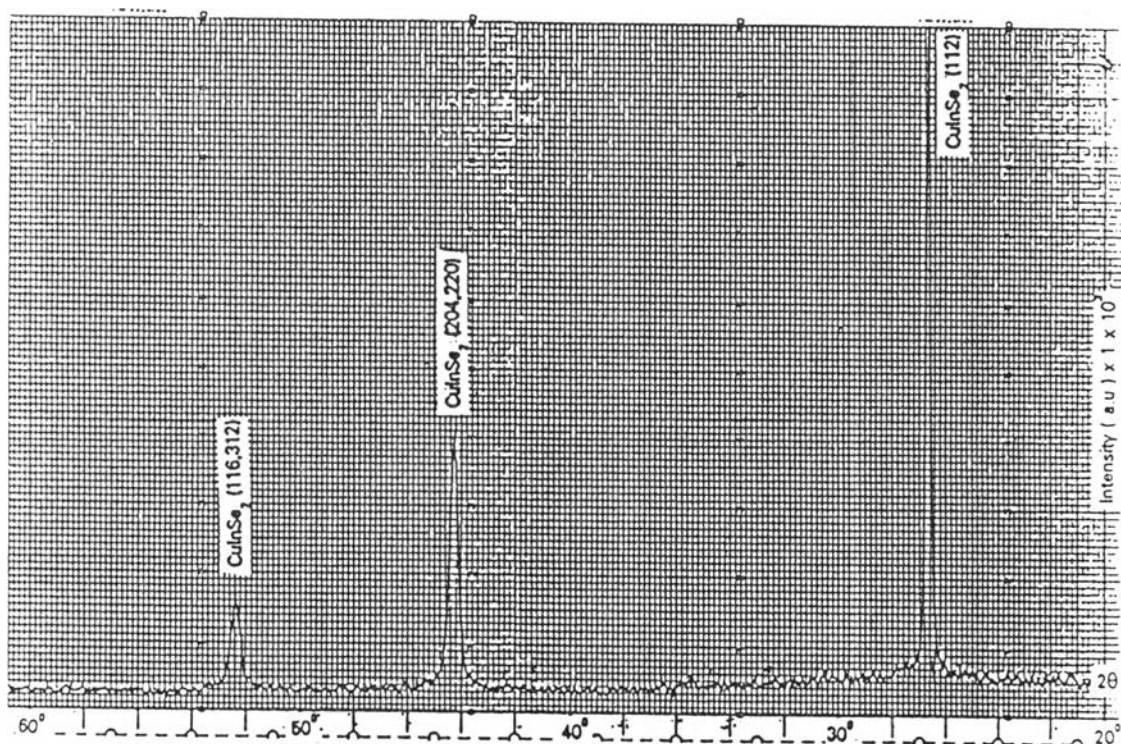
รูปที่ 7.14 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP15 แอนนัลที่ $T=400^{\circ}\text{C}$ นาน 3.0 ชม.



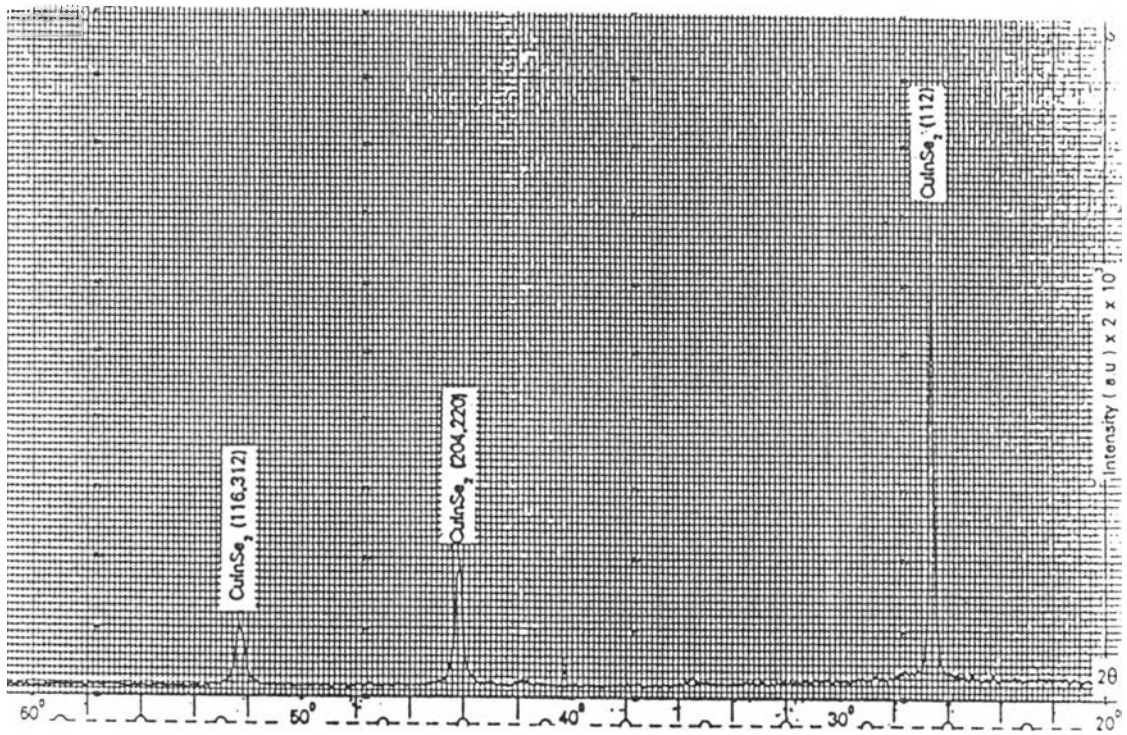
รูปที่ 7.15 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISP43 แอนนัลที่ $T=400^{\circ}\text{C}$ นาน 3.5 ชม.



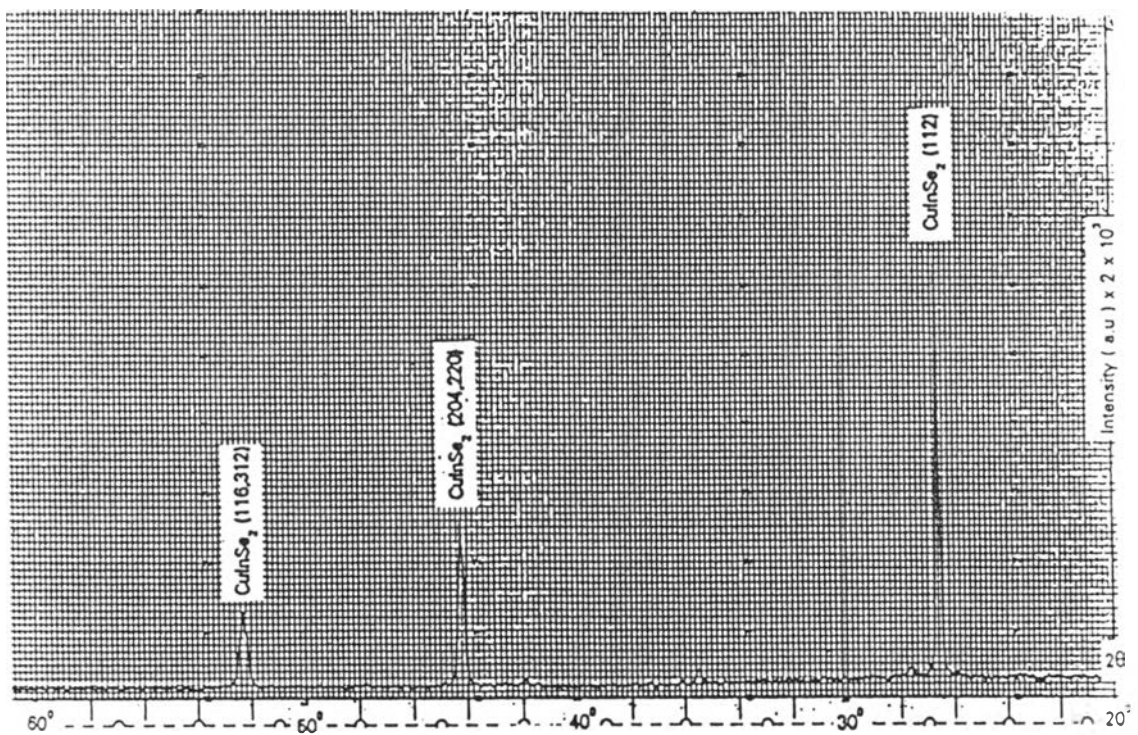
รูปที่ 7.16 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAA1 Tsub=250°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz



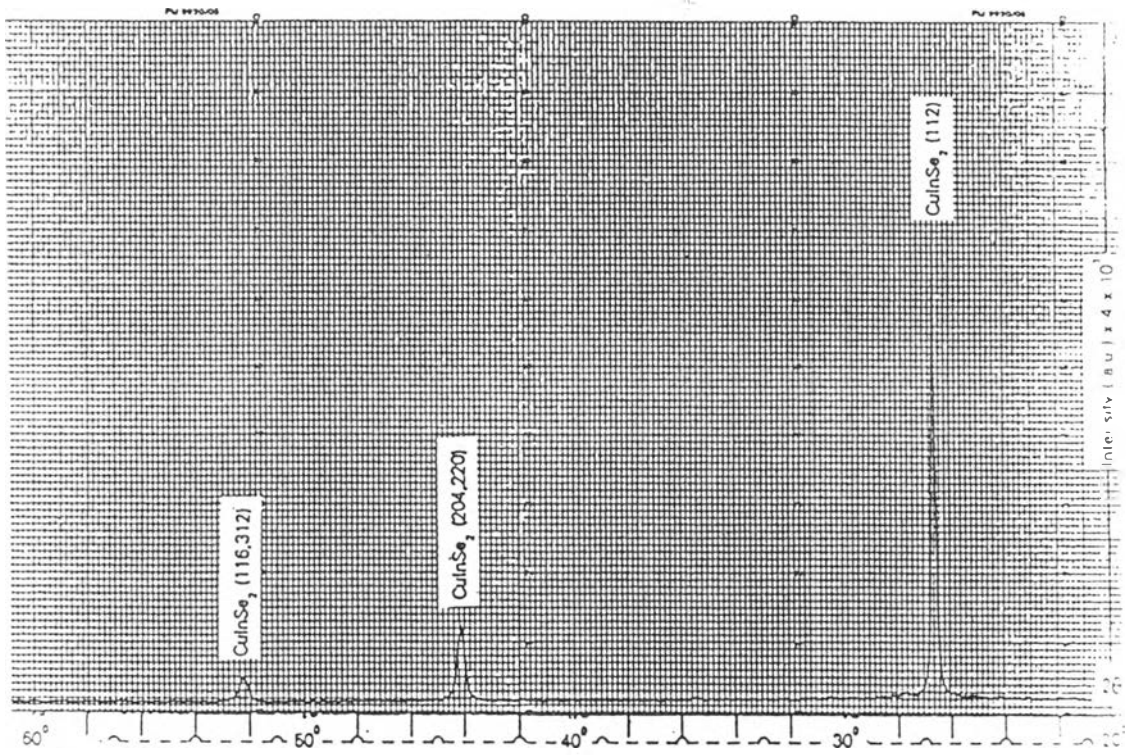
รูปที่ 7.17 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAB1 Tsub=300°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz



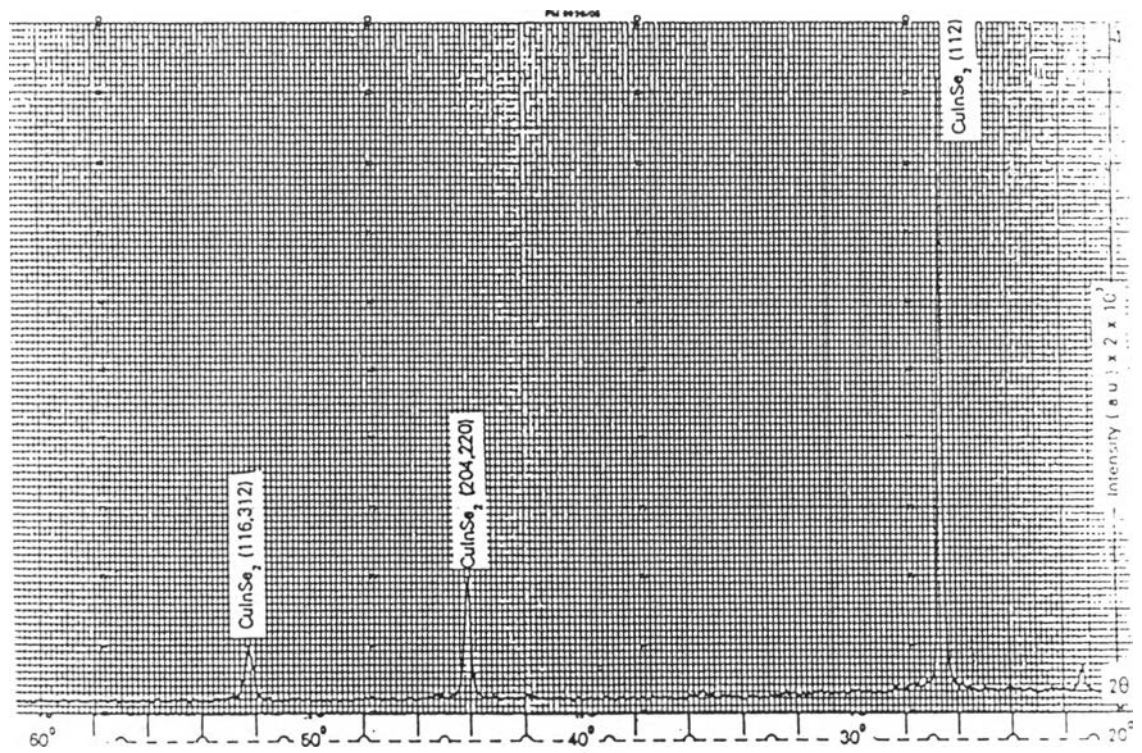
รูปที่ 7.18 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAC1 $T_{\text{sub}}=350^{\circ}\text{C}$ $I_{\text{se}}=32\text{ A}$ $\text{Se}=1\text{ shot/quartz}$



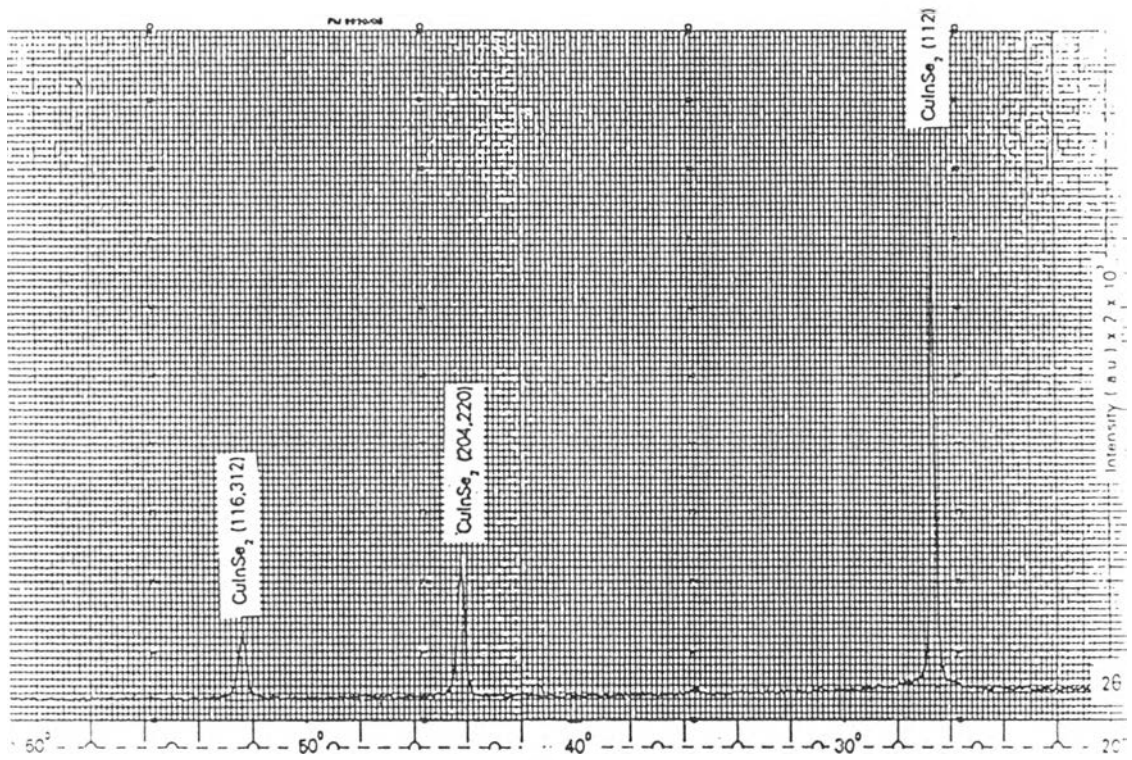
รูปที่ 7.19 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAD1 $T_{\text{sub}}=400^{\circ}\text{C}$ $I_{\text{se}}=32\text{ A}$ $\text{Se}=1\text{ shot/quartz}$



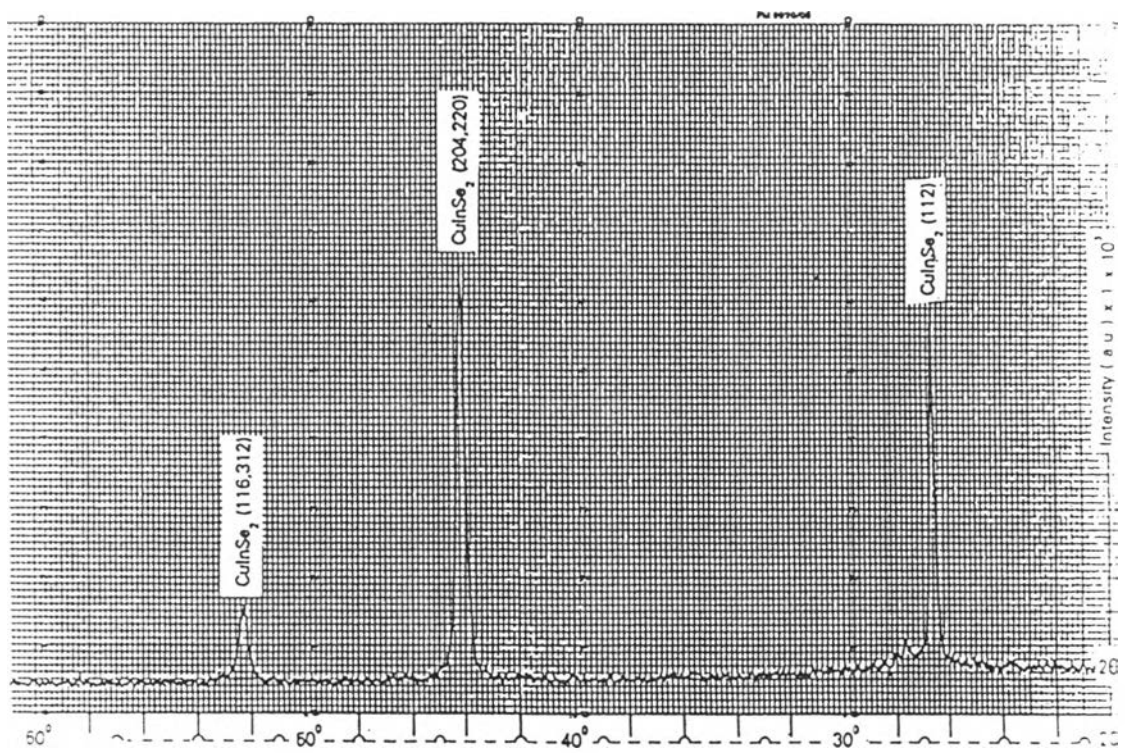
รูปที่ 7.20 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAH1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=34$ A $\text{Se}=1$ shot/quartz



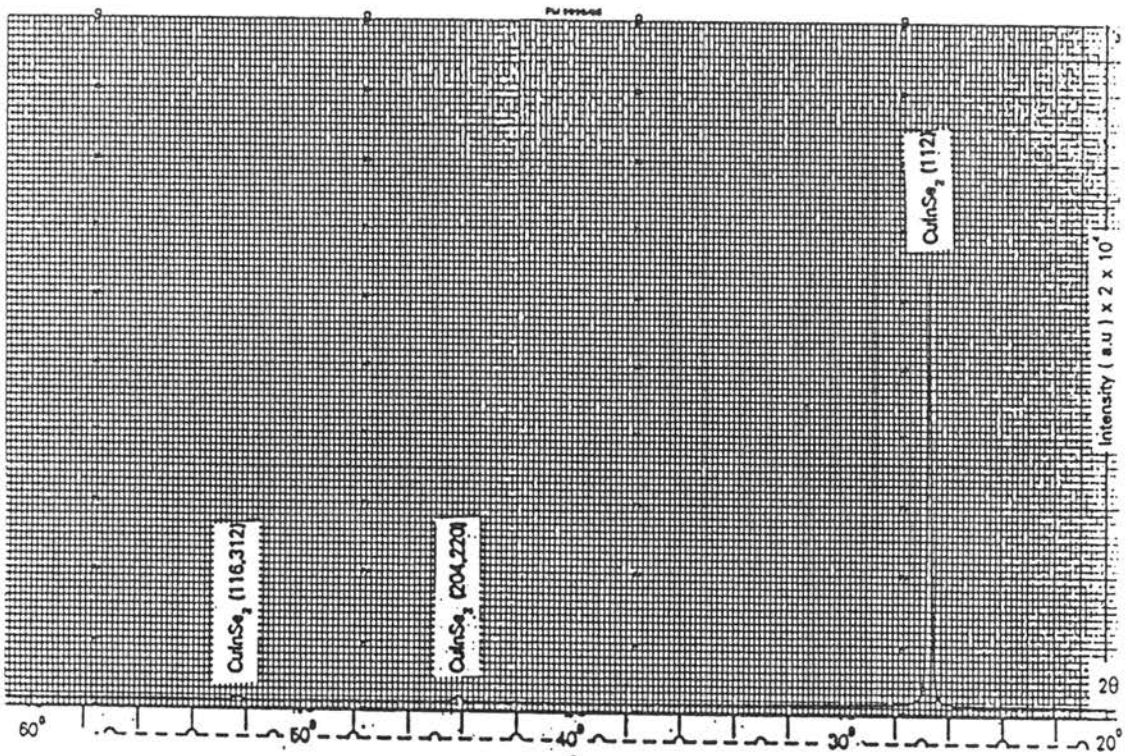
รูปที่ 7.21 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAG1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=36$ A $\text{Se}=1$ shot/quartz



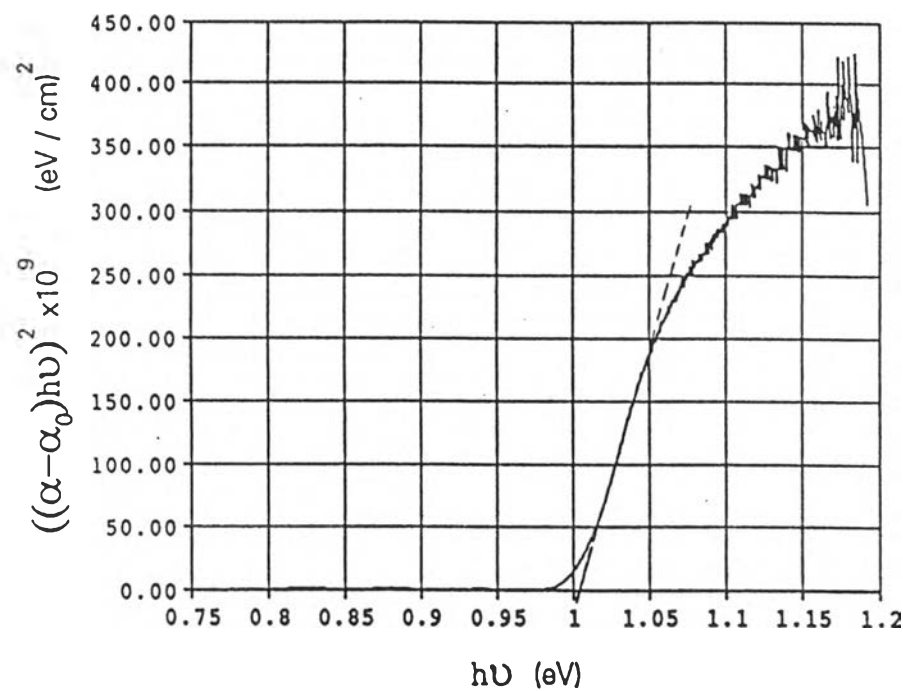
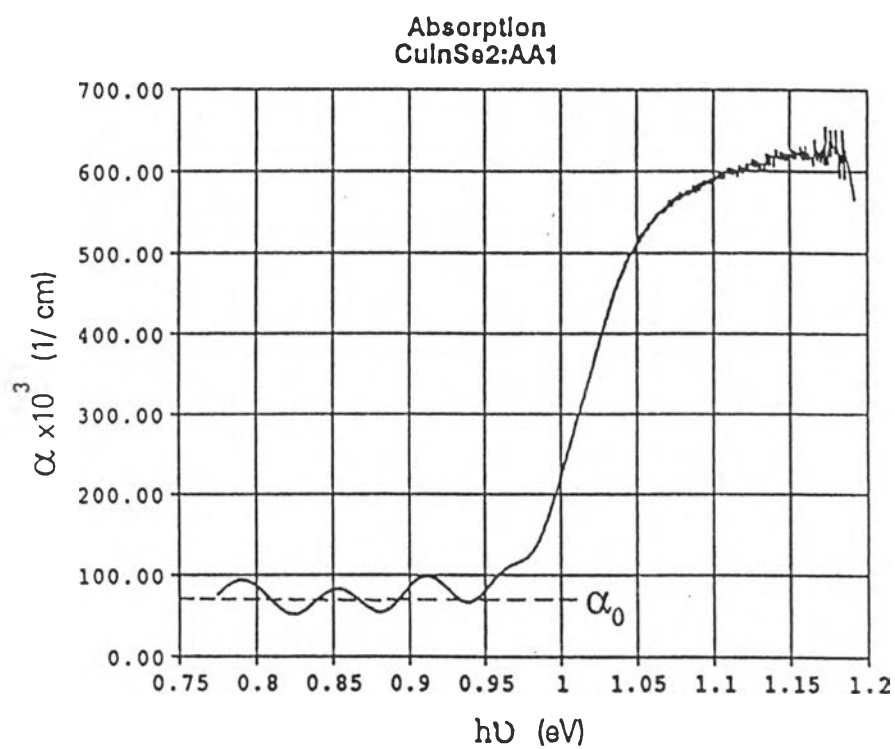
รูปที่ 7.22 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAF1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=32$ A $\text{Se}=2$ shot/quartz



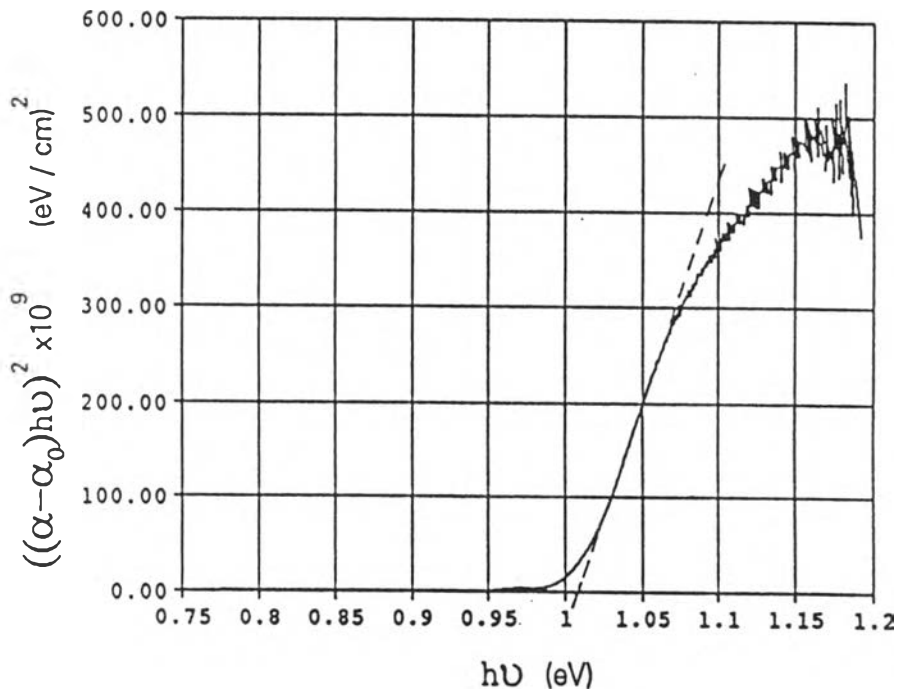
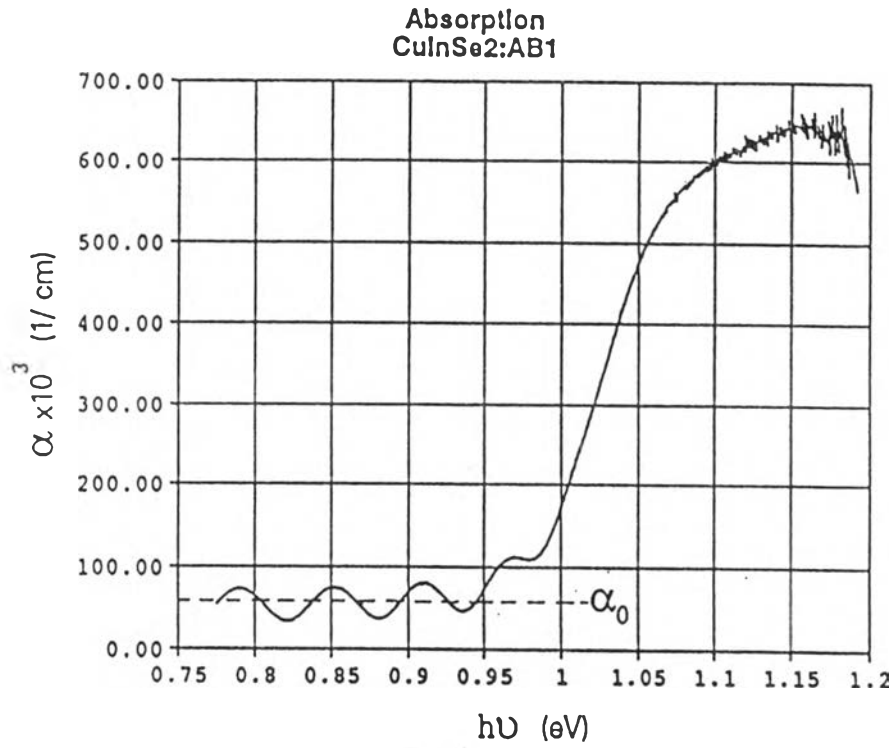
รูปที่ 7.23 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAJ1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=34$ A $\text{Se}=2$ shot/quartz



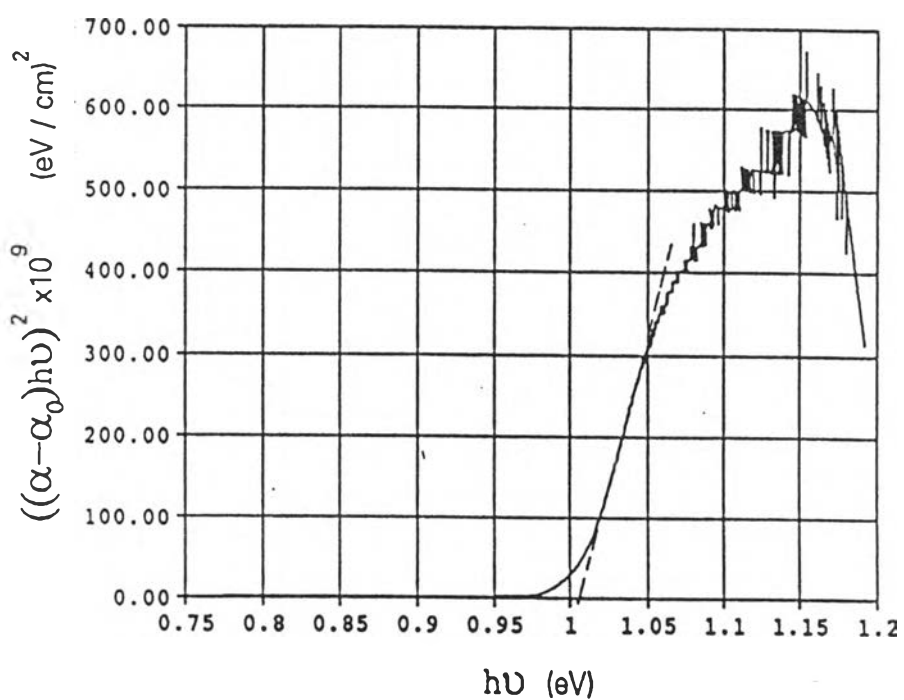
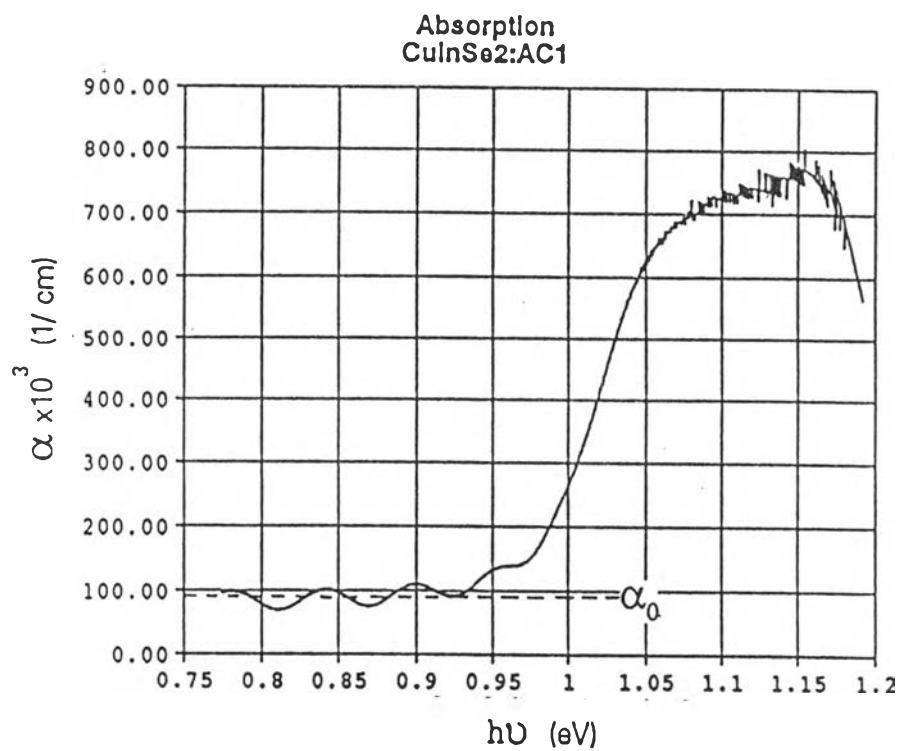
รูปที่ 7.24 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
ฟิล์มบาง CISAl Tsub=300°C Ise=36 A Se=2 shot/quartz



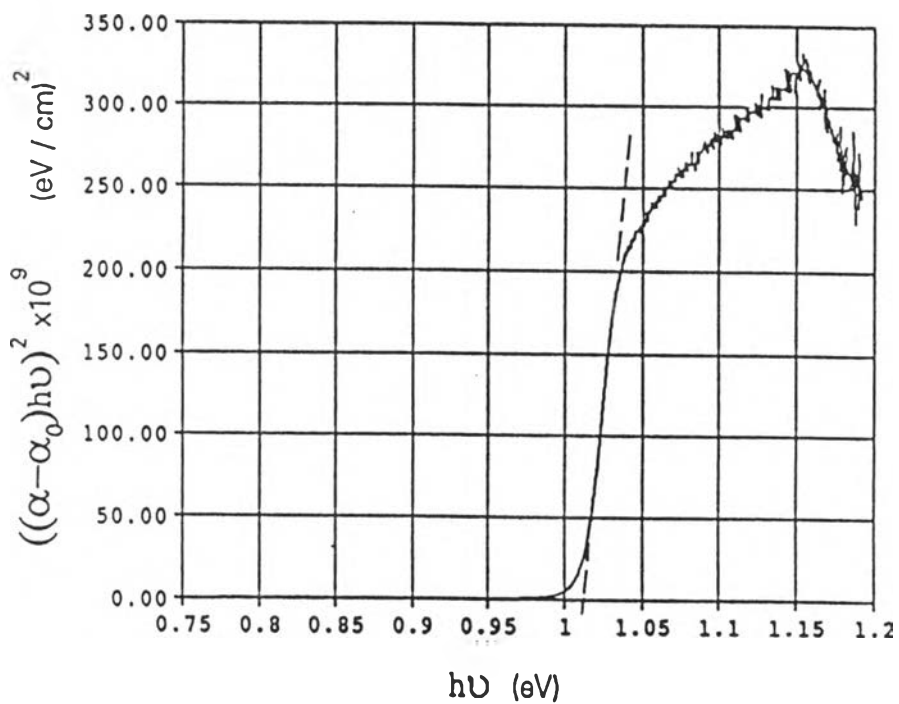
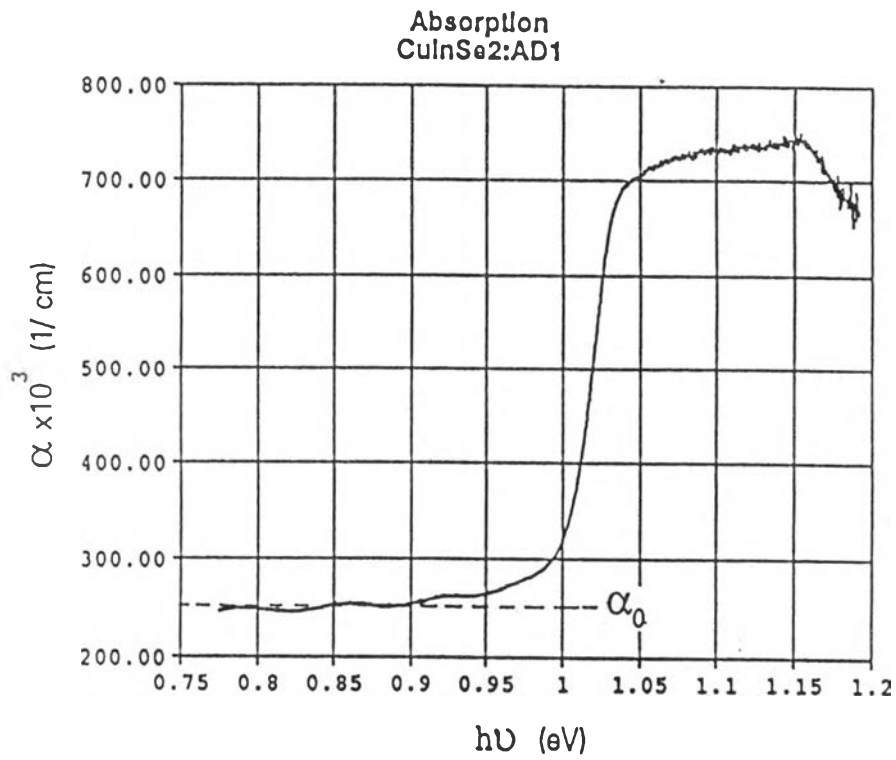
รูปที่ 7.25 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAA1 Tsub=250°C Ise=32 A Se=1 shot/quartz



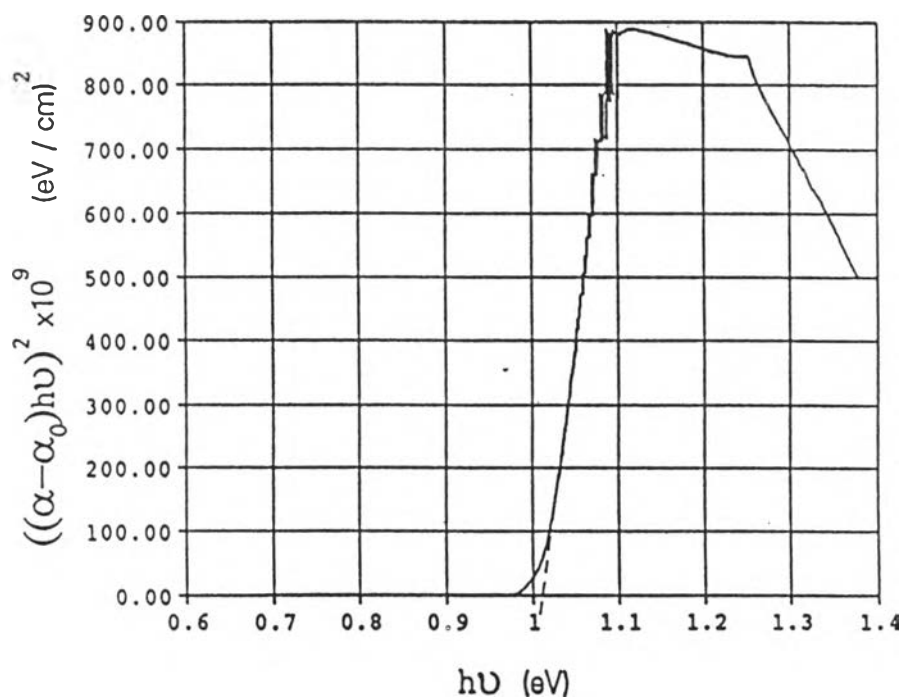
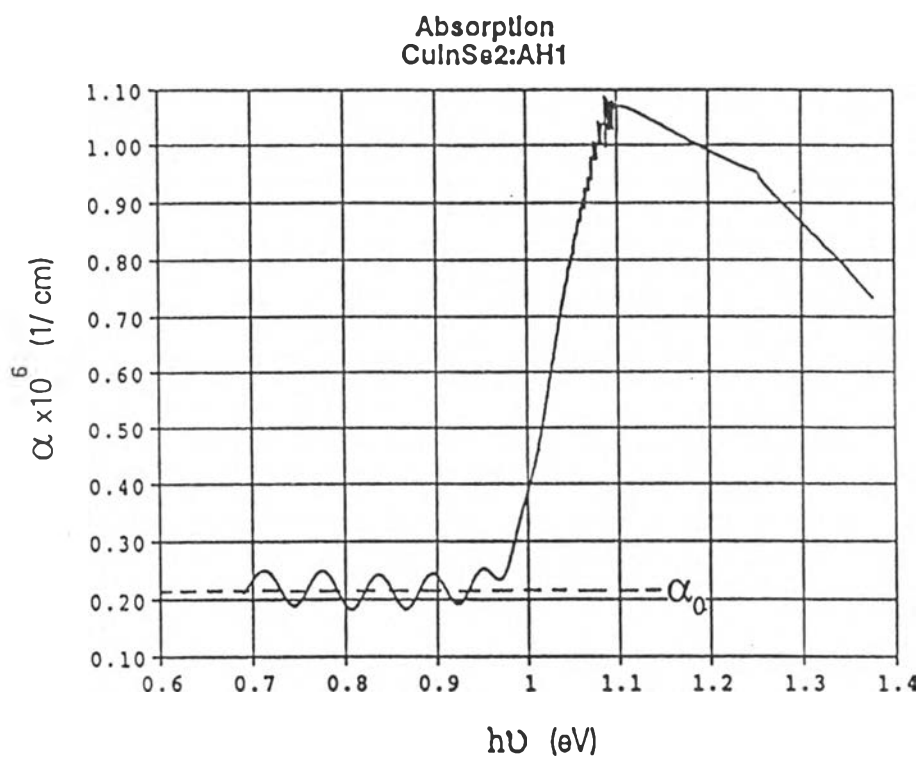
รูปที่ 7.26 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAB1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=32 \text{ A}$ $S_{\text{e}}=1 \text{ shot/quartz}$



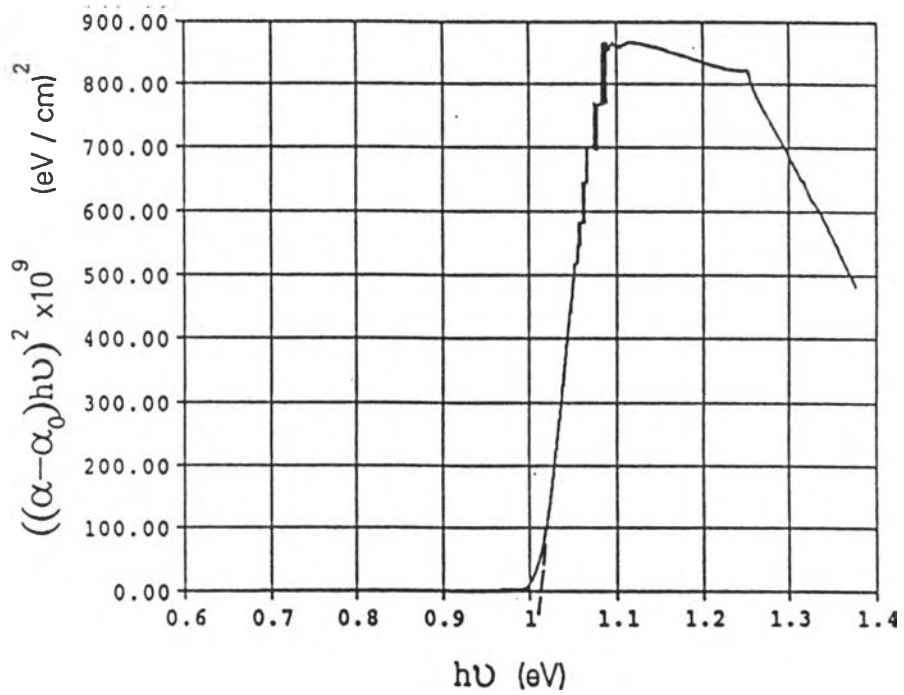
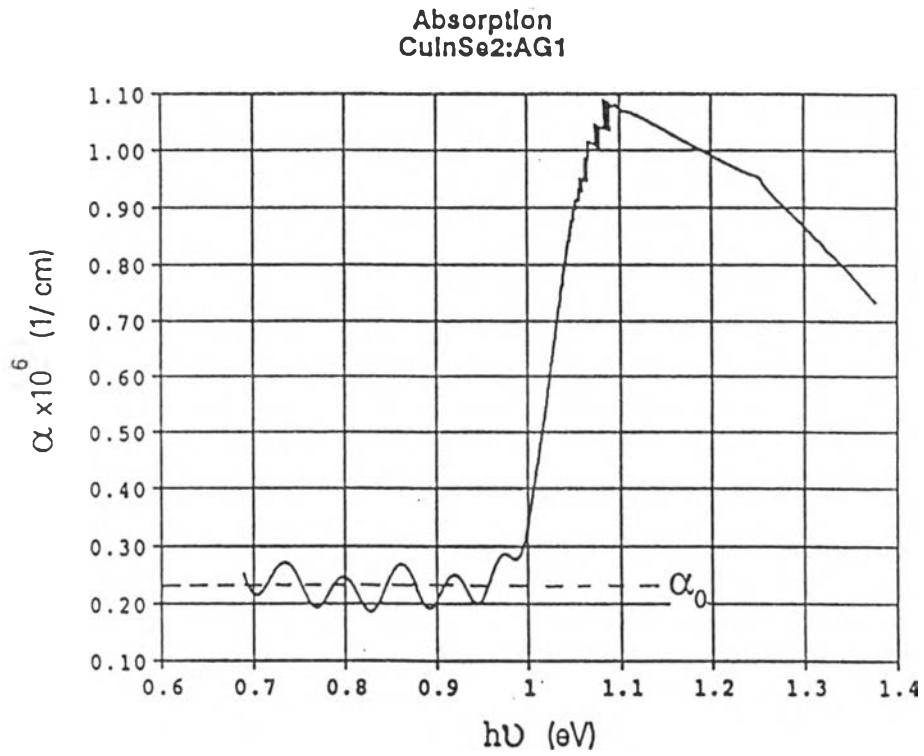
รูปที่ 7.27 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAC1 $T_{\text{sub}}=350^{\circ}\text{C}$ $I_{\text{se}}=32$ A $\text{Se}=1$ shot/quartz



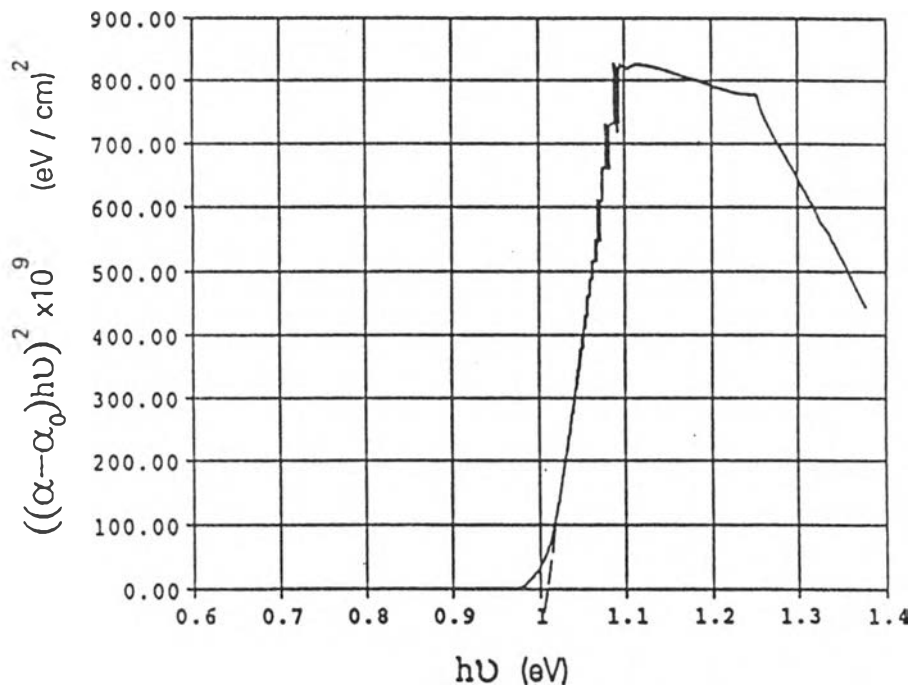
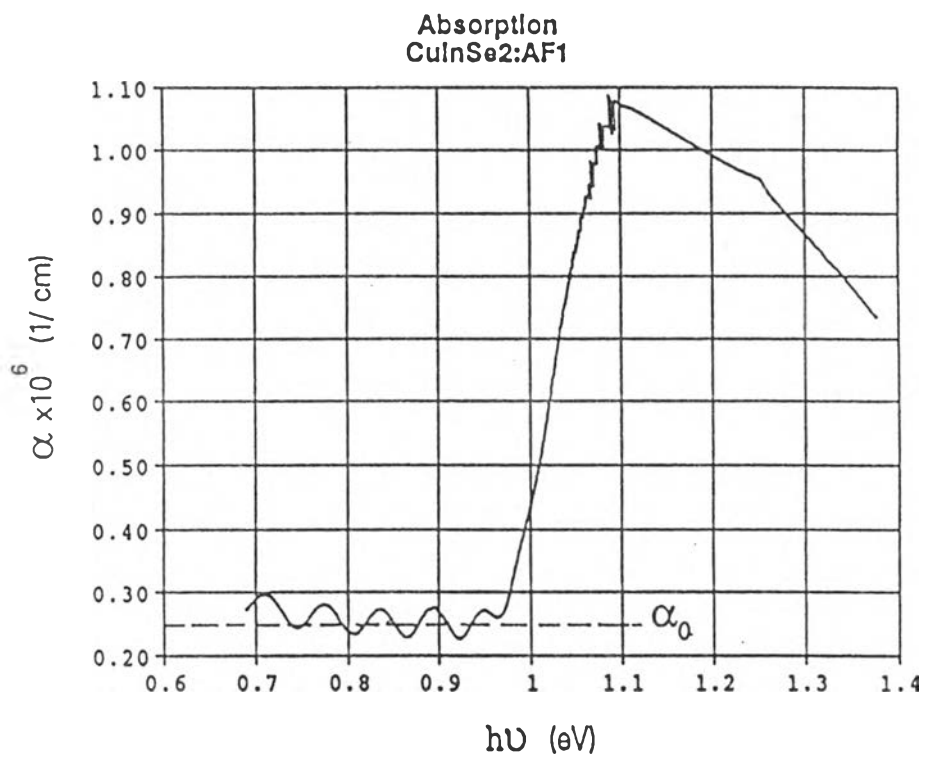
รูปที่ 7.28 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAD1 $T_{\text{sub}}=400^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=32$ A $S_{\text{e}}=1$ shot/quartz



รูปที่ 7.29 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAH1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=34$ A $S_{\text{e}}=1$ shot/quartz



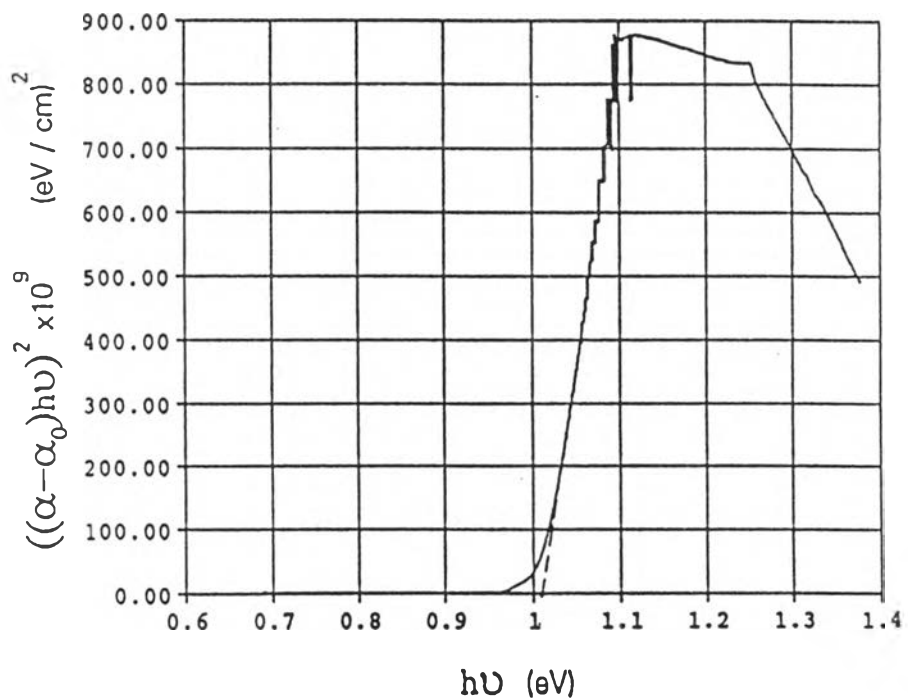
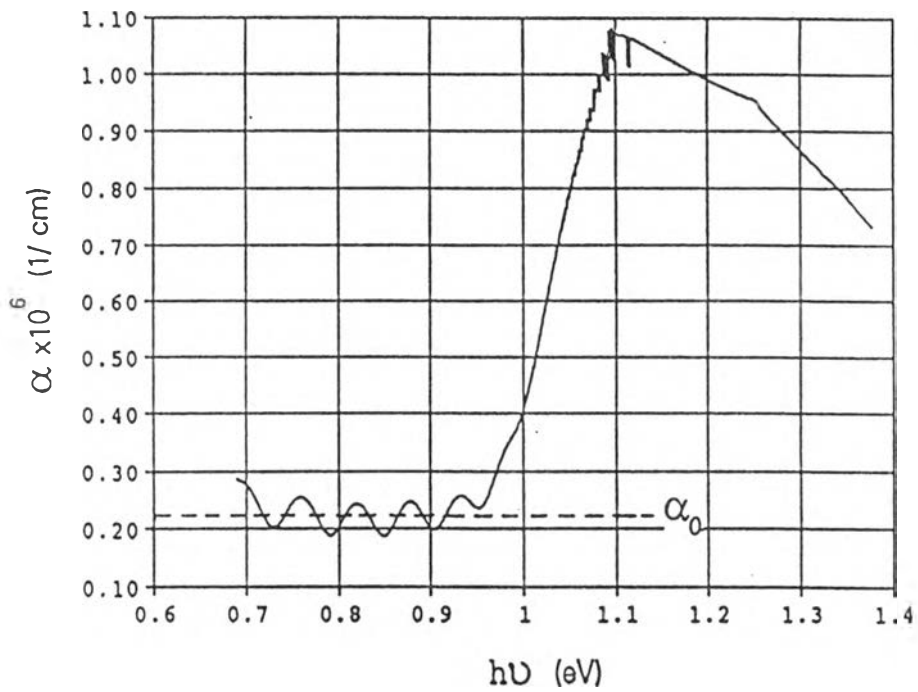
รูปที่ 7.30 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAG1 $T_{\text{sub}}=300^\circ\text{C}$ $I_{\text{se}}=36$ A $\text{Se}=1$ shot/quartz



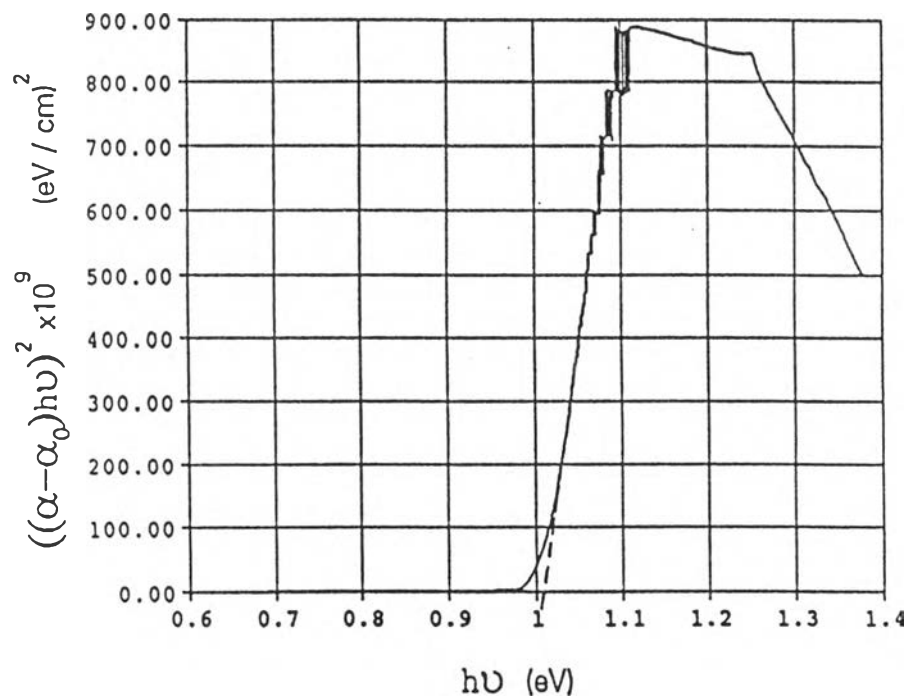
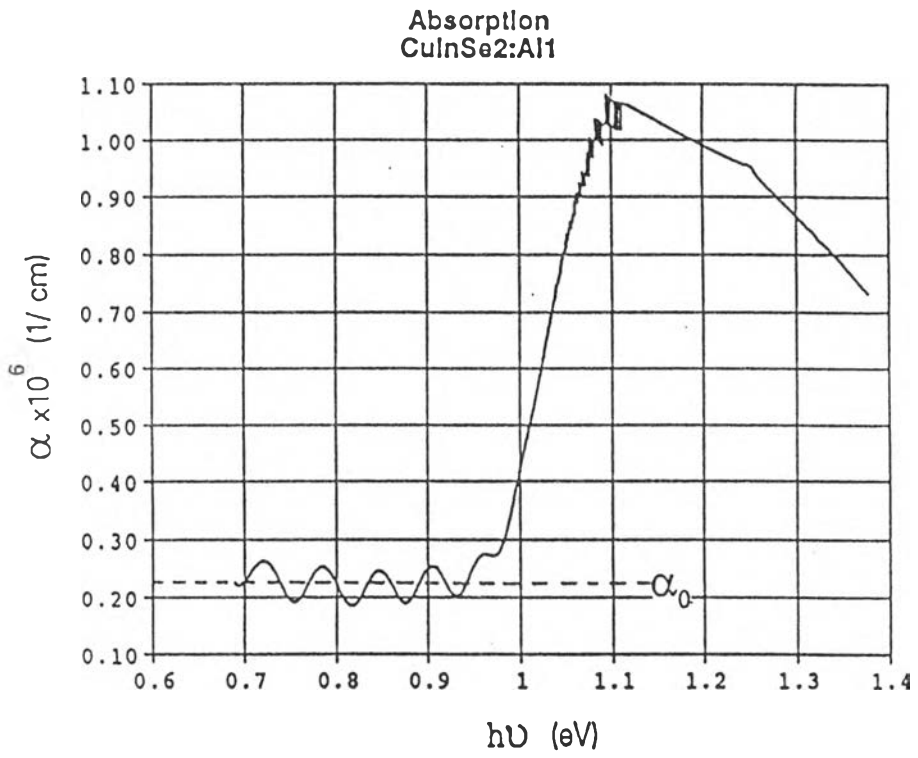
รูปที่ 7.31 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAF1 $T_{\text{sub}}=300^{\circ}\text{C}$ $I_{\text{se}}=32$ A $S_{\text{e}}=2$ shot/quartz



Absorption
CuInSe₂:AJ1



รูปที่ 7.32 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAJ1 Tsub=300°C Ise=34 A Se=2 shot/quartz



รูปที่ 7.33 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างแถบพลังงาน
ของฟิล์มบาง CISAl₁ T_{sub}=300°C I_{se}=36 A Se=2 shot/quartz