

### บทที่ 3

## การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H ด้วยวิธี CPM

### 3.1 บทนำ

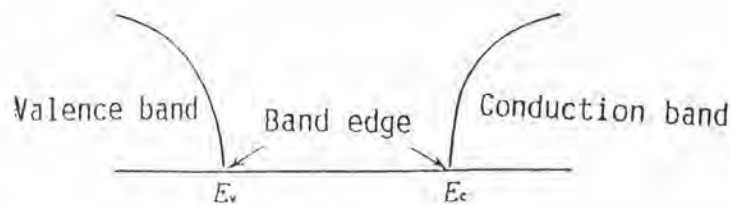
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดคุณสมบัติทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำ เช่น ในกรณีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เราต้องการให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้นแอกทีฟในเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุด ลักษณะของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะสะท้อนให้ทราบถึงข้อมูลต่างๆ มากมายในสารกึ่งตัวนำ เช่น ขนาดของช่องว่างพลังงานและลักษณะความหนาแน่นของสเปก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเทคนิคการวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในวัสดุ a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์โดยใช้เทคนิควิธี CPM (Constant Photocurrent Method) ย่านพลังงานโฟตอนของสเปกตรัมที่สนใจได้แก่ ย่านพลังงานโฟตอนที่ค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานมากๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านดังกล่าวนี้จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษเกี่ยวกับสภาพของโลคอลไลซ์สเตตเป็นอย่างมาก เพราะการดูดกลืนแสงในย่านนี้เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่มีโลคอลไลซ์สเตตเกี่ยวข้องกับช่องเสมอ ในการวัด CPM ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มตั้งแต่การออกแบบและติดตั้งระบบการวัด การเขียนโปรแกรมและดำเนินการวัด CPM

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนต่ำๆ และรายงานผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่างๆ และรายงานผลการนำค่าที่วัดได้ไปใช้คำนวณหาความหนาแน่นของโลคอลไลซ์สเตต ผลการคำนวณค่าความหนาแน่นของโลคอลไลซ์สเตตในบทนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัด ESR ดังจะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

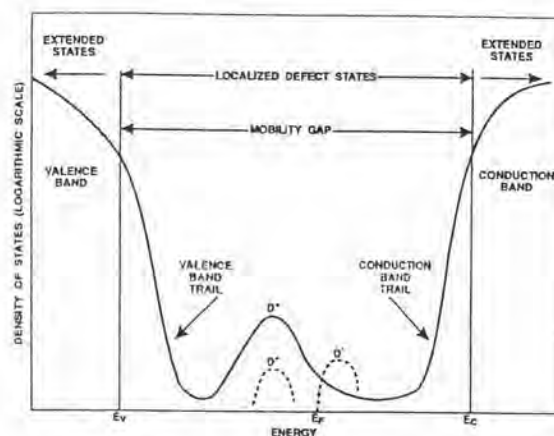
### 3.2 พื้นฐานการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H

สารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส (amorphous) มีโครงสร้างแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำชนิดผลึก (crystalline) โดยในสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัสจะมีการเรียงตัวของอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบและเป็นการเรียงตัวในระยะสั้น (short range order) ส่วนผลึกจะมีการเรียงตัวแบบเป็นระเบียบในระยะยาว (long range order) นอกจากนั้นค่าแถบพลังงานของวัสดุทั้งสองชนิดยังต่างกันคือ ในสารกึ่งตัวนำชนิดโครงสร้างเป็นผลึกจะมีขอบของแถบพลังงานที่ชัดเจน รูปที่ 3.1 แสดงความหนาแน่นของสเปก (density of states) ของวัสดุโครงสร้างผลึก



รูปที่ 3.1 ความหนาแน่นของสเทท (density of states) ของวัสดุโครงสร้างชนิดผลึก

ส่วนในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัสในปี 1979 Mott and Davis [6] ได้ตั้งแนวคิดไว้ว่าภายในช่องว่างพลังงาน (band gap) จะต้องมีมีความหนาแน่นของสเททเสมอไม่ว่ามากก็น้อยและความหนาแน่นของสเททจะมีค่าลดลงจากบริเวณที่คล้าย band edge และลดลงเรื่อย ๆ สู่ใจกลางของ band gap และเรียกความหนาแน่นของสเททภายในช่องว่างพลังงานว่า localized states และเรียกความหนาแน่นของสเททภายในแถบวาเลนซ์ หรือแถบคอนดักชันว่า extended states และเรียกแถบที่อยู่ระหว่าง extended states ทั้งสองด้านว่า mobility gap รูปที่ 3.2 แสดงความหนาแน่นสเททในสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส



รูปที่ 3.2 ความหนาแน่นสเททในสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส [7]

นอกจากนี้ ในสภาพความเป็นจริงของสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟิซจะมีแขนขาดและความบกพร่องที่เกิดจากแขนขาดจะส่งผลให้เกิด โดคอกไลซัดส์เตดเพิ่มขึ้นภายในช่องว่างพลังงานอีกด้วย

ในสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟิซซิลิคอนสามารถแบ่งสเปกตรัมการดูดกลืนแสงออกเป็น 3 ย่านสำคัญ ๆ คือ [4]

A: high absorption region ( $10^3 < \alpha < 10^5 \text{ cm}^{-1}$ )

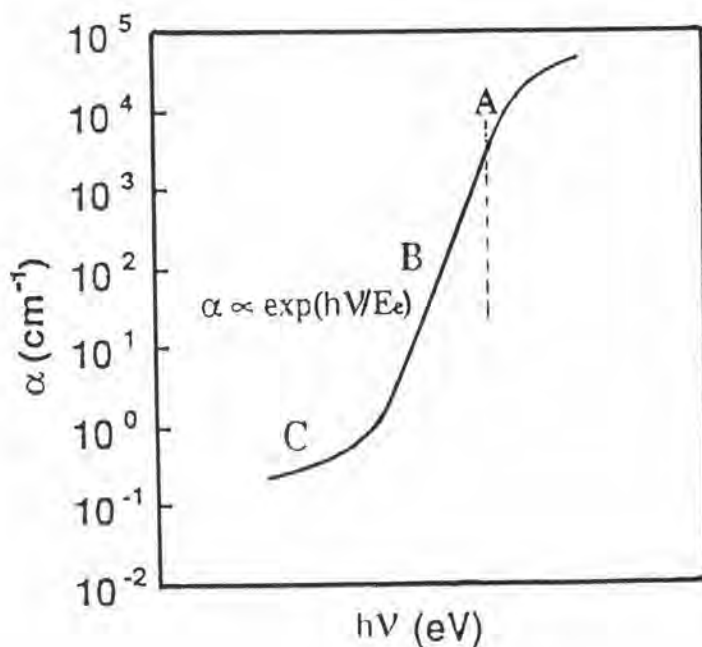
เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์สู่แถบคอนดักชัน

B: exponential part ( $10^0 < \alpha < 10^3 \text{ cm}^{-1}$ )

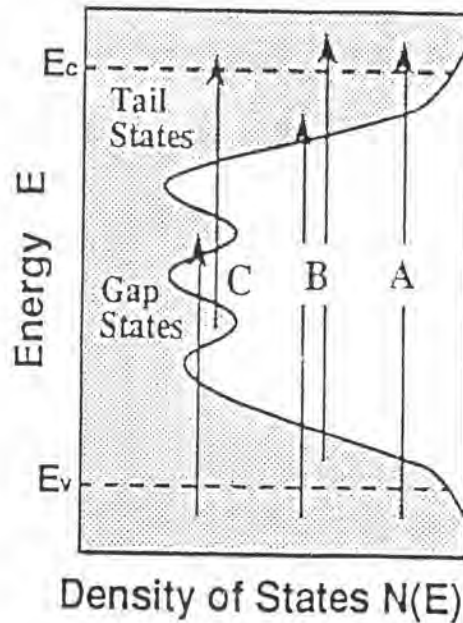
เกิดจากการเปลี่ยนสถานะที่เกี่ยวข้องกับ band tail

C: weak absorption tail ( $\alpha < 10^0 \text{ cm}^{-1}$ )

เกิดจากการเปลี่ยนสถานะที่เกี่ยวข้องกับจุดบกพร่อง



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ a-Si:H ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างสเทตต่างๆ

### 3.3 หลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในระดับโลคอลไลเซตสเทตของ

#### a-Si:H ด้วยวิธี Constant Photocurrent Method (CPM)

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานต่ำๆ (ช่วง weak absorption tail) มีวิธีการวัดได้หลายวิธีเช่น Photothermal Deflection Spectroscopy (PDS), Constant Photocurrent Method (CPM) ในวิทยานิพนธ์นี้ได้วัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยวิธี CPM ข้อเด่นของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงโดยวิธี CPM คือสะดวก ง่าย และสามารถวัดคุณสมบัติของการดูดกลืนแสงของอะมอร์ฟัสซิลิคอนได้ตลอดทั้งชิ้นงานในขณะที่วิธี PDS สามารถวัดได้เพียงพื้นผิวของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนเท่านั้น

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยวิธี CPM ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Kocka et al.[3]

การนำไฟฟ้าด้วยแสงเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการเกิดและการรวมตัวของพาหะในวัสดุสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง การเกิดพาหะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) และประสิทธิภาพควอนตัม ( $\eta$ ) ของการกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน และโฮลอิสระด้วยโฟตอน ( $h\nu$ ) ส่วนคุณสมบัติการไหลของพาหะขึ้นกับค่าความคล่องตัว ( $\mu_0$ ) และค่าเวลาอายุของพาหะอิสระ ( $\tau$ ) โดยสามารถเขียนสมการของกระแสไฟฟ้าโฟโต ( $I_{ph}$ ) ได้ดังนี้

$$I_{ph} \approx e N (1-R) [1 - \exp\{-\alpha d\}] \eta \mu_0 \tau F \quad (3.1)$$

- โดยที่ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน  
 N คือ จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบฟิล์ม a-Si:H  
 $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H  
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของ a-Si:H  
 F คือ สนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก  
 d คือ ความหนาของ a-Si:H  
 $\eta$  คือ ประสิทธิภาพควอนตัมของ a-Si:H  
 $\mu_0 \tau$  คือ ผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของ a-Si:H

จากสมการ (3.1) สามารถกระจายพจน์  $\exp\{-\alpha d\}$  ได้เป็น

$$\exp\{-\alpha d\} \approx 1 - (\alpha d) + (\alpha d)^2/2! - (\alpha d)^3/3! + \dots \quad (3.2)$$

ถ้าให้ค่า  $\alpha d \ll 1$  สมการที่ (3.2) สามารถประมาณได้เป็น

$$\exp\{-\alpha d\} \approx 1 - \alpha d \quad (3.3)$$

เนื่องจากฟิล์ม a-Si:H ที่ใช้ในการวัด CPM มีความบางมาก (ประมาณ 2 - 3 ไมครอน) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงที่วัดมีค่าน้อย (ประมาณ  $10^1 - 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) ทำให้ค่าของ  $\alpha d \ll 1$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{ph} \approx e N (1-R) \alpha d \eta \mu_0 \tau F \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสามารถเขียนในรูปสมการคือ

$$\alpha \approx I_{ph} / e N (1-R) d \eta \mu_0 \tau F \quad (3.5)$$

ในการวัด CPM จะวัดกระแสไฟฟ้าโฟโต ( $I_{ph}$ ) ในย่านพลังงานโฟตอนต่ำ ( $0.8 \text{ eV} < h\nu < 1.3 \text{ eV}$ ) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงานมาก ในย่านพลังงานโฟตอนต่ำเช่นนี้ พารามิเตอร์หลายตัวในสมการ (3.5) ซึ่งได้แก่  $e, R, \eta, \mu_0, \tau, F$  สามารถประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับพลังงานโฟตอน ดังนั้นสมการ (3.5) จึงสามารถเขียนให้ง่ายขึ้นได้เป็น

$$\alpha_{CPM}(h\nu) \approx \frac{\text{Constant} \times I_{ph}}{N(h\nu)} \quad (3.6)$$

ต่อจากนั้นถ้ากำหนดให้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนั้นได้กระแสไฟฟ้าโฟโต  $I_{ph}$  ที่มีค่าคงที่ตลอดสเปกตรัม สมการที่ (3.6) จึงเขียนได้ว่า

$$\alpha_{CPM}(h\nu) \approx \frac{\text{Constant}}{N(h\nu)} \quad (3.7)$$

โดยที่  $N(h\nu)$  นี้คือจำนวนโฟตอนของแสงอินพุตที่ถูกปรับค่าเพื่อให้ได้  $I_{ph}$  มีค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับพลังงานโฟตอน สมการที่ (3.7) นี้กล่าวได้ว่าเป็นหลักการพื้นฐานของเทคนิค CPM กล่าวคือ

“เมื่อทำการปรับความเข้มของแสงอินพุตนั้นคือการปรับค่า  $N(h\nu)$  เพื่อให้กระแสไฟฟ้าโฟโต  $I_{ph}(h\nu)$  มีค่าคงที่ตลอด สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จะมีค่าแปรผกผันกับ  $N(h\nu)$ ”

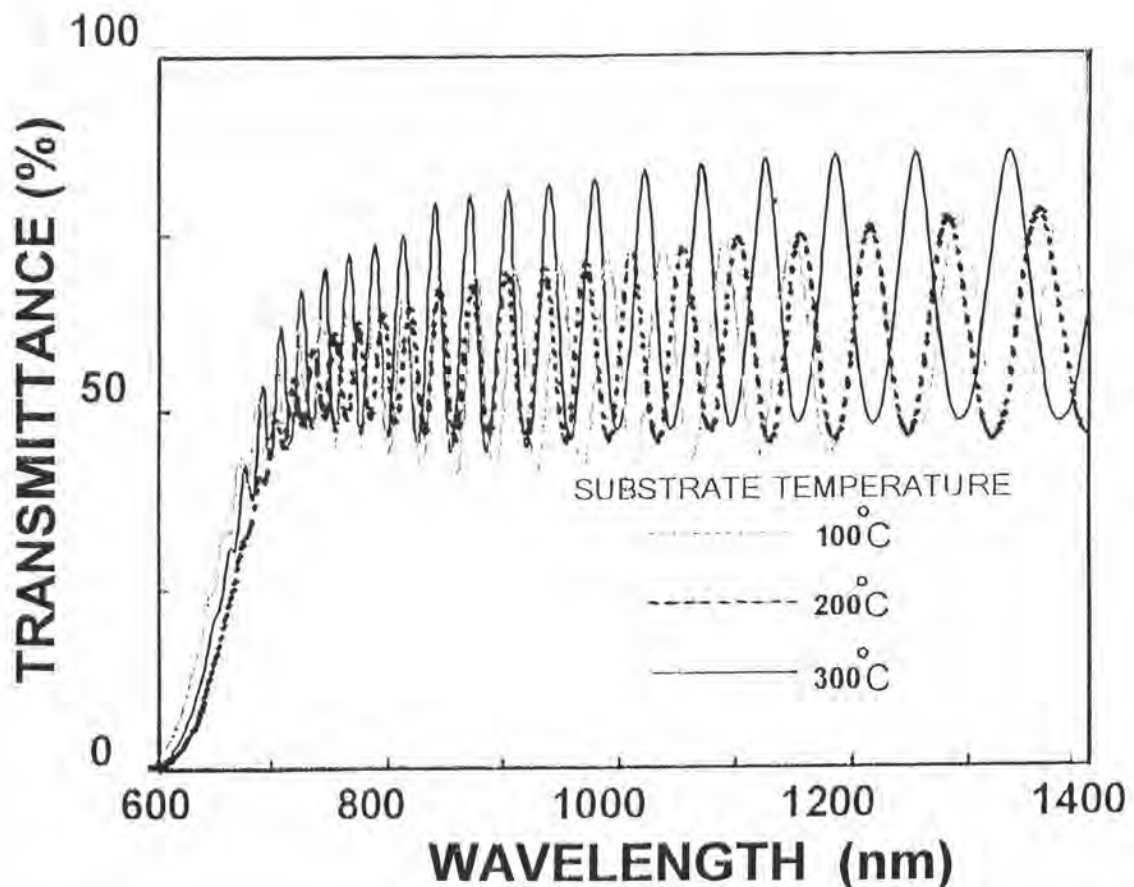
### 3.4 วิธีการวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H

ฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ที่นำมาวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เตรียมโดย วิธี glow discharge plasma CVD ฟิล์มที่ใช้หนาประมาณ 2 - 3 micron ปลูกบนกระจก coming #7059 และฉาบขั้วไฟฟ้าแบบโคพแลนาร์ (co-planar) ด้วยอะลูมิเนียมหนา 5000 Å พื้นที่รับแสงของ

a-Si:H เท่ากับ  $0.1 \times 1.5 \text{ cm}^2$  ในการวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนั้นได้แบ่งขั้นตอนการวัดเป็น 2 ย่านคือในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (ย่าน A จากรูปที่ 3.3) ด้วยวิธีการทะลุผ่านแสง (Transmission T%) และในย่านการดูดกลืนแสงต่ำกว่าช่องว่างพลังงาน (ย่าน B ถึง C จากรูปที่ 3.3) ด้วยวิธี CPM

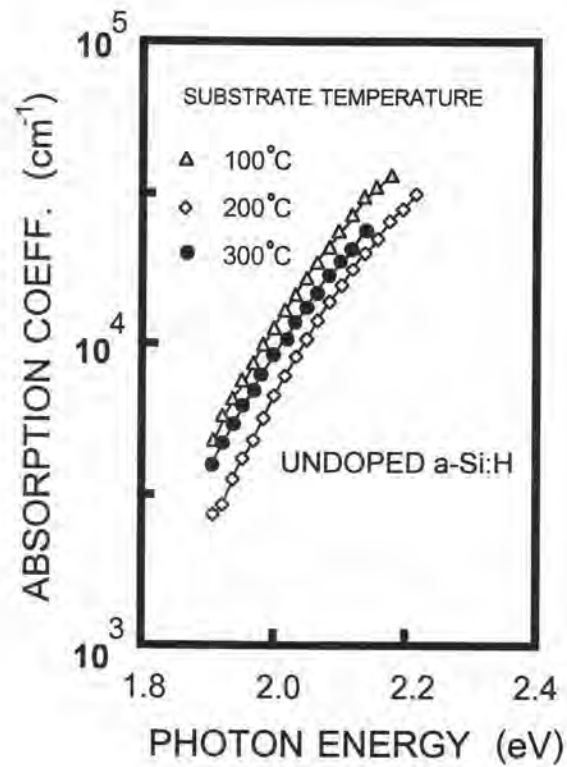
### 3.4.1 การวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H ในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงาน

ฟิล์ม a-Si:H ถูกนำมาวัดการทะลุผ่านแสง (Transmission T%) และคำนวณความหนาของฟิล์ม [7] ด้วยเครื่อง UV Spectrometer (รุ่น UV-3101PC) รูปที่ 3.5 แสดงสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของฟิล์ม a-Si:H วัดด้วยวิธี Transmission (T%) ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิพื้นฐานต่างๆ ข้อมูลจากการทะลุผ่านแสงที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงาน [4] ดังรูปที่ 3.6 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่คำนวณจากค่าการทะลุผ่านแสง (T%) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิพื้นฐานในการปลูกฟิล์มต่างๆ



รูปที่ 3.5 สเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนซึ่งวัดด้วยวิธี Transmittion (T%) ในย่านความยาวคลื่นแสง 600 nm - 1400 nm





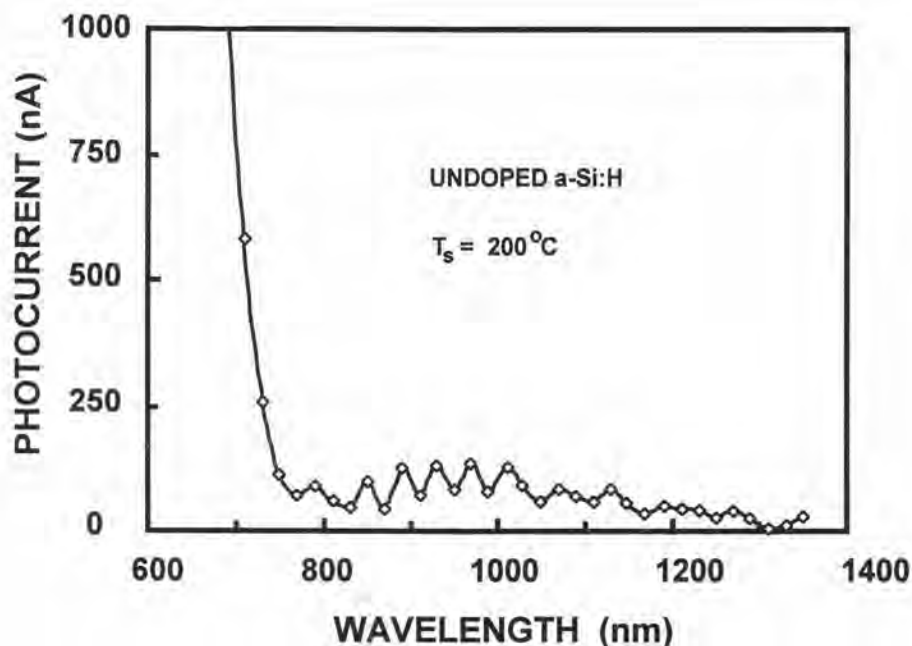
รูปที่ 3.6 สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์คำนวณจากค่าการทะลุผ่านแสง (T%) ในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงาน

### 3.4.2 การวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H ในย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงาน

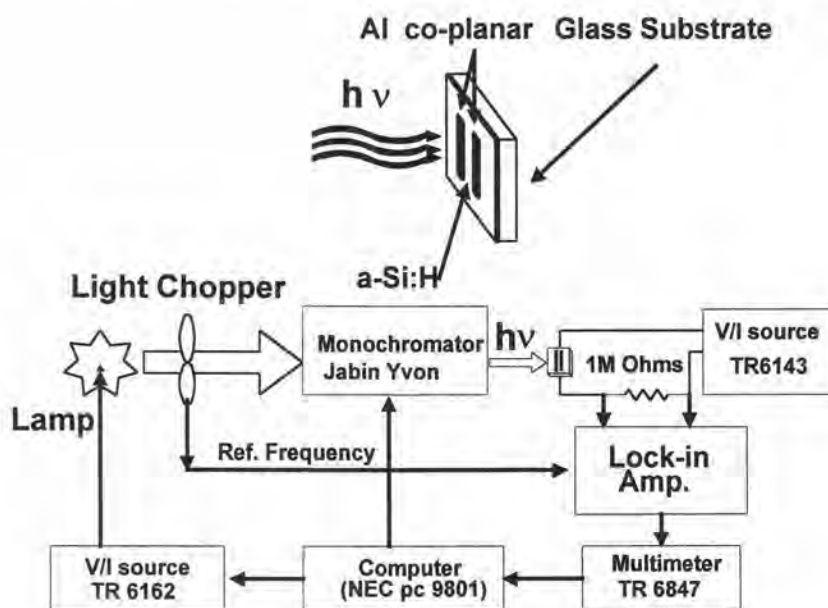
ในการวัดสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงานด้วยวิธี CPM นั้นค่าของ photon flux ( $N(h\nu)$ ) จะถูกปรับเพื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตมีค่าคงที่ตลอดขณะสแกนวัดที่ความยาวคลื่นแสงต่างๆ แสงที่ใช้วัดจะอยู่ในช่วง 650-1400 nm ขณะที่วัดค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตจะใช้เทคนิคของ lock-in amplifier ในการตัดสัญญาณรบกวนจากภายนอกและใช้ความถี่ของ Chopper ที่ 23 Hz รูปที่ 3.7 แสดงสเปกตรัมตัวอย่างค่ากระแสไฟฟ้าโฟโตก่อนที่จะถูกปรับให้คงที่ตลอดทุกความยาวคลื่นของ a-Si:H ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิแผ่นฐาน 200°C



รูปที่ 3.8 แสดงแผนภูมิการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยวิธี CPM และตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขสำหรับการวัด CPM รูปที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายระบบการวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยวิธี CPM



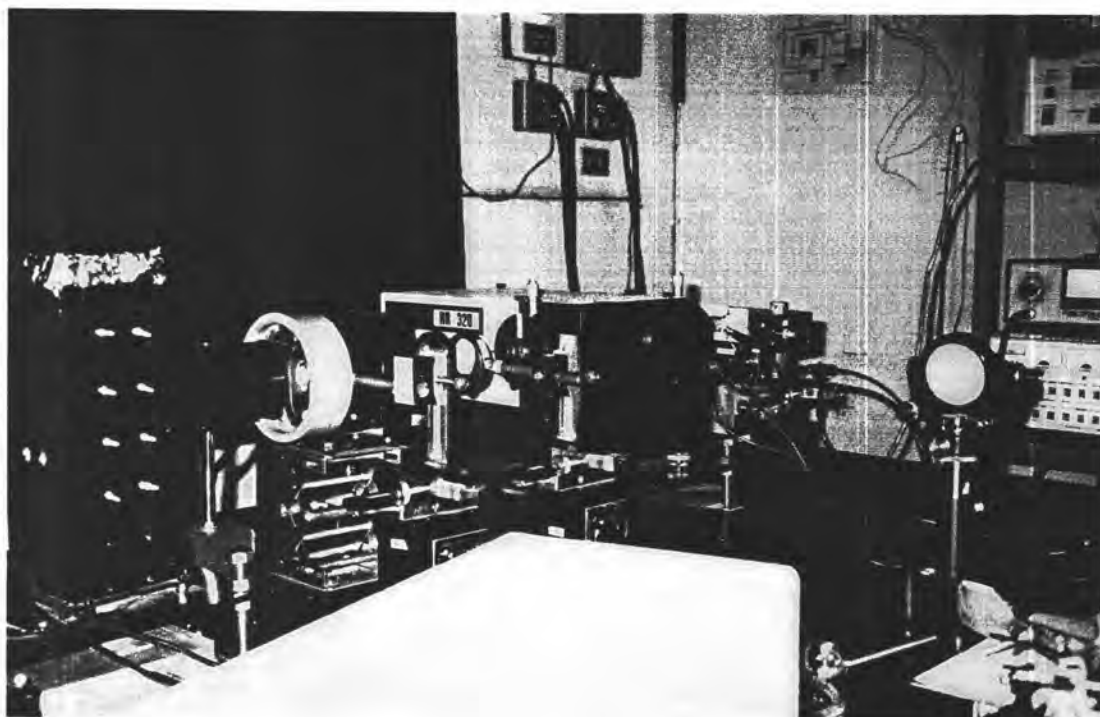
รูปที่ 3.7 สเปกตรัมกระแสไฟฟ้าโฟโตก่อนการวัด CPM



รูปที่ 3.8 แผนภูมิวิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยวิธี CPM

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ด้วยวิธี CPM

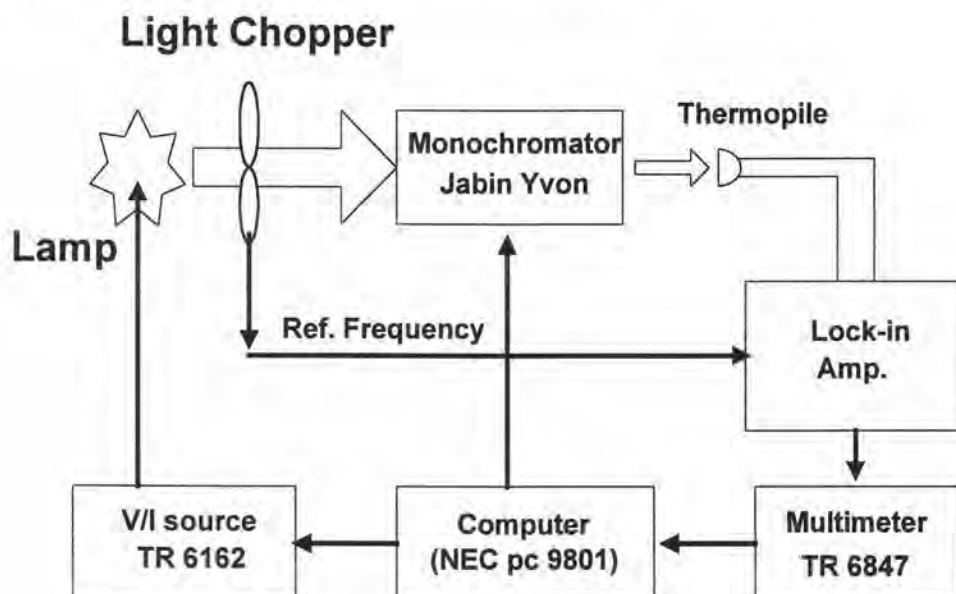
ความถี่ chopper	23 Hz
แรงดันไบแอสฟิล์ม a-Si:H	100-200 V
ช่วงสเปกตรัมที่สแกน	650-1400 nm
กระแสไฟฟ้าโฟโต	100-500 nA



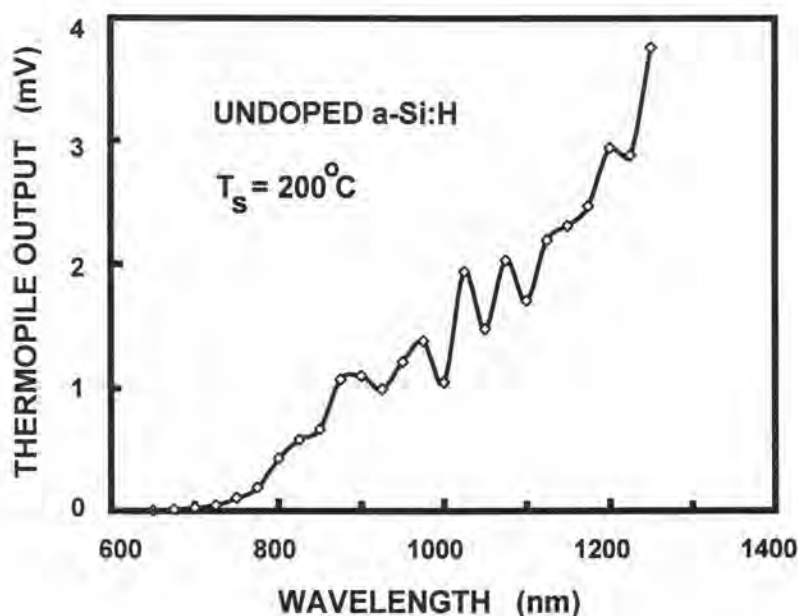
รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายระบบการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยวิธี CPM

สัญญาณกระแสไฟฟ้าโฟโตที่วัดได้จะถูกขยายด้วย lock-in-amplifier และส่งเข้าสู่ digital multimeter ข้อมูลที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้ในการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าโฟโต มีค่าคงที่ตลอดการวัด ค่าสเปกตรัมของ photon flux ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโตคงที่ จะถูกบันทึกในคอมพิวเตอร์ และนำมาคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงตามสมการที่ (3.7)

สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่วัดได้จากวิธี CPM จะถูกนำมาลากต่อเชื่อมกับสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่วัดด้วยวิธี Transmission (T%) ของฟิล์มเดียวกัน [9] รูปที่ 3.10 แสดงแผนภูมิการวัดจำนวนของโฟตอนที่ทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโตในการวัด CPM มีค่าคงที่ และรูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอน (แปรผันตรงกับ thermopile output) และความยาวคลื่นของแสงในการวัด CPM



รูปที่ 3.10 แผนภูมิการวัดจำนวนของโฟตอนที่ทำให้กระแสไฟฟ้าโฟโต ในการวัด CPM มีค่าคงที่



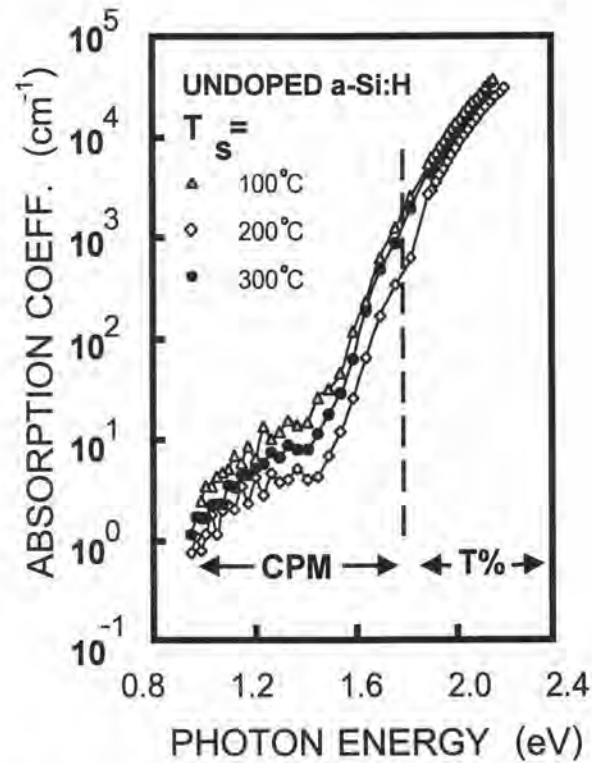
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนและความยาวคลื่นของแสงในการวัด CPM

### 3.5 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H ด้วยวิธี CPM

รูปที่ 3.12 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ (undoped) โดยที่นำเอาส่วนของสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่วัดได้จากการวัด T% (ในหัวข้อ 3.4.1) มาต่อเชื่อมเข้ากับสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัด CPM (ในหัวข้อ 3.4.2) โดยที่ใช้เงื่อนไขอุณหภูมิพื้นฐานในการปลูกฟิล์ม a-Si:H คือ  $T_s = 100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0.8-1.6 eV ที่วัดได้โดย CPM จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนใน gap states ที่เกิดจากจุดบกพร่องในวัสดุ a-Si:H จากรูปที่ 3.12 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนต่ำของฟิล์ม a-Si:H ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิพื้นฐาน  $T_s = 200^\circ\text{C}$  จะมีค่าน้อยกว่าที่  $T_s = 300^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$  ตามลำดับ แสดงว่าความหนาแน่นของจุดบกพร่องใน a-Si:H ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิพื้นฐาน  $200^\circ\text{C}$  มีค่าน้อยกว่าที่  $300^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$  สาเหตุเกิดจาก ที่อุณหภูมิในการปลูกฟิล์ม  $300^\circ\text{C}$  ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์มจะมากขึ้นจนอะตอมไฮโดรเจน สามารถหลุดออกจากผิวของฟิล์มได้ทำให้จำนวนของไฮโดรเจนที่จับกับ si ในฟิล์มลดลงดังนั้นจึงมีจำนวนของแขนขา มากกว่าที่  $T_s = 200^\circ\text{C}$  ส่วนที่  $T_s = 100^\circ\text{C}$  จำนวนของไฮโดรเจนที่  $T_s$  ต่ำจะมีมากเกินไปจนทำให้อะตอมไฮโดรเจนสามารถเกิดการ interaction กับอะตอมรอบข้าง และทำให้ weak Si-Si bonds แยกออก นั่นคือจะทำให้จำนวนของแขนขาใน a-Si:H มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์ม a-si:H ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิพื้นฐาน  $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  สามารถหาได้ โดยใช้ข้อมูลการทะลุผ่านแสง (T%) ของฟิล์ม a-si:H ที่วัดได้จากหัวข้อ 3.4.1 มาคำนวณโดยใช้วิธี Tauc's plot ซึ่งผลการคำนวณได้ค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.760 eV, 1.813 eV และ 1.805 eV ตามลำดับ สาเหตุที่ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์ม a-si:H ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิพื้นฐาน  $200^\circ\text{C}$  มีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิพื้นฐาน  $100^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  เพราะปริมาณของจุดบกพร่องในฟิล์ม a-Si:H ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิพื้นฐาน  $200^\circ\text{C}$  มีค่าน้อยกว่าที่  $300^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$  นั่นเอง



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $\alpha(h\nu)$  และ พลังงานโฟตอน  $E(h\nu)$  ที่เงื่อนไขอุณหภูมิพื้นฐานในการปลูกฟิล์มต่างๆ

เนื่องจากในวัสดุ a-Si:H จำนวนความหนาแน่นของจุดบกพร่องชนิดแขนขาดมีผลต่อการดูดกลืนแสงในย่าน weak absorption tail (ซึ่งสามารถวัดได้โดยวิธี CPM) เพราะเป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนใน gap state ความหนาแน่นของจุดบกพร่องชนิดแขนขาด (dangling bonds) ในวัสดุ a-Si:H มีความสัมพันธ์กับค่าอินทิกรัลของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดังนี้ [10]

$$N_D = \frac{c n m_e}{2\pi^2 \hbar^2} \times \left[ \frac{(1 + 2n^2)^2}{e^2 f_{oj} 9n^2} \right] \int \alpha(h\nu) d(h\nu) \quad (3.8)$$

โดยที่	$N_D$	คือ ความหนาแน่นของจุดบกพร่องใน a-Si:H
	$c$	คือ ความเร็วของแสง
	$n (\approx 3.8)$	คือ ดัชนีหักเหของวัสดุ a-Si:H
	$m_e$	คือ มวลของอิเล็กตรอน
	$e$	คือ ประจุของอิเล็กตรอน
	$f_{oj}$	คือ oscillator strength ในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนใน

วัสดุ a-Si:H ขณะดูดกลืนแสง

$\alpha(h\nu)$  คือ สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H

จากสมการที่ (3.8) สามารถบอกได้ว่าจำนวนความหนาแน่นของจุดบกพร่องชนิดแขนขาดใน a-Si:H แปรผันโดยตรงกับค่าอินทิกรัลของสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $\alpha(h\nu)$  ในช่วง weak absorption tail ซึ่งมีพลังงานโฟตอนต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงาน (ประมาณ 0 - 1.6 eV) นั่นคือ ความหนาแน่นของจุดบกพร่องใน a-Si:H แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ใต้ curve ของสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $\alpha(h\nu)$  ในช่วงพลังงานโฟตอนประมาณ 0 - 1.6 eV

จากที่กล่าวมาข้างต้นสมการที่ (3.8) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$N_D = 7.9 \times 10^{15} \int_0^{1.6 \text{ eV}} \alpha(h\nu) d(h\nu) \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (3.9)$$

เมื่อนำข้อมูลจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  $\alpha(h\nu)$  ที่วัดได้โดยใช้วิธี CPM มาคำนวณในสมการที่ (3.9) สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของจุดบกพร่องของ a-Si:H ได้คือ  $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  และ  $8.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  สำหรับฟิล์ม a-Si:H ที่ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐาน  $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  ตามลำดับ

### 3.6 สรุป

ฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่างๆ คือ  $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  ถูกนำมาวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานต่ำด้วยวิธี Constant Photocurrent Method (CPM) พบว่าฟิล์มที่ปลูกด้วยอุณหภูมิแผ่นฐาน  $200^\circ\text{C}$  จะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานต่ำน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิแผ่นฐาน  $100^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  ตามลำดับคือประมาณ  $10^0$ - $10^1 \text{ cm}^{-1}$  ในช่วงพลังงานโฟตอนระหว่าง 0.8 -1.6 eV และเมื่อนำมาคำนวณค่าความหนาแน่นของจุดบกพร่องของฟิล์มที่ปลูกด้วยอุณหภูมิแผ่นฐาน  $200^\circ\text{C}$  มาเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิแผ่นฐาน  $100^\circ\text{C}$  และ  $300^\circ\text{C}$  ตามลำดับพบว่ามีความหนาแน่นของจุดบกพร่องน้อยที่สุดคือ  $5.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ความหนาแน่นของจุดบกพร่องที่วัดได้ด้วยวิธี CPM นี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นสปินที่วัดด้วยวิธี Electron Spin Resonance (ESR) ในบทต่อไป และนำไปใช้ในการหาอุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมเพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางชนิด a-Si:H